

เครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ RECYCLABLE WASTE SORTING MACHINE WITH IMAGE PROCESSING

ธนโชติ ภาชนะชัย¹, จักรกริช ปานเงิน¹, กรรณิการ์ คณงาม¹, วรชัย ศรีสมุดคำ¹, วาสนา วงศ์ษา^{1*}

Thanachot Phachanai¹, Chakkrit Panngoen¹, Kannika Khonngam¹,

Worachai Srisamoodkham¹, Wassana Wongs^{1*}

¹ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ ประเทศไทย 67000

¹Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University, Muang,
Phetchabun, Thailand, 67000

*Corresponding author e-mail: wassanaw@pcru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 6 กันยายน 2565

วันที่แก้ไขบทความ 1 พฤศจิกายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 1 พฤศจิกายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ ให้สามารถควบคุมการคัดแยกขยะรีไซเคิล 4 ประเภทได้แก่ กระป๋อง ขวดแก้ว กล่องกระดาษ และขวดพลาสติก พร้อมทำการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันเมื่อถึงขยะใกล้เต็ม ระบบประกอบด้วยกล้อง IMILAB Webcam รับภาพวัตถุแบบเรียลไทม์เชื่อมต่อกับ Raspberry Pi4 Model B เพื่อทำการประมวลผลการจำแนกขยะด้วยโมเดลของ YOLOv5 ที่ผ่านการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลภาพ 1,321 ภาพ 250 รอบ มีค่า mAP50% 0.995, Recall 0.995, Precision 0.999 และค่า F-measure 0.997 โดยเชื่อมต่อกับ Module L298N ในการควบคุมตำแหน่งการหมุนของสเต็ปมอเตอร์ไปยังถังขยะเอาต์พุตและควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ในการเทขยะลงถังขยะแต่ละประเภท ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานพบว่าสามารถคัดแยกขยะได้ถูกต้องตามประเภทคิดเป็น 98.33% ผลลัพธ์ค่าช่วงความเชื่อมั่น (Confidence interval) อยู่ในช่วง 0.50 - 0.97 ผลทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดแวร์ในการแยกขยะไปยังถังขยะเอาต์พุตแต่ละประเภทด้วยสเต็ปมอเตอร์และเซอร์โวมอเตอร์ และการแจ้งเตือนเมื่อถึงขยะใกล้เต็มถึงผ่านแอปพลิเคชันสามารถทำงานได้ถูกต้อง 100%

คำสำคัญ: เครื่องคัดแยกขยะ, การประมวลผลภาพ, การคัดแยกวัตถุ, โครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน

Abstract

This research aimed to establish and test the performance of a recyclable waste sorting machine with image processing to provide control over the sorting of 4 types of recyclable waste: cans, glass bottles, carton boxes, and plastic bottles, and to give notification via LINE application when the bin was almost full. The system consisted of an IMILAB Webcam camera, receiving real-time images of objects, connected to the Raspberry Pi4 Model B to process waste classification with YOLOv5's model, which was trained with data sets of 1,321 images for 250 epochs. It had a mAP50% value of 0.995, recall 0.995, precision 0.999, and F-measure 0.997. This machine was connected to Module L298N to control the rotation position of the step motor to the output bin and control the servo motor to pour waste into each type of bin. The performance test results of the machines showed that the correct sorting of waste by type was with 98.33% accuracy, and the confidence interval results in the range of 0.50 - 0.97. Furthermore, the results of the test the performance of the hardware in separating waste to each type of output bin with step motor and servo motor and the notification system when the bin was nearly full via the LINE application could work 100% correctly.

Keywords: Waste sorting machine, Image processing, Object classification, Convolution neural networks

1. บทนำ

ขยะเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ขยะสามารถแบ่งได้หลายประเภท โดยขยะแต่ละประเภทนั้นก็มีความแตกต่างกันออกไป ปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณขยะสูงขึ้นต่อเนื่องทุกปี จากรายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทยปี 2563 พบว่ามีปริมาณขยะพลาสติกเกิดขึ้นในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดฯ ประมาณ 6,300 ตัน/วัน เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 15 จากในช่วงสถานการณ์ปกติมีขยะพลาสติกประมาณ 5,500 ตัน/วัน (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, 2564) ปัจจุบันประเทศไทยมีการประดิษฐ์เครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติเป็นจำนวนมาก ซึ่งหนึ่งในเครื่องคัดแยกขยะที่พัฒนาขึ้นโดยคุณสรณ์ และคณะ (2562) เป็นต้นแบบเครื่องคัดแยกขวดอัตโนมัติที่ใช้สัญญาณเซนเซอร์วัดค่าน้ำหนักและเซนเซอร์ตรวจจับโลหะเพื่อแยกขยะขวดพลาสติก ขวดแก้ว และกระป๋อง จากงานวิจัยที่มีการนำเทคโนโลยีการรู้จำภาพวัตถุมาใช้ร่วมกับกล้องตามชุมชนของณัฐนันท์ และคณะ (2563) ได้พัฒนาเป็นระบบตรวจจับและคัดแยกขยะด้วยการประมวลผลภาพโดยใช้การ

ตรวจจับภาพถุงขยะสีดำ ปัจจุบันภายในมหาวิทยาลัยมีปริมาณขยะเพิ่มขึ้น จากการสังเกตขยะส่วนใหญ่เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดและกล่องเครื่องดื่มที่ถูกทิ้งปะปนกับขยะอื่นๆ และยังไม่มีมีการใช้เทคโนโลยีในการคัดแยกประเภทของขยะเพื่อให้สามารถนำขยะกลับไปรีไซเคิลได้ ทางคณะผู้จัดทำจึงมีวิธีการที่แตกต่างจากวิธีดังที่กล่าวมาซึ่งจะใช้กระบวนการจัดการและวิเคราะห์รูปภาพให้เป็นข้อมูลในแบบดิจิทัล โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เราต้องการในเชิงคุณภาพและปริมาณ ทั้งขนาดและรูปร่างเป็นการแยกขยะด้วยการประมวลผลภาพและการเรียนรู้ของเครื่องซึ่งมีการนำมาใช้ในปัจจุบันดังเช่น การสร้างระบบตรวจจับบุคคลแบบเวลาจริงราคาประหยัดบน Raspberry Pi โดยประยุกต์อัลกอริทึม Tiny YOLO V3 (ปราโมทย์ และคณะ, 2562). ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพด้านความแม่นยำในการนับจำนวนเมื่อเทียบกับจำนวนบุคคลจริงทั้งหมด และการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันทำนายภาษากายของคนสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อ (ดำรงศักดิ์ และคณะ, 2565). ใช้เวลาในการประมวลผลแต่ละภาพโดยเฉลี่ย 0.05 วินาที มีความถูกต้อง 80 เปอร์เซ็นต์ แนวทางการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม YOLO ที่มีความสามารถในการจำแนกวัตถุอย่างแม่นยำและรวดเร็วมาพัฒนาระบบให้สามารถคัดแยกขยะที่จะนำไปรีไซเคิลแต่ละประเภทออกมา คือ ขวดพลาสติก ขวดแก้ว กระป๋องโลหะ และกล่องกระดาษ เพื่อตอบสนองความต้องการในการคัดแยกขยะภายในบริเวณอาคารเรียนของสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์อย่างเป็นระบบ

ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้มีแนวคิดที่จะจัดทำเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ โดยระบบคัดแยกขยะที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยซอฟต์แวร์การประมวลผลภาพโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคของ YOLOv5 ในการคัดแยกวัตถุและฮาร์ดแวร์ส่วนที่เป็นอุปกรณ์รับภาพเป็นส่วนตรวจจับวัตถุที่ถูกหย่อนลงมาในกล่องรับขยะว่าเป็นขยะประเภทใด แล้วจึงใช้สเต็ปมอเตอร์หมุนและเซอร์โวมอเตอร์เหวี่ยงวัตถุไปยังถังขยะรีไซเคิลที่ได้จัดเตรียมเอาไว้แต่ละประเภท เพื่อลดเวลาในการคัดแยกขยะด้วยมือและสามารถนำขยะกลับไปทำการรีไซเคิลได้ทันที ช่วยให้มีการคัดแยกขยะอย่างเป็นระบบปลอดภัยต่อผู้คัดแยกขยะ ส่งเสริมสิ่งแวดล้อม และลดเวลาในการคัดแยกขยะของสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ได้

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อสร้างเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยวิธีการประมวลผลภาพ
- 2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

คณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยมีทฤษฎีพื้นฐานดังนี้

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 ทฤษฎีการประมวลผลภาพ (Image processing) เป็นกระบวนการจัดการและวิเคราะห์รูปภาพให้เป็นข้อมูลในแบบดิจิทัล โดยการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ (บุญธรรม, 2556) ในการกรองข้อมูลภาพ (Image filtering) เป็นการนำภาพต้นฉบับผ่านตัวกรองสัญญาณเพื่อให้ได้ภาพผลลัพธ์ออกมาโดยจะใช้วิธีการประมวลผลภาพแบบบริเวณเรียกว่า การคอนโวลูชัน ซึ่งคือการกระทำระหว่างภาพกับมาสก์ที่เป็นเมทริกซ์ขนาด $n \times m$ ของชุดตัวเลขเพื่อนำไปซ้อนทับภาพที่ตำแหน่งต่างๆ และหาผลลัพธ์ของการคอนโวลูชันได้จากผลรวมของผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ในมาสก์กับค่าระดับความเข้มเทาของแต่ละจุดภาพในตำแหน่งที่ตรงกันแบบจุดต่อจุดโดยให้มาสก์เคลื่อนผ่านตลอดทั้งภาพ (สมเกียรติ, 2554)

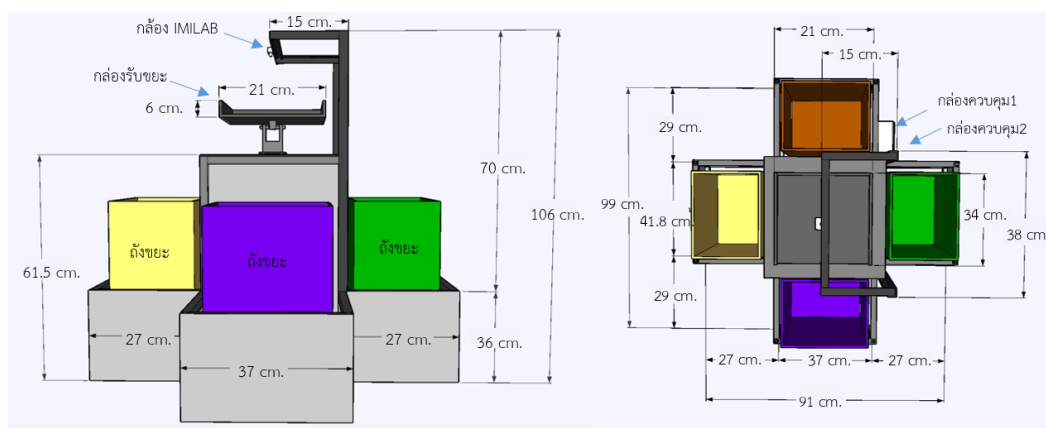
3.1.2 ทฤษฎี Machine learning คือ การเรียนรู้ของเครื่องเป็นองค์ประกอบหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ เป็นส่วนที่ใช้ในการคิดและตัดสินใจหรือเป็นอัลกอริทึมของ AI (ปัญญา, 2564) หลักการทํานายผลของ Machine learning คือ การทํานายผลเพื่อใช้ในการตัดสินใจโดยอาศัยการเรียนรู้แบบแนวคิดจากมนุษย์ โดยอาศัยวิธีการคิดทางคณิตศาสตร์และสถิติในการสร้างแบบจำลองหรือโมเดลจากการนำชุดข้อมูลตัวอย่าง (Data set) ที่มีอยู่เพื่อใช้ทำนายผลและตัดสินใจ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นหากจำนวนข้อมูลที่มีอยู่มากเพียงพอ โดยโมเดลแบ่งเป็น 3 ประเภทได้แก่ Supervised learning, Unsupervised learning และ Reinforcement learning

3.1.3 YOLO เป็นอัลกอริทึมที่ใช้หลักการโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันสามารถทำการสกัดคุณลักษณะพิเศษของรูปภาพ และการจำแนกประเภทของวัตถุ การประมวลผลภาพด้วย YOLO นั้นง่ายและตรงไปตรงมา (Redmon *et al.*, 2016) แนวคิดหลักคือการแบ่งภาพอินพุตออกเป็นตารางขนาด $S \times S$ และทำการตรวจจับในแต่ละเซลล์กริดเพื่อทำนายกล่องขอบเขต (Boundary box) ล้อมรอบวัตถุและแสดงค่าความเชื่อมั่น (Confidence score) ของกล่องขอบเขตนี้ ซึ่งสามารถสะท้อนได้ว่ามีวัตถุในคลาสนั้นๆ อยู่ในเซลล์กริดนี้หรือไม่ จากความน่าจะเป็นของวัตถุที่ปรากฏบนพื้นที่นั้นๆ โดยคำนวณจากค่า Intersection over union (IoU) ของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ซ้อนทับกับพื้นที่รวม (ปราโมทย์ และคณะ, 2562) ปัจจุบัน YOLOv5 มีหลายรุ่นซึ่งแตกต่างกันไปตามขนาดพารามิเตอร์ โดยได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำการตรวจจับวัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งความเร็วและความแม่นยำ รวมทั้งไฟล์น้ำหนักที่มีขนาดเล็กสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ระบบฝังตัวได้ง่ายมากขึ้น

3.2 การวางแผนและขั้นตอนการดำเนินการวิจัย มีดังนี้

3.2.1 การออกแบบด้านโครงสร้างของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิล ในการออกแบบโครงสร้างเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างของ

เครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลจะใช้เป็นวัสดุประเภทเหล็กกล่องขนาด 1 x 1 นิ้ว ในการขึ้นโครงและใช้แผ่นอะลูมิเนียมในการปิดโครงเหล็ก การออกแบบโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การออกแบบโครงสร้างเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิล

การออกแบบโครงสร้างเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ ในส่วนโครงสร้างตรงกลางที่ใช้รับน้ำหนักสเต็มมอเตอร์ เซอร์โวมอเตอร์ และกล้องรับขยะ มีความกว้าง 37 เซนติเมตร ความยาว 41 เซนติเมตร ความสูง 65.5 เซนติเมตร บริเวณด้านข้างเป็นโครงสร้างสำหรับบรรจุถังขยะขนาด 6 ลิตร จำนวน 4 โครง

การออกแบบส่วนกล้องควบคุมจำนวน 2 กล้อง กล้องแรกมีความกว้าง 15 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร ความสูง 7 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยพัดลมระบายความร้อน L298N Motor drive module raspberry Pi 4 model B และเบรกเกอร์ และกล้องที่สองมีความกว้าง 16 เซนติเมตร ความยาว 21 เซนติเมตร ความสูง 10 เซนติเมตร ประกอบด้วย NodeMCU ESP-32 และต่อกับเซนเซอร์อัลตราโซนิกติดตั้งบนขอบถังขยะเพื่อวัดปริมาณขยะ โดยกล้องควบคุมทั้ง 2 กล้องจะติดไว้ที่ด้านข้างของโครงที่บรรจุถังขยะ

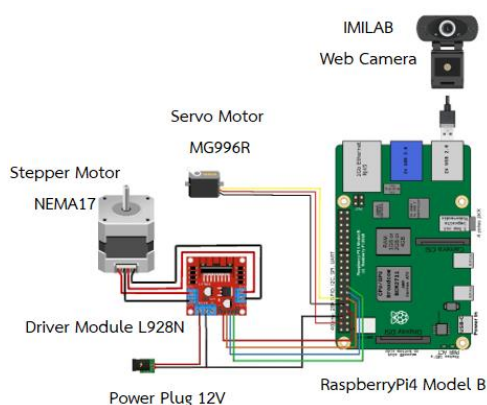
การออกแบบส่วนกล้องรับอินพุตขยะรีไซเคิลที่จะนำมาประมวลผล มีความกว้างขนาด 21 เซนติเมตร ความยาว 34 เซนติเมตร ความสูง 6 เซนติเมตร และติดตั้งกล้องในการรับภาพไปประมวลผลไว้ที่บริเวณด้านบนเหนือกล้องรับขยะ ความสูงของกล้องจากพื้น 106 เซนติเมตร

3.2.2 การออกแบบการทำงานของระบบ

เมื่อนำขยะรีไซเคิลวางบนกล้องอินพุตรับขยะ กล้อง IMILAB webcam จะทำการรับภาพเพื่อส่งไปทำการประมวลผลภาพยัง Raspberry Pi 4 model B ทำการแยกประเภทของขยะโดยการออกแบบวงจรระบบควบคุมแสดงดังภาพที่ 2 โปรแกรมจะทำการสร้างกรอบบริเวณที่ตรวจพบวัตถุ ติดป้ายชื่อคลาส และค่าแสดง Confidence score สเต็มมอเตอร์ก็จะหมุนไปยังถังขยะตาม

ประเภทที่ตรวจพบ ได้แก่ คลาส Cans คือกระป๋อง คลาส Glass bottle คือ ขวดแก้ว คลาส Paper Box คือกล่องกระดาษ และคลาส Plastic bottle คือ ขวดพลาสติก โดยสตีปมอเตอร์ทำการหมุน 0, 90, 180 และ -90 องศา ตามลำดับ เมื่อสตีปมอเตอร์หมุนไปถึงถึงขยะแต่ละชนิด เซอร์โวมอเตอร์จะถูกสั่งงานให้เอียงกล่องลงเพื่อเทขยะลงในถังขยะแต่ละประเภท แล้วกลับมายังตำแหน่งเดิมก่อนเท หลังจากนั้นสตีปมอเตอร์จะหมุนกลับมายังจุดตำแหน่งเริ่มต้นที่จุด 0 องศา เพื่อทำงานรอบต่อไป

ในส่วนการแจ้งเตือนเมื่อถึงขยะใกล้เต็มโดยการติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกไว้บริเวณด้านบนของถังขยะเพื่อวัดระยะความสูงของปริมาณขยะ และทำการแจ้งเตือนเมื่อมีปริมาณขยะมีความสูงห่างจากขอบบนของถังขยะที่ระยะ 10 เซนติเมตร ระบบจะส่งข้อความแจ้งเตือนผ่าน Line Notify ไปยังกลุ่มแอปพลิเคชันไลน์ของผู้ใช้งาน



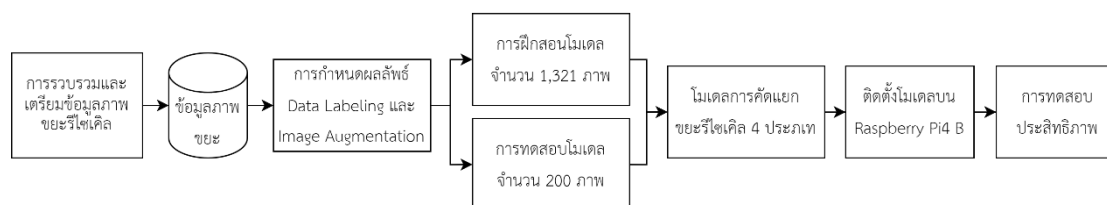
ภาพที่ 2 การออกแบบวงจรระบบควบคุมเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิล

3.2.3 การสร้างโมเดลของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ

ในการสร้างโมเดลสำหรับประมวลผลคัดแยกประเภทของขยะรีไซเคิลด้วยอัลกอริทึม YOLOv5x ซึ่งเป็นโมเดลขนาดใหญ่ที่สุดและมีความแม่นยำเฉลี่ย (mAP) 50.7 สูงที่สุดในรุ่นของ YOLOv5 เปรียบเทียบจากการฝึกสอนแบบ Multi-GPU ด้วยชุดข้อมูลภาพ COCO สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าและเหมาะสมต่อการใช้งานบนคลาวด์ (Glenn, 2020) กระบวนการสร้างโมเดลดังภาพที่ 3

ขั้นตอนที่ 1 การรวบรวมชุดข้อมูลและจัดเตรียมข้อมูล (Data gathering and collecting) การดึงข้อมูลของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิล จะมีการดึงข้อมูลจาก Google images โดยใช้การค้นหาภาพขยะรีไซเคิลแต่ละประเภทที่ต้องการนำมาฝึกสอน ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการขยะรีไซเคิลประเภทกระป๋อง สามารถค้นหาคำว่า “กระป๋อง” “กล่องกระดาษ” “ขวดพลาสติก” หรือ “ขวดแก้ว” แล้วบันทึกที่ละรูปไว้ในโฟลเดอร์ของขยะรีไซเคิลแต่ละประเภท การเตรียมข้อมูลโดยชุด

ข้อมูลภาพที่ได้นำมาฝึกสอนทั้งหมด 4 ประเภท คือ กระป๋อง ขวดแก้ว กล่องกระดาษ ขวดพลาสติก รวมรูปภาพทั้งหมด 1,321 ภาพ ตัวอย่างภาพแสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 3 กระบวนการสร้างโมเดลของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างข้อมูลภาพที่นำมาฝึกสอน

ลำดับที่	ประเภทขยะ	ชื่อคลาส	ตัวอย่างภาพ
1	กระป๋อง	Cans	
2	ขวดแก้ว	Glass bottle	
3	กล่องกระดาษ	Paper box	
4	ขวดพลาสติก	Plastic bottle	

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดผลลัพธ์ (Data labeling) และการทำ Image augmentation ด้วยโปรแกรม Roboflow เมื่อทำการบันทึกภาพที่ต้องการนำมาฝึกสอนจาก Google images ลงในโฟลเดอร์ครบแล้ว จากนั้นจะทำการอัปโหลดไฟล์มาใน Roboflow เพื่อทำการติกรอบและติดป้ายชื่อให้กับภาพที่อัปโหลด จากนั้นทำการ Generating version จำนวน 4 Version จะได้ Image และ Label เพื่อจัดเตรียมไปใช้ในการฝึกสอน YOLOv5 ทำการ Export ไฟล์ที่ทำการ Generating ทั้ง 4 Version เลือก Format เป็น YOLOv5 PyTorch และคลิกเลือก Download zip to computer

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างโมเดลและวัดผล (Modeling) การสร้างโมเดลจำแนกภาพขยะรีไซเคิล ขั้นตอนนี้เป็น การนำข้อมูลที่จัดเตรียมไว้มาทำการประมวลผลเพื่อฝึกสอน (Train data) และสร้างโมเดลเพื่อรู้จำและจำแนกภาพขยะรีไซเคิลจำนวน 4 ประเภท โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน เพื่อนำภาพไปประยุกต์ใช้ผ่านคอมพิวเตอร์แล็ปท็อป ASUS Vivo book14 Ryzen5 4500U RAM8 SSD512 ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับฝึกสอนและสร้างโมเดล

ได้แก่ ไบรารี Open CV และภาษาไพทอน ทำการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลภาพทั้งหมด 1,321 ภาพ 250 รอบ กำหนด 4 คลาสได้แก่ Cans, Glass bottle, Paper box และ Plastic bottle ตามลำดับ และแสดงผลลัพธ์จากการฝึกสอนโมเดลทั้ง 4 คลาสพร้อมกันคือ ความแม่นยำเฉลี่ย (mAP50% all classes) ของทุกคลาส 0.995, ค่าความครบถ้วน (Recall) 0.995, ความแม่นยำ (Precision) 0.999 และค่าประสิทธิภาพโดยรวม (F-measure) 0.997 แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่า mAP, Recall, Precision และ F-measure ของโมเดล

หมายเลข คลาส	ชื่อคลาส	จำนวนภาพที่ ใช้ฝึกสอน	mAP 50%	mAP 50:95%	Recall	Precision	F-measure
0	Cans	375	0.995	0.956	0.995	0.999	0.997
1	Glass bottle	425	0.995	0.914	0.995	0.999	0.997
2	Paper box	251	0.995	0.927	0.995	0.999	0.997
3	Plastic bottle	270	0.995	0.918	0.995	0.999	0.997

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบโมเดลเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพเมื่อทำการฝึกสอนโมเดลเสร็จแล้วนำภาพขยะรีไซเคิลมาทำการทดสอบซึ่งเป็นภาพชุดข้อมูลเดียวกับภาพที่นำมาฝึกสอนที่เตรียมไว้ทั้งหมด 200 ภาพ แบ่งเป็นประเภทคลาสละ 50 ภาพ มีสัดส่วนของจำนวนภาพระหว่าง Train : Test คือ 86.85 : 13.15 ผลลัพธ์ที่ได้โปรแกรมจะแสดงป้ายชื่อคลาสตามประเภทของขยะ และค่าความเชื่อมั่น (Confidence score) บนภาพเอาต์พุตดังภาพที่ 4 จากการทดสอบโมเดลด้วยภาพ 200 ภาพ จำนวนความถูกต้องแยกตามประเภทแสดงดังตารางที่ 3 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการคัดแยกของคลาส Cans 96%, Glass bottle 98%, Paper box 100%, Plastic bottle 100% ตามลำดับ



ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลการคัดแยกภาพจากโมเดลที่ฝึกสอน

ตารางที่ 3 ตารางค่าการทดสอบการคัดแยกขยะรีไซเคิล

ประเภท	ชื่อคลาส	จำนวนภาพ ที่ทดสอบ	จำนวนภาพ ที่คัดแยก สำเร็จ	จำนวนภาพ ที่คัดแยกไม่ สำเร็จ	ความถูกต้อง (%)
กระป๋อง	Cans	50	48	2	96%
ขวดแก้ว	Glass bottle	50	49	1	98%
กล่องกระดาษ	Paper box	50	50	0	100%
ขวดพลาสติก	Plastic bottle	50	50	0	100%

4. ผลการวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ โดยการทดลองใช้งานบริเวณอาคารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 18/1 สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ โดยแบ่งเป็นการทดสอบ 3 ส่วนดังนี้

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพการคัดแยกขยะของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ โดยนำขยะรีไซเคิลในบริเวณอาคารเรียนมาทดสอบครั้งละ 1 ชิ้น จำนวน 60 ครั้ง พบว่าระบบสามารถคัดแยกขยะได้ถูกต้องจำนวน 59 ชิ้นจากขยะทั้งสิ้น 60 ชิ้น ค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 98.33% และมีค่าช่วงความเชื่อมั่น (Confidence interval) อยู่ระหว่าง 0.50 – 0.97 ซึ่งขยะประเภทกระป๋องมีค่าความเชื่อมั่นมากที่สุดอยู่ที่ 0.97 และขยะประเภทขวดแก้วมีค่าความเชื่อมั่นน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.50 คะแนนความเชื่อมั่น (Confidence score) เป็นมาตรฐานในการประเมินผลแสดงความน่าจะเป็นของภาพที่ตรวจพบว่าในขอบเขตนั้นมีวัตถุอยู่และความแม่นยำของการทำนายว่าเป็นวัตถุนั้นๆ ตัวอย่างผลการคัดแยกแสดงดังภาพที่ 5



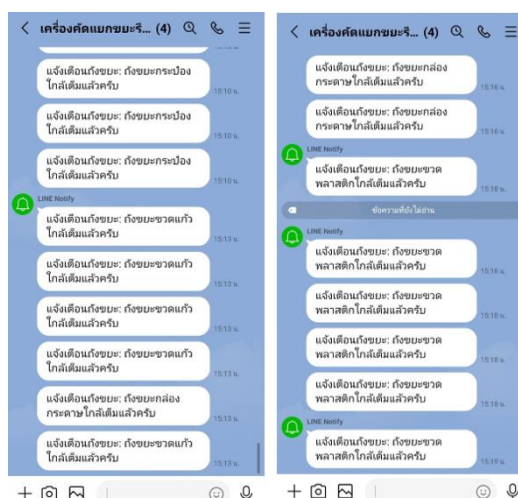
ภาพที่ 5 การทดสอบการคัดแยกขยะของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลทั้ง 4 ประเภท

4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของสแตมป์มอเตอร์และเซอร์โว โดยการให้ผู้ใช้งานนำขยะรีไซเคิลไปวางบนถาดรับเพื่อทดสอบความถูกต้องของตำแหน่งการหมุนของสแตมป์มอเตอร์และการเทของเซอร์โวมอเตอร์แสดงดังภาพที่ 6 ผลการทดสอบการหมุนจากจุดเริ่มต้นเมื่อเครื่องทำงานของสแตมป์มอเตอร์โดยคลาส Cans หมุน 0 องศา, คลาส Glass bottle หมุน 90 องศา, คลาส Paper box หมุน 180 องศาและ คลาส Plastic bottle หมุน -90 องศา และผลการทดสอบการเทขยะลงถังทั้งหมด 20 ครั้ง มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องทั้งหมดคิดเป็น 100%



ภาพที่ 6 การทดสอบการหมุนของของสแตมป์มอเตอร์และการเทของเซอร์โวมอเตอร์

4.3 ผลการทดสอบการแจ้งเตือนของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิล โดยการติดตั้งเซนเซอร์อัลตราโซนิกตรวจจับความสูงของปริมาณขยะในถังที่ระยะ 10 เซนติเมตรจากขอบถังขยะด้านบน ให้ทำการส่งข้อความแจ้งเตือนเมื่อถึงขยะใกล้เต็มถึงไปยังกลุ่มการแจ้งเตือนในแอปพลิเคชันไลน์ของผู้ใช้งาน ดังภาพที่ 7 ทำการทดสอบทั้งหมด 12 ครั้ง ค่าเฉลี่ยความถูกต้องของระบบแจ้งเตือนเมื่อถึงขยะใกล้เต็มคิดเป็น 100%



ภาพที่ 7 การส่งข้อความแจ้งเตือนเมื่อถึงขยะใกล้เต็มไปยังแอปพลิเคชันไลน์ของผู้ใช้งาน

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ โดยสามารถรับอินพุตภาพจากกล้อง IMILAB camera เพื่อทำการประมวลผลภาพได้แบบเรียลไทม์โดยใช้เทคนิคการคัดแยกภาพด้วยอัลกอริทึม YOLOv5x ในการฝึกสอนโมเดลด้วยชุดข้อมูลภาพ 1,321 ภาพ 250 รอบ มีค่า mAP50% 0.995, Recall 0.995, Precision 0.999 และค่า F-measure 0.997 ซึ่งมีความรวดเร็วในการวิเคราะห์ข้อมูลและมีส่วนฮาร์ดแวร์ควบคุมการคัดแยกขยะแต่ละประเภทแบบอัตโนมัติให้พร้อมต่อการนำไปรีไซเคิล ระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องทุกฟังก์ชัน ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 98.33% สามารถคัดแยกขยะรีไซเคิลได้ 4 ประเภทตามโมเดลที่ฝึกสอน สเต็ปมอเตอร์และเซอร์โวให้สามารถหมุนและเทขยะลงยังถังขยะแต่ละประเภทได้อย่างถูกต้อง และแจ้งเตือนเมื่อถังขยะใกล้เต็มผ่านแอปพลิเคชันไลน์ได้ ซึ่งช่วยลดเวลาในการคัดแยกขยะด้วยมือ สามารถนำขยะกลับไปทำการรีไซเคิลได้ทันที ช่วยให้มีการคัดแยกขยะอย่างเป็นระบบ

5.2 การอภิปรายผล

เครื่องคัดแยกขยะนี้เป็นการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่องจักรร่วมกับอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ จากการทดสอบพบว่ายังมีผลการคัดแยกขยะไม่ถูกต้อง อาจเนื่องมาจากขดพลาสติกที่ทดสอบมีลักษณะสีขาวขุ่นซึ่งมีการสะท้อนของแสง ทำให้ระบบแสดงผลการคัดแยกเป็นประเภทขวดแก้ว การทดสอบทำในสภาวะแวดล้อมแบบเปิดซึ่งมีแสงสว่างที่มากหรืออาจน้อยเกินไปส่งผลกระทบต่อการตรวจจับและคัดแยกวัตถุได้ในบางครั้ง เมื่อมีวัตถุอื่นๆเข้ามาทดสอบระบบสามารถคัดแยกได้ในบางครั้งเท่านั้น หากวัตถุไม่ถูกตรวจพบว่ามีอยู่ใน 4 คลาสของโมเดลนี้ระบบจะไม่สามารถแสดงกรอบเพื่อทำนายส่วนของวัตถุและค่า Confidence score บนภาพได้ ซึ่งแนวทางการพัฒนาปรับปรุงคือเพิ่มส่วนควบคุมแสงในส่วนอินพุตและกล้องให้เหมาะสม จะช่วยให้การทำงานของเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลนี้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ช่วยลดภาระงานในการคัดแยกขยะโดยนำขยะที่เครื่องคัดแยกได้โดยอัตโนมัติไปทำการรีไซเคิลเพื่อลดปริมาณการเผาหรือทำลายขยะ และสามารถช่วยแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ในการเอื้อเฟื้อสถานที่และห้องปฏิบัติการในดำเนินงาน และคณาจารย์ในสาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ที่กรุณาให้คำปรึกษาข้อเสนอแนะต่างๆและแนวทางการแก้ไขปัญหาให้งานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- คนสรณ์ ผิวบาง, ศรีณยู พรหมยุทธนา, และการตรัณน์ ข้าดำ. (2562). **เครื่องคัดแยกขวดอัตโนมัติ**.
ค้นจาก http://mecha.sut.ac.th/project_file/project_00030.pdf
- ณัฐนันท์ รัตนยานนท์ และศุภวิชญ์ ฝอยทอง. (2563). ระบบตรวจจับและคัดแยกกล่องด้วยการ
ประมวลผลภาพ. **วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม**, 1(4), 20-23.
- ดำรงศักดิ์ กิจเดช และวีระพันธ์ ด้วงทองสุข. (2565). การใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน
ภาษากายของคนที่สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อ. **วารสาร SAU JOURNAL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY**, 8(1), 28-39.
- ปัญญา ประสีละเตสัง. (2564). **สร้างการเรียนรู้สำหรับ AI ด้วย Python Machine Learning**.
กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- บุญธรรม ภัทราจารกุล. (2556). **การประมวลผลภาพดิจิทัลเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- ปราโมทย์ ปัญญาโต และนลิน สีดาห้าว. (2562). การสร้างระบบตรวจจับบุคคลแบบเวลาจริงราคา
ประหยัดบน Raspberry Pi โดยประยุกต์อัลกอริทึม Tiny YOLO V3. **วารสาร ENGINEERING
TRANSACTIONS**, 22(2), 72-78.
- สมเกียรติ อุดมहरราชกุล. (2554). **การประมวลผลภาพดิจิทัลเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: ท้อป.
- ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. (2564). **สถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อมของประเทศ
ไทยปี 2563**. ค้นจาก https://www.pcd.go.th/pcd_news/11873
- Jocher, G. (2020). **YOLOv5 Documentation**. Retrieved from [https://docs.
ultralytics.com/tutorials/training-tips-best-results/#model-selection](https://docs.ultralytics.com/tutorials/training-tips-best-results/#model-selection)
- Redmon, J, Divvala, R., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016, June). **You Only Look Once:
Unified, Real-Time Object Detection**. Paper presented at the 2016 IEEE
Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV,
USA.