

การพัฒนาระบบตรวจจับและนับโลหะในท่อส่งวัตถุดิบอาหารสัตว์แบบแนวตั้ง
กรณีศึกษา: ท่อส่งเมล็ดข้าวโพด

A Development of a Metal Detection and Counting System in Vertical Raw
Material Pipelines
Case Study: Corn Seed Pipeline

บุญธง วสุรีย์¹ และ ปิยะมาศ ไชนน็อก^{2*}
Boonthong Wasuri¹ & Piyamas Chainok^{2*}

¹สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²สาขาวิชาสหวิทยาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

¹Industrial Art Department, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University.

²Interdisciplinary Studies Department, Faculty of Science and Technology,
Pathumwan Institute of Technology.

Submitted 12/10/2022 ; Revised 27/11/2022 ; Accepted 24/12/2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงประยุกต์ กรณีศึกษา การแก้ปัญหาและพัฒนาระบบตรวจจับ และนับโลหะ สำหรับใช้ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์บนสายการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์ของบริษัท วังมะนาวเกษตรภัณฑ์ จำกัด จังหวัดราชบุรี โดยพัฒนาให้สามารถตรวจจับโลหะ นับจำนวนโลหะเข้าออก แสดงจำนวนโลหะในระบบ ควบคุมผ่านส่วนต่อประสานคนกับเครื่อง (Human Machine Interface) บจอสัมผัส และตัวควบคุมตรรกะแบบโปรแกรมได้ (Programmable Logic Control: PLC) เพื่อให้สามารถควบคุมร่วมกับระบบเดิมของโรงงาน ผลการทดลองใช้ระบบตรวจจับโลหะในท่อส่งวัตถุดิบอาหารสัตว์ พบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนับโลหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 1.65, 2.90, 4.10, 7.20, 7.95, 10.00 และ 12.90 มิลลิเมตร ได้แม่นยำคิดเป็น 100% และพบว่า ประสิทธิภาพด้านอัตราในการไหลของวัตถุดิบ มีค่า 66.22 % ประสิทธิภาพด้านการผลิตต่อวัน มีค่า 50% และมีประสิทธิภาพในการตรวจจับโลหะ 100% โดยมีประสิทธิภาพโดยรวม คือ 58.11% ซึ่งระบบตรวจจับและนับโลหะที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ใช้กระบวนการตรวจจับโลหะได้

คำสำคัญ: ระบบตรวจจับและนับโลหะ พีแอลซี ท่อส่งวัตถุดิบอาหารสัตว์

*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: bpiyamas@gmail.com

Abstract

This research is applied research, reported the case study of problem solving and development of metal detection and counting system for product quality control in the company's feed raw material production line of Wang Manao Kasetphan Co. Ltd. in Ratchaburi Province. The system was capable of detecting metal, counted the amount of metal entering and leaving the production lines, and displayed the amount of metal in the control system via touch screen HMI (human machine interface) and PLC (programmable logic control). It could be controlled together with the original factory system. The experimental results of using the metal detection system in the raw material lines showed that the developed system can count metals with diameter of 1.65, 2.90, 4.10, 7.20, 7.95, 10.00, and 12.90 mm with 100% accuracy. The efficiency of raw material flow was 66.22%, the daily production efficiency was 50%, and the metal detection efficiency was 100%. The overall efficiency was 58.11%. Therefore, this metal detection and counting system developed in this study could also be used in other industries for metal detection.

Keywords: metal detection system, PLC, feed raw material pipeline

บทนำ

วัตถุดิบสำหรับการแปรรูปอาหารมีโอกาสปนเปื้อนสิ่งสกปรกและสิ่งแปลกปลอมได้มาก เนื่องจากแหล่งผลิตวัตถุดิบ [1] พื้นที่ที่จัดเก็บวัตถุดิบซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นที่กว้างและเปิดโล่ง วัตถุดิบบางชนิดอาจได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น แหล่งน้ำธรรมชาติ ทะเล ป่าไม้ ภูเขา นอกจากนี้ขั้นตอนในการผลิตและการจัดหาวัตถุดิบเพื่อนำมาแปรรูปอาหารมีหลายขั้นตอน มีผู้ที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ตั้งแต่การเพาะปลูก การเพาะเลี้ยง การดูแลรักษา การเก็บเกี่ยว กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว การรับซื้อ การรวบรวม การขนส่ง จนถึงโรงงานแปรรูป ทำให้มีโอกาสปนเปื้อนได้ทุกขั้นตอน [2] สิ่งปนเปื้อนที่มากับวัตถุดิบอาจเป็นได้ทั้งการปนเปื้อนทางกายภาพ เช่น สิ่งแปลกปลอมเป็นชิ้นที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ได้แก่ ดิน หิน เศษพืช แก้ว เศษโลหะ แมลง การปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ และการปนเปื้อนทางเคมี ได้แก่ สารเคมีที่มีอยู่ในธรรมชาติ สารเคมีเพื่อกำจัดศัตรูพืช ปุ๋ย ฮอร์โมน ทำให้วัตถุดิบอยู่ในสภาพที่ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้แปรรูป และนำอันตรายมาสู่ผู้บริโภค งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการปนเปื้อนของชิ้นส่วนโลหะในกระบวนการผลิต เนื่องจากชิ้นส่วนโลหะแปลกปลอมเหล่านั้นอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่เครื่องจักรหรือส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพ และถูกส่งกลับคืน ทำให้เกิดความเสียหายในด้านต้นทุนการผลิต [3]

ในปัจจุบันมีการใช้เครื่องตรวจจับโลหะในการตรวจหาสิ่งแปลกปลอมประเภทโลหะในสินค้าและวัตถุดิบ กระบวนการตรวจสอบนี้ยังมีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการควบคุมอันตราย ณ จุดควบคุมวิกฤต (critical control point: CCP) ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ระบบการวิเคราะห์อันตรายและจุดวิกฤตที่ต้องควบคุมในการผลิตอาหาร (hazard analysis critical control point: HACCP) การตรวจจับชิ้นส่วนโลหะแปลกปลอมในอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท โดยส่วนใหญ่การตรวจจับโลหะใช้หลักการการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากขดลวดตรวจจับโลหะ เมื่อชิ้นส่วนโลหะเข้ามาใกล้ขดลวดโลหะจะทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กของขดลวดทำให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไป แล้วนำผลการเปลี่ยนแปลงมาประมวลผลการตรวจจับโลหะ [4] ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตตามข้อกำหนดด้านพื้นที่การใช้งานและลักษณะการติดตั้งระบบตรวจจับโลหะ

จากการลงสำรวจพื้นที่ของ บริษัทวังมะนาวเกษตรภัณฑ์ จำกัด จังหวัดราชบุรี พบว่าบริษัทฯ มีปัญหาด้านการตรวจสอบสิ่งปนเปื้อนในวัตถุดิบจำพวกเมล็ดข้าวโพดที่จะจัดจำหน่ายให้กับบริษัทผลิตอาหารสัตว์ ซึ่งถ้าบริษัทลูกค้าสุ่มตรวจแล้วพบสิ่งปนเปื้อน บริษัทลูกค้าจะส่งสินค้ากลับคืนบริษัทฯ ทั้งหมด ซึ่งจะทำให้บริษัทฯ เสียหายอย่างมาก ดังนั้นบริษัทฯ จึงต้องการพัฒนาระบบหรือเครื่องตรวจจับสิ่งปลอมปนในวัตถุดิบเพื่อแก้ไขปัญหาในเรื่องการตรวจสอบสิ่งปนเปื้อนในวัตถุดิบก่อนการจัดจำหน่าย

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงนำเสนอการวิจัยและพัฒนาระบบตรวจจับและนับโลหะในกระบวนการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์ กรณีศึกษา สายการผลิตเมล็ดข้าวโพดปน บริษัทวังมะนาวเกษตรภัณฑ์ จำกัด จังหวัดราชบุรี โดยประยุกต์ใช้เทคนิคทางด้านไฟฟ้าในการสร้างควมถี่ [5] และพัฒนางจรประมวลผลภายในใช้พลังงานต่ำสามารถใช้งานกับแหล่งจ่ายพลังงานขนาดเล็กได้ [6] มีความเสถียรในการใช้งาน โดยนำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาการตรวจสอบสิ่งปนเปื้อนในวัตถุดิบจำพวกเมล็ดข้าวโพด ในขั้นตอนตั้งต้นของการผลิตก่อนที่จะจัดจำหน่ายให้กับบริษัทผลิตอาหารสัตว์ได้อย่างมีคุณภาพตามมาตรฐานของการส่งออกของวัตถุดิบเชิงพาณิชย์

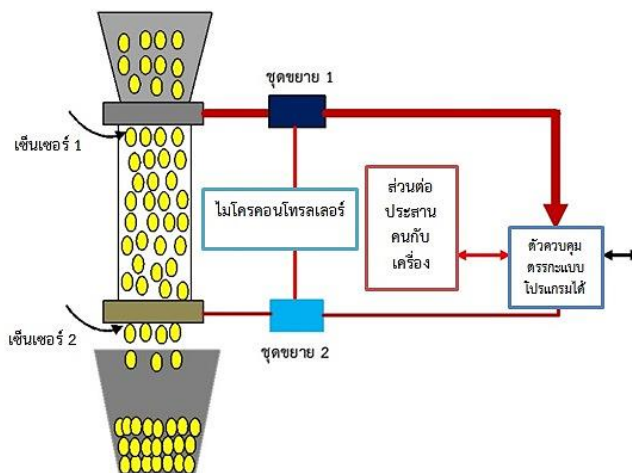
วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาระบบตรวจจับและนับโลหะสำหรับใช้ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์บนสายการผลิต
2. เพื่อประยุกต์ใช้ระบบตรวจจับและนับโลหะสำหรับใช้ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์บนสายการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์

วิธีการดำเนินวิจัย

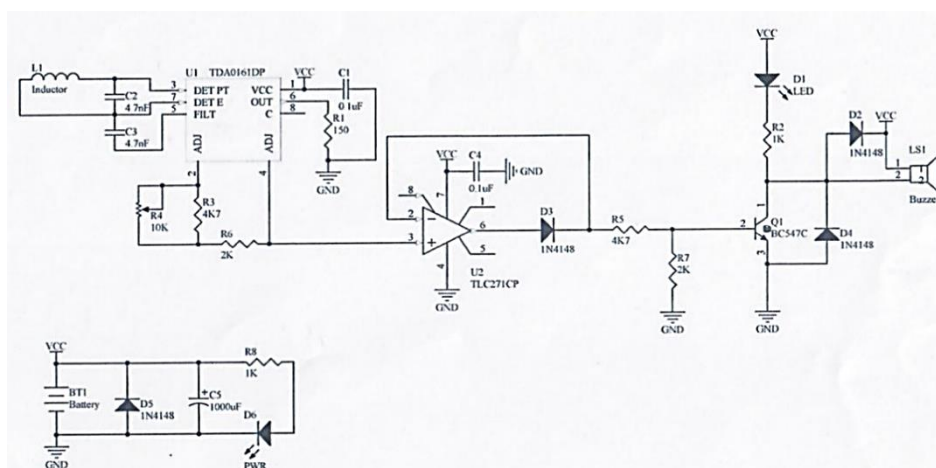
การออกแบบระบบตรวจวัดโลหะ

คณะผู้วิจัยได้ออกแบบระบบตรวจวัดโลหะเพื่อให้สามารถตรวจจับโลหะ นับจำนวนโลหะที่เข้าและออกระบบ แสดงจำนวนโลหะในระบบควบคุมผ่านส่วนต่อประสานคนกับเครื่องแบบจอสัมผัส (HMI) และตัวควบคุมตรรกะแบบโปรแกรมได้ (PLC) [7] เพื่อให้สามารถควบคุมร่วมกับระบบเดิมของโรงงานได้ โดยมีรายละเอียดผังการทำงานประกอบแบบ ดังภาพที่ 1

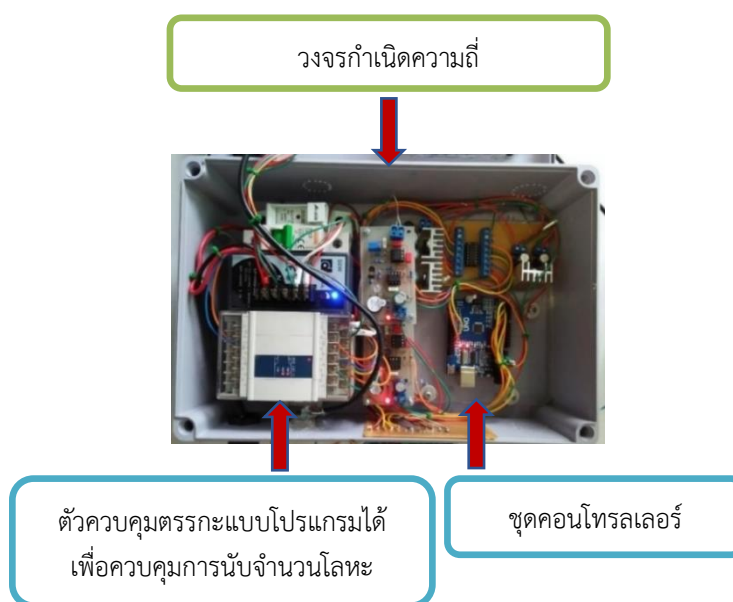


ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของต้นแบบระบบตรวจจับและนับโลหะ

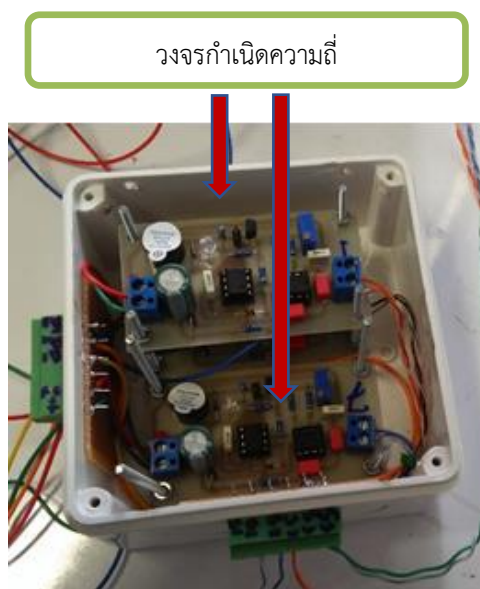
หลักการทำงานของชุดตรวจจับโลหะประกอบด้วยเซ็นเซอร์ 2 ตัว คือ เซ็นเซอร์ 1 และ เซ็นเซอร์ 2 ที่ทำงานโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ภายในเซ็นเซอร์จะมีขดลวดที่ทำหน้าที่ปล่อยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ขดลวดจะได้รับสัญญาณไฟฟ้าจากวงจรกำเนิดความถี่ในภาพที่ 2 เพื่อตรวจจับโลหะที่เคลื่อนที่ผ่านเข้ามา เมื่อโลหะอยู่ในระยะที่เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับได้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดการหน่วง และวงจรขยายจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อไปยังชุดคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล และส่งสัญญาณให้ตัวควบคุมตรรกะแบบโปรแกรมได้ เพื่อตรวจนับต่อไป รายละเอียดของชุดตรวจจับโลหะ แสดงดังภาพที่ 3 และ 4



ภาพที่ 2 วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่

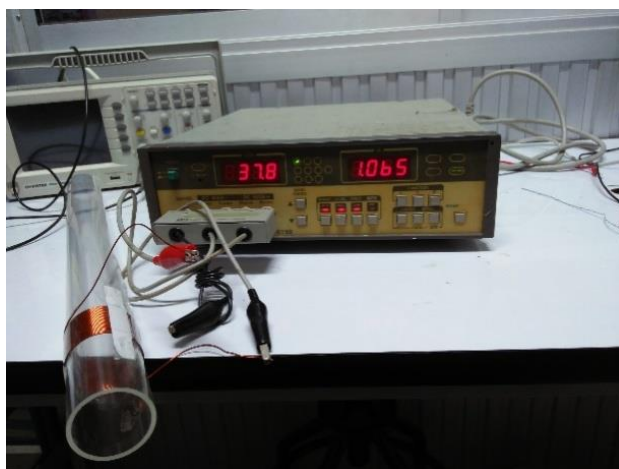


ภาพที่ 3 ชุดตรวจจับโลหะชุดที่ 1



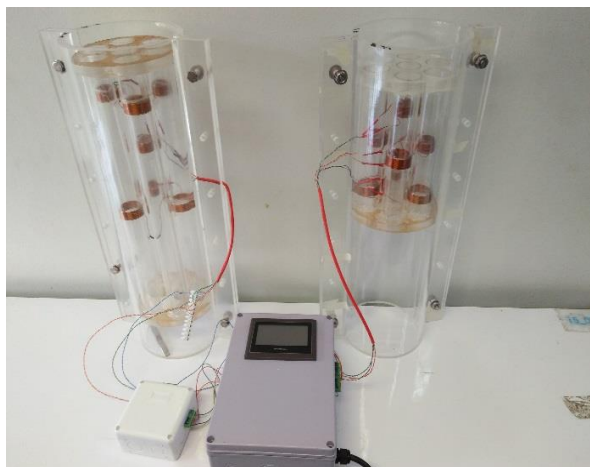
ภาพที่ 4 ชุดตรวจจذبโลหะชุดที่ 2

ผู้วิจัยได้พัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจذبโลหะ โดยเลือกขนาดของขดลวดที่จะทำเป็นตัวเซ็นเซอร์ และทดสอบค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ดังภาพที่ 5



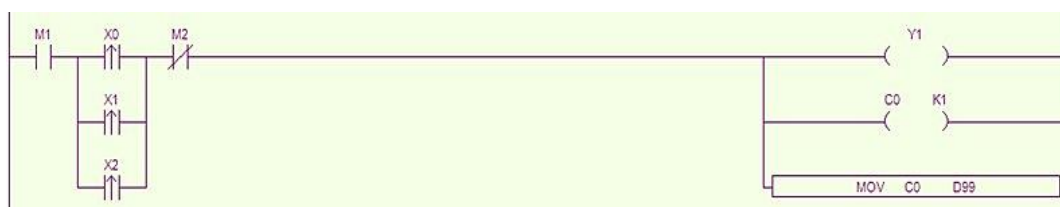
ภาพที่ 5 การทดสอบเซ็นเซอร์จذبโลหะ

ผู้วิจัยได้นำชุดตรวจจذبโลหะทั้ง 2 ชุด เชื่อมต่อกับตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจذبโลหะที่ทำจากขดลวด และนำไปประกอบเข้ากับวงจรควบคุมการทำงาน ดังภาพที่ 6

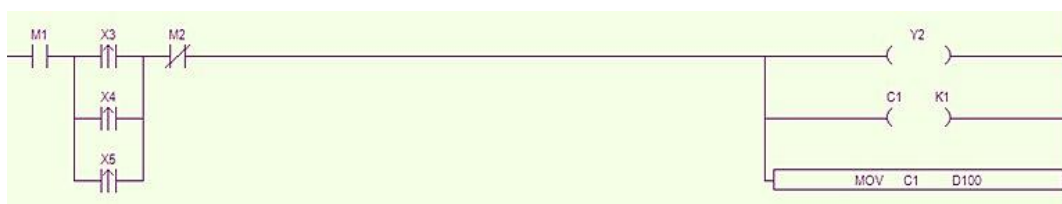


ภาพที่ 6 การประกอบชุดตรวจจับโลหะ อุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับโลหะกับวงจรควบคุมชุดตรวจจับโลหะ

เนื่องจากบริษัทฯ ได้พัฒนาการควบคุมการผลิตเป็นระบบอุตสาหกรรมที่ใช้คอมพิวเตอร์และตัวควบคุมตรรกะแบบโปรแกรมได้เป็นหลัก ดังนั้น เพื่อให้ข้อมูลจากการตรวจจับและนับโลหะสามารถเชื่อมต่อกับโรงงานได้ ระบบที่พัฒนาขึ้นต้องสามารถเชื่อมต่อกับระบบของโรงงานตามมาตรฐานของอุปกรณ์ในโรงงาน เพื่อให้สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลและส่งข้อมูลให้กับหน่วยควบคุมกลางของโรงงานได้ตามมาตรฐานระดับโรงงาน ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมตัวควบคุมตรรกะแบบโปรแกรมได้เพื่อตรวจนับโลหะ โดยตัวควบคุมตรรกะแบบโปรแกรมได้จะรับสัญญาณไฟฟ้ามาจากคอนโทรลเลอร์ และนับโลหะที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้ รายละเอียดดังภาพที่ 7 และ 8



ภาพที่ 7 โปรแกรมตัวควบคุมตรรกะแบบโปรแกรมได้ นับโลหะตัวที่ 1



ภาพที่ 8 โปรแกรมตัวควบคุมตรรกะแบบโปรแกรมได้ นับโลหะตัวที่ 2

การติดตั้งระบบตรวจจับและนับโลหะกับระบบของบริษัท

ผู้วิจัยได้ติดตั้งระบบตรวจจับและนับโลหะสำหรับใช้ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์บนสายการผลิตในภาคสนาม ดังภาพที่ 9 โดยติดตั้งระบบตรวจจับและนับโลหะสำหรับใช้ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์บนสายการผลิตในพื้นที่ส่วนที่ใช้ในการทดสอบของบริษัทฯ และเดินระบบไฟฟ้าของวงจรตรวจจับและนับโลหะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของบริษัทฯ จากนั้นนำตัวอุปกรณ์ตรวจจับโลหะไปติดตั้งเชื่อมต่อกับตัวไซโลของบริษัทฯ เมื่อประกอบระบบเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยดำเนินการทดสอบโดยนำตัวอย่างเมล็ดข้าวโพดจากบริษัทฯ จำนวน 5 กิโลกรัม มาผสมกับโลหะขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 1.65, 2.90, 4.10, 10.00, 7.20, 7.95 และ 12.90 มิลลิเมตร ขนาดละ 20 ชิ้น ซึ่งโลหะขนาดอื่น ๆ นอกเหนือจากนี้นั้นไม่พบในสายพานการผลิตของบริษัทฯ ทำการทดสอบทั้งหมด 20 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ใส่โลหะจำนวน 1 ชิ้น และในครั้งต่อไปจะเพิ่มจำนวนโลหะครั้งละ 1 ชิ้น จนครบ 20 ชิ้น (ทดสอบ 20 ครั้ง) โดยเทเมล็ดข้าวโพดที่มีโลหะผสมลงตามแนวดิ่ง ซึ่งได้ออกแบบไว้ตามพื้นที่ติดตั้งจริงของบริษัทฯ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับโดยรวม



ภาพที่ 9 การติดตั้งระบบตรวจวัดโลหะกับไซโลของบริษัท

ผลการวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดโลหะ

ผู้วิจัยได้ทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและนับโลหะ โดยใส่โลหะขนาดต่าง ๆ ผสมลงในเมล็ดข้าวโพด ผลการทดสอบพบว่า เซ็นเซอร์ตรวจจับสามารถตรวจจับโลหะที่ปนมากับเมล็ดข้าวโพดได้อย่างแม่นยำ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดโลหะ

ขนาดโลหะ (mm)	จำนวนโลหะที่ทดสอบ (ครั้ง)	จำนวนโลหะที่นับและตรวจจับได้ (ชิ้น)	ค่าความผิดพลาด (%)
1.65	20	20	0
2.90	20	20	0
4.10	20	20	0
7.20	20	20	0
7.95	20	20	0
10.00	20	20	0
12.90	20	20	0

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและนับโลหะในภาคสนาม โดยใช้เมล็ดข้าวโพดจำนวน 700 กิโลกรัม พร้อมกับโลหะจำนวน 8 ชิ้น พบว่าระบบตรวจจับและนับโลหะสามารถจับโลหะแปลกปลอมได้ทั้ง 8 ชิ้น การทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและนับโลหะบนสายการผลิตจริง ได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและนับโลหะบนสายการผลิต

การประเมิน	ระบบเดิม	ระบบตรวจจับ	ค่าความแตกต่าง	ประสิทธิภาพ (%)
อัตราในการไหลของวัตถุดิบ (นาที)	10.30	30.50	20.20	66.22
ปริมาณวัตถุดิบต่อวัน (กิโลกรัม)	7,000	3,500	3,500	50
ปริมาณสิ่งปลอมปนในวัตถุดิบ (ชิ้น)	-	8	8.0	100

จากตารางที่ 2 พบว่า ระบบตรวจจับที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพด้านอัตราการไหลของวัตถุดิบดีขึ้นกว่าระบบเดิม คิดเป็น 66.22% ส่วนประสิทธิภาพด้านปริมาณวัตถุดิบต่อวันนั้น ระบบตรวจจับที่พัฒนาขึ้นทำงานได้ช้าลง 50% เนื่องจากท่อของระบบตรวจจับและนับโลหะมีความกว้างน้อยกว่าขนาดของท่อโซโล ทำให้ปริมาณเมล็ดข้าวโพดไหลผ่านได้น้อยลง และมีประสิทธิภาพในการตรวจจับโลหะคิดเป็น 100% เนื่องจากสามารถตรวจจับโลหะที่ปนมากับเมล็ดข้าวโพดได้ทุกชิ้น เมื่อเทียบกับระบบเดิมของบริษัทที่ไม่มีระบบตรวจจับโลหะโดยมีประสิทธิภาพโดยรวม คือ 58.11% ซึ่งบริษัทฯ มีความพอใจในประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดโลหะที่พัฒนาขึ้นในการวิจัยครั้งนี้

อภิปรายผลการวิจัย

เนื่องจากระบบงานเดิมของบริษัทวังมะนาวเกษตรภัณฑ์ ไม่มีการตรวจจับโลหะในกระบวนการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์ในขั้นตอนตั้งต้นของการผลิต ทำให้เกิดปัญหาและสร้างความเสียหายทางการผลิตคิดเป็นมูลค่าสูง งานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบตรวจจับโลหะโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้ขดลวดทำหน้าที่ปล่อยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ผลการทดลองพบว่าขดลวดของระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับโลหะที่เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [5, 6] ที่ได้พัฒนาเครื่องตรวจจับ

โลหะชนิดมือถือ แต่เครื่องตรวจจับโลหะที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยก่อนหน้านี้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบสายพานการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์ได้ งานวิจัยนี้จึงนำระบบตรวจจับและนับโลหะที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบการทำงานของระบบ พบว่าระบบตรวจจับโลหะที่พัฒนาขึ้นช่วยให้ตรวจสอบสิ่งปลอมปนในผลิตวัตถุดิบได้ ส่งผลให้เกิดความปลอดภัยในอาหารสัตว์ และลดความเสียหายของเครื่องจักรในการผลิต และเมื่อนำระบบตรวจจับและนับโลหะไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์บนสายการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์แบบแนวตั้งของบริษัทวังมะนาวเกษตรภัณฑ์ทำให้ปัญหาโลหะแปลกปลอมในวัตถุดิบอาหารสัตว์ของบริษัทฯ หายไป เนื่องจากระบบตรวจจับและนับโลหะที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับโลหะแปลกปลอมได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตเครื่องตรวจจับโลหะและนับโลหะในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีอยู่ในประเทศเป็นหลัก จึงทำให้มีราคาถูกกว่าการนำเข้าและติดตั้งเครื่องตรวจจับโลหะจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงถึง 160,000 บาท ทำให้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริงในสายการผลิตของบริษัทได้ในอนาคต

สรุปผลการวิจัย

ระบบตรวจจับและนับโลหะในท่อส่งวัตถุดิบอาหารสัตว์แบบแนวตั้ง ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับและนับโลหะขนาดต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำคิดเป็น 100% ส่วนโลหะขนาดอื่น ๆ จะไม่พบในสายพานการผลิต และประสิทธิภาพด้านอัตราในการไหลของวัตถุดิบมีค่า 66.22% ประสิทธิภาพด้านการผลิตต่อวัน มีค่า 50% และมีประสิทธิภาพในการตรวจจับโลหะ 100% โดยมีประสิทธิภาพโดยรวม คือ 58.11% ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ใช้ในกระบวนการตรวจจับโลหะ รวมถึงการประยุกต์ให้ระบบสามารถตรวจจับวัตถุอื่น ๆ เช่น อโลหะ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณบริษัทวังมะนาวเกษตรภัณฑ์ จำกัด ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ในการสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติ เกื้อสกุล. (2557). การพัฒนาเครื่องตรวจจับและคัดแยกโลหะปลอมปนสำหรับอาหารทะเล. *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์*, 13(1), 50-67.
- [2] กันตภณ พรวิไลสง. (2557). เครื่องคัดแยกวัตถุอัตโนมัติตามสายพานลำเลียง. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก*, 7(1), 88-96.
- [3] พรเทพ ธงไชย, และประวิทย์ ดวงบรรเทา. (2556). ระบบตรวจจับและนับโลหะแบบหลายตัวตรวจจับ. *ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์*. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [4] สุทัศน์ แขกระจำง. (2553). วงจรเปิด/ปิดพัลส์และการโปรแกรมสำหรับตรวจจับผลตอบสนองเชิงเวลาของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์. *วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- [5] อนุชา แก้วพูลสุข, และรัชณู กัดมัน. (2553). เครื่องตรวจจับโลหะชนิดมือถือโดยใช้หลักการ Beat Frequency Oscillator. *NU Science Journal*, 7(1), 152-164.

- [6] อนุชา แก้วพูลสุข. (2554). วงจรตรรกะแบบพื้นฐานในการสร้างตัวตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณสำหรับเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 21(1), 41-51.
- [7] ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม, ณัฐพงศ์ บุหงา, วีระชัย บุญเพิ่ม, และสนอง ดีสม. (2564). เครื่องคัดแยกวัสดุอัตโนมัติในสายพานลำเลียงควบคุมด้วยระบบพีแอลซี. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*, 7(1), 49-59.