

บทความวิจัย (Research Article)

การออกแบบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ : กรณีศึกษาสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกอัตโนมัติ

สมโภช เวียงคำ¹, ปิยะรัตน์ ปริย์มาโนช¹, วัฒนา จันทะโคตร¹, เสรีย์ ตู๊ประกาย¹,
นันทน์ภัสร์ อินย์ม¹ และ พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี^{2,*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

² สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: phonniphab@sau.ac.th, โทรศัพท์: 084-6516996

(รับบทความ: 26 กุมภาพันธ์ 2569; แก้ไขบทความ: 19 พฤษภาคม 2569; ตอรับบทความ: 20 พฤษภาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัย สำหรับเครื่องจักรกลอัตโนมัติ โดยใช้มาตรฐานสากล ISO 13849-1 ร่วมกับ ISO 12100 ในการประเมินความเสี่ยง โดยมีการทำแบบจำลอง 3 มิติของเครื่องจักร เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัยตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบเครื่องจักร กรณีศึกษาที่ใช้ในการวิจัยคือสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกอัตโนมัติด้วยกระบอกลูกกลม ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างผู้ปฏิบัติงานและเครื่องจักรในระยะใกล้ โดยมุ่งเน้นการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์อินพุต ลอจิก และเอาต์พุต ตามหลักการของมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยอาศัยข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ที่เลือกใช้งาน เช่น ค่าความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน (MTTFd) ความสามารถในการตรวจจับความบกพร่อง (DCavg) และการประเมินความเสี่ยงจากความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม (CCF) ผลการวิจัยพบว่าการกำหนดระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) ถูกกำหนดไว้ในระดับ c มาจากมาตรการลดความเสี่ยงของมาตรฐาน ISO 12100 เฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) โดยงานวิจัยนี้มีฟังก์ชันความปลอดภัย (Safety Function) จำนวน 2 ฟังก์ชัน คือ SF1 และ SF2 โดยระบบ SRP/CS ที่ออกแบบมานั้นบรรลุผล โดยมีระดับประสิทธิภาพในระดับ e ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับประสิทธิภาพที่ต้องการในระดับ c (PL: e > PLr : c) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงแนวทางการออกแบบที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรกลอัตโนมัติได้อย่างเป็นระบบ และสอดคล้องกับข้อกำหนดของมาตรฐานสากล

คำสำคัญ : มาตรฐานความปลอดภัยของเครื่องจักร ระบบควบคุมความปลอดภัย การประเมินความเสี่ยง ระดับประสิทธิภาพ ความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม

การอ้างอิงบทความ: สมโภช เวียงคำ, ปิยะรัตน์ ปริย์มาโนช, วัฒนา จันทะโคตร, เสรีย์ ตู๊ประกาย, นันทน์ภัสร์ อินย์ม และ พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี, "การออกแบบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ : กรณีศึกษาสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกอัตโนมัติ," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 20-37, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Design and Evaluation of Machine Safety Control Systems Based on ISO 13849-1 Using 3D Model-Based Design : A Case Study of an Automated Sorting Conveyor System

Sompoch Veangkum¹, Piyarat Premanoch¹, Wattana Chanthakhot¹, Seree Tuprakay¹,
Nannapasorn Inyim¹ and Phonnipha Buriboonsuksri^{2,*}

¹ Department of safety occupational health and environmental engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

² Department of safety engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University

*Corresponding Author: phonniphab@sau.ac.th, Tel.084-6516996

(Received: February 26, 2026; Revised: May 19, 2026; Accepted: May 20, 2026)

Abstract

The objective of this research is to propose a design framework for safety control systems in automated machinery by integrating the international standards ISO 12100 for risk assessment and ISO 13849-1 for safety design. A three-dimensional (3D) model of the machinery was developed to guide the definition of safety functions from the initial design phase. An automated conveyor system equipped with a pneumatic sorting mechanism was selected as a case study, representing a type of machinery that involves close human-machine interaction. The study focuses on the design and selection of input, logic, and output devices in accordance with ISO 13849-1 principles. This process relies on the technical data of the selected components, including MTTFd, DCavg, and the evaluation of Common Cause Failures (CCF). The research results indicate that the Required Performance Level (PLr) was determined to be at level c, derived from the risk reduction measures of ISO 12100 specifically related to the Safety-Related Parts of Control Systems (SRP/CS). This study identifies two distinct safety functions: SF1 and SF2. The designed SRP/CS successfully achieved a Performance Level of level e, which exceeds the required threshold (PL: e > PLr: c). These findings demonstrate a systematic design approach that can serve as a comprehensive guideline for developing safety control systems in automated machinery, in strict compliance with international standard requirements.

Keywords: Machine Safety Standard, Safety Control System, Risk Assessment, Performance Level, Common Cause Failure

Please cite this article as: S. Veangkum, P. Premanoch, W. Chanthakhot, S. Tuprakay, N. Inyim and P. Buriboonsuksri, "Design and Evaluation of Machine Safety Control Systems Based on ISO 13849-1 Using 3D Model-Based Design : A Case Study of an Automated Sorting Conveyor System," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 20-37, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคอุตสาหกรรมสมัยใหม่ เครื่องจักรประเภทสายพานลำเลียงที่มีระบบคัดแยกอัตโนมัติ ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เช่น อุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมโลจิสติกส์ และอุตสาหกรรมแปรรูป [1] การเพิ่มระดับความเป็นระบบอัตโนมัติของเครื่องจักรกลยังมาพร้อมกับความเสี่ยงด้านความปลอดภัย โดยเฉพาะในกรณีที่ผู้ปฏิบัติงานทำงานใกล้กับเครื่องจักรโดยตรง เช่น การป้อนชิ้นงาน การตรวจสอบคุณภาพ และการแก้ไขปัญหาระหว่างการทำงาน [2] จากสถิติอุบัติเหตุที่เกิดจากเครื่องจักรกลในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยที่มากเป็นอันดับ 3 จำนวน 13.28% ต่อปีของอันตรายจากการทำงาน [3] สะท้อนให้เห็นว่าระบบควบคุมในปัจจุบันยังขาดการพิจารณาความปลอดภัยเชิงฟังก์ชัน (Functional Safety) ที่เพียงพอซึ่งมีผลให้เครื่องจักรมีการเคลื่อนที่หรือการเริ่มทำงานโดยไม่ตั้งใจ หรือการไม่สามารถหยุดการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างปลอดภัยในสถานการณ์ฉุกเฉิน [4]

เพื่อให้การออกแบบเป็นไปอย่างเป็นระบบ จึงมีการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยจากการศึกษาของ สุภาณวงศ์ ศรีลาศักดิ์ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย [2] ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้หลักการของ ISO 12100 สามารถนำมาใช้ในการระบุแหล่งอันตราย การประเมินความเสี่ยง และกำหนดมาตรการลดความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ Kozłowski et al. [5] ได้เน้นที่ผลวิจัยว่าการกันแยกพื้นที่ด้วยวิธีการหรือเทคนิคต่าง ๆ เป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อป้องกันอันตรายจากการที่พนักงานมีความพยายามที่จะเข้าแก้ไขเครื่องจักรเมื่อติดขัด โดยขาดการไตร่ตรองถึงแหล่งอันตราย ในขณะที่มาตรฐานสากลมีความนิยมในการประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยอยู่ 2 แบบคือระบบ PL และ SIL จากข้อมูลของ Sága et al. [6]

ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานพบว่าแบบ PL ของ ISO 13849-1 มีความเหมาะสมและยืดหยุ่นกว่ามาตรฐาน SIL ของ IEC 62061 เมื่อนำมาใช้กับระบบนิวเมติกส์

การศึกษาเพื่อหาแนวทางเกี่ยวกับมาตรฐานความปลอดภัยของเครื่องจักร พบว่า ISO 12100 และ ISO 13849-1 มีความเชื่อมโยงกันในการออกแบบติดตั้งระบบความปลอดภัยของเครื่องจักรกล ที่มีการใช้งานส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) กันอย่างเป็นระบบ [7] โดย ISO 12100 ทำหน้าที่เป็นมาตรฐานแม่บท (Type A Standard) ที่กำหนดกรอบแนวคิดในการระบุอันตราย วิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของเครื่องจักร ในขณะที่ ISO 13849-1 เป็นมาตรฐานเฉพาะด้าน (Type B Standard) ที่จัดอยู่ในกลุ่ม B1 ประเมินระดับประสิทธิภาพ (Performance Level : PL) และวัดความน่าเชื่อถือของฟังก์ชันความปลอดภัย [8] กรณีศึกษาของสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกด้วยกระบอบอกสูบในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นระบบนิวเมติกส์ที่อาจพบกรณีกระบอบอกสูบเริ่มทำงานโดยไม่ตั้งใจ [9] และการที่ยังมีกระแสไฟฟ้าจ่ายไปยังมอเตอร์หลังจากการกดปุ่มหยุดฉุกเฉินแล้วก็ตาม [10] ทั้ง 2 กรณีนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ที่จะต้องใช้มาตรการและการออกแบบการออกแบบส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) ให้ถูกต้องและสอดคล้องกับมาตรฐาน ISO

นอกจากนี้ Ahola. [11] ยังชี้ให้เห็นถึงการส่งออกเครื่องจักรกลไปยังตลาดในประเทศกลุ่มสหภาพยุโรป การปฏิบัติตามมาตรฐานด้านความปลอดภัยของเครื่องจักรที่ต้องมีการจัดเตรียมข้อมูลด้านการประเมินความเสี่ยง และการคำนวณระดับประสิทธิภาพของระบบควบคุมความปลอดภัย ถือเป็นข้อกำหนดที่สอดคล้องกับกฎหมายที่สำคัญ เช่น EU Machinery Regulation หรือ แม้แต่ในประเทศญี่ปุ่นที่มีการประกาศให้ถือเป็นแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยของอุตสาหกรรมญี่ปุ่น [12]

บทความวิจัย (Research Article)

งานวิจัยจำนวนมากที่กล่าวถึงการประเมินความเสี่ยงและการออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัย [13] ในส่วนของประเทศไทยพบว่าม้งานวิจัยที่เน้นเพียงการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันทางกายภาพเข้ากับเครื่องจักรเก่า แต่ในทางปฏิบัติยังพบว่ายังขาดแนวทางที่ชัดเจนในการเชื่อมโยงผลการประเมินความเสี่ยงตาม ISO 12100 เข้ากับการประเมินระดับประสิทธิภาพตาม ISO 13849-1 อย่างเป็นรูปธรรม [14] สำหรับผู้ผลิตเครื่องจักรใหม่ แต่ยังคงขาดการนำเสนอในรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติในขั้นตอนการออกแบบเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการสื่อสาร การกำหนดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ และการออกแบบฟังก์ชันความปลอดภัย งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำเสนอแนวทางและการบูรณาการแบบจำลอง 3 มิติ ที่สามารถแสดงผลการคำนวณและยืนยันความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมความปลอดภัยได้อย่างเป็นระบบ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1) เพื่อศึกษากระบวนการกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัย (Safety Function) และระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr)

2) เพื่อออกแบบและประเมินระดับประสิทธิภาพ (PL) ของส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) ตามมาตรฐาน ISO 13849-1

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มาตรฐาน ISO 12100 กับความเกี่ยวข้องกับมาตรฐาน ISO 13849-1

มาตรฐาน ISO 12100 [15] ระบุไว้อย่างชัดเจนในหัวข้อ 6.2.11.1 โดยการออกแบบระบบควบคุมในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย (Safety-Related Performance) จะต้องถูกเลือกใช้ หรือมีการ

ออกแบบให้มีประสิทธิภาพ ให้ผลในการลดความเสี่ยงที่เพียงพอ โดยมีการอ้างอิงมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยตรงเพื่อใช้เป็นแนวทางปฏิบัติ อีกทั้งยังมีการกำหนดให้ต้องทำการประมาณการความเสี่ยง (Risk Estimation) ซึ่งผลลัพธ์จากประเมินด้วยพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ความรุนแรง (Severity) ความถี่ (Frequency) ความเป็นไปได้ในการหลีกเลี่ยง (Possibilities to Avoid) จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ISO 13849-1

2.2 รูปแบบของโครงสร้างระบบที่กำหนดไว้ (Designated Architecture) เพื่อการออกแบบ

รูปแบบโครงสร้างของส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่มาตรฐานกำหนดไว้ ช่วยให้สามารถออกแบบมีวิธีที่ชัดเจนในการประเมิน ให้สามารถบรรลุระดับประสิทธิภาพ (PL) โดยจะแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ หรือเรียกว่า Category ดังแสดงในรูปที่ 1

เมื่อมีการเลือกใช้ตามประเภทของ Category ต่าง ๆ แล้ว ยังจะต้องมีการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ร่วมกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

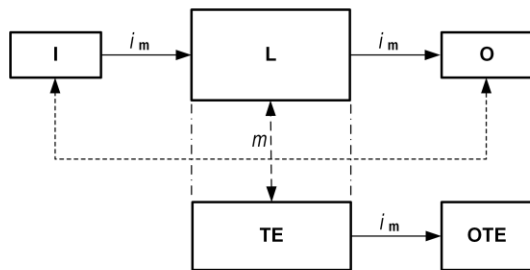
รูปที่ 1(a) แสดงโครงสร้างระบบที่กำหนดไว้ของ Category B เป็นระดับพื้นฐานที่เน้นการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ให้ทนทานต่อสภาวะการทำงานปกติ หากเกิดความผิดปกติอาจทำให้ฟังก์ชันความปลอดภัยล้มเหลวได้ทันที โดยจะต้องมีค่า MTTFd ต่ำถึงปานกลาง (Low to Medium) DCavg ไม่มีค่า (None) และ CCF ไม่เกี่ยวข้อง (Not Relevant) ในส่วนของ Category 1 จะใช้โครงสร้างเดียวกับ Category B โดยต้องใช้อุปกรณ์ที่ผ่านการพิสูจน์การใช้งานมาแล้ว (Well-Tried Components) เพื่อลดโอกาสการเกิดความล้มเหลว โดยจะต้องมีค่า MTTFd

บทความวิจัย (Research Article)

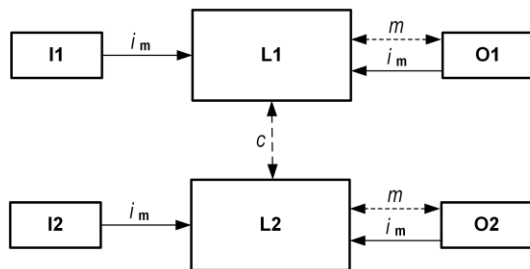
ต้องอยู่ในระดับสูง (High) DCAvg ไม่มีค่า (None)
และ CCF ไม่เกี่ยวข้อง (Not Relevant)



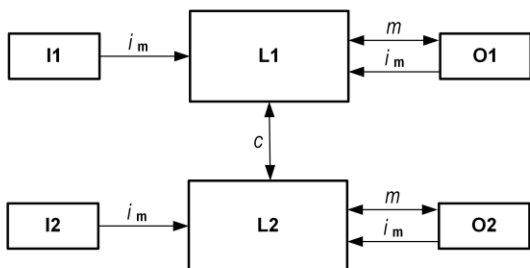
a) โครงสร้างระบบที่กำหนดไว้สำหรับ Category B และ 1



b) โครงสร้างระบบที่กำหนดไว้สำหรับ Category 2



c) โครงสร้างระบบที่กำหนดไว้สำหรับ Category 3



d) โครงสร้างระบบที่กำหนดไว้สำหรับ Category 4

รูปที่ 1 ข้อกำหนดของโครงสร้างระบบ SRP/CS
ทั้ง 5 รูปแบบ (Category)

รูปที่ 1(b) แสดงโครงสร้างระบบที่กำหนดไว้ของ Category 2 เน้นการตรวจสอบผ่าน ฟังก์ชันการทดสอบ (Testing) เป็นระยะ หากเกิดความผิดปกติระหว่างรอบการตรวจสอบ ฟังก์ชันความปลอดภัยอาจเสียไป แต่จะถูกตรวจพบเมื่อถึงรอบการทดสอบครั้งถัดไป โดยจะต้องมีค่า MTTFd ระดับต่ำถึงสูง (Low to High) DCAvg อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (Low to Medium) และค่า CCF ต้องนำมาพิจารณา

รูปที่ 1(c) แสดงโครงสร้างระบบที่กำหนดไว้ของ Category 3 : มีโครงสร้างแบบซ้อน หรือระบบสำรองที่ทำงานคู่กัน (Redundancy) เมื่อตรวจพบความผิดปกติที่จุดใดจุดหนึ่ง ก็จะไม่ทำให้ฟังก์ชันความปลอดภัยล้มเหลว โดยจะต้องมีค่า MTTFd ระดับต่ำถึงสูง (Low to High) DCAvg อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (Low to Medium) และค่า CCF ต้องนำมาพิจารณา

รูปที่ 1(d) แสดงโครงสร้างระบบที่กำหนดไว้ของ Category 4 ซึ่งเป็นระดับสูงสุดที่ทนทานต่อความผิดปกติเดียว และสามารถรับมือกับการสะสมของความผิดปกติ (Accumulation of Faults) ได้โดยไม่ทำให้ระบบสูญเสียความปลอดภัย [16] โดยจะต้องมีค่า MTTFd ระดับสูง (High) เท่านั้น DCAvg อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (Low to Medium) และ CCF ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบ SPR/CS

2.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน (Mean Time to Dangerous Failure: MTTFd)

ในเชิงทฤษฎี ค่า MTTFd จะแสดงเกณฑ์การประเมินในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ในระบบ SRP/CS โดยแสดงถึงค่าเฉลี่ยเวลาที่将会เกิดความล้มเหลวที่เป็นอันตราย การคำนวณค่า MTTFd มักอ้างอิงจากข้อมูลอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ผู้ผลิตให้มา และถูกจัดระดับเป็น Low Medium และ High ตามเกณฑ์ของ ISO

บทความวิจัย (Research Article)

13849-1 ค่า MTTFd ที่สูงแสดงถึงความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานในระบบความปลอดภัย

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินค่า MTTFd

ผลการประเมิน	เกณฑ์การประเมิน (ปี)
Low	$3 \leq \text{MTTFd} \leq 10$
Medium	$10 \leq \text{MTTFd} \leq 30$
High	$30 \leq \text{MTTFd} \leq 100$

การรวมผลของ MTTFd ในส่วนอุปกรณ์ Input นั้นสามารถทำการคำนวณแปลงเป็นค่า MTTFd ได้เช่นกัน โดยใช้สมการที่ 1

$$\text{MTTF}_d = \frac{B_{10d}}{0.1 \times n_{op}} \quad (1)$$

เมื่อ

B_{10d} คือ จำนวนรอบการทำงานจนกระทั่ง 10% ของส่วนประกอบเกิดความล้มเหลวที่เป็นอันตราย (ได้มาจากผู้ผลิต)

n_{op} คือ ค่าจำนวนรอบการทำงานเฉลี่ยต่อปี

โดยในส่วนของการรวมค่า MTTFd ของระบบ SRP/CS ทั้งระบบจะเป็นการรวมผลของค่า MTTFd ของอุปกรณ์ Input Logic และ Output โดยจะรวมผลด้วยสมการที่ 2

$$\frac{1}{\text{MTTF}_d} = \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \frac{1}{\text{MTTF}_{di}} = \sum_{j=1}^{\tilde{N}} \frac{n_j}{\text{MTTF}_{dj}} \quad (2)$$

อย่างไรก็ดียังคงต้องพิจารณาถึงประเด็นต่าง ๆ ที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 13849-1 อย่างละเอียดในแต่ละกรณี ตัวอย่างเช่น เรื่อง Fault Exclusion [16] ที่ใช้พิจารณาการยกเว้นให้อุปกรณ์บางชนิดไม่ต้องนำมาคำนวณ เนื่องจากมีโอกาสน้อยมากที่จะเสียหรือชำรุดจนทำให้ระบบความปลอดภัยทำงานผิดพลาด [17] หรือใช้การรวมผลของค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวอันตรายต่อชั่วโมง (PHFd) ของอุปกรณ์ที่อาจได้มาจากผู้ผลิต และแปลงค่าเป็น MTTFd โดยใช้ตาราง K.1 ในภาคผนวก K ของเล่มมาตรฐาน [18]

2.4 ความสามารถในการตรวจจับความบกพร่อง (Diagnostic Coverage Average: DCavg)

สำหรับค่า DCavg จะแสดงเกณฑ์การประเมินไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยการครอบคลุมของการวินิจฉัยของส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) ทั้งระบบ โดยจะสะท้อนถึงความสามารถของระบบในการตรวจพบความผิดปกติก่อนที่จะนำไปสู่สถานการณ์อันตราย [18] โดย ISO 13849-1 แบ่งระดับ DCavg ออกเป็น 3 ระดับ คือ Low Medium และ High โดยระบบที่ต้องการระดับประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้องมี DCavg ในระดับที่เพียงพอ เช่น การใช้การตรวจสอบแบบข้ามช่องสัญญาณ (Cross Monitoring) การวินิจฉัยอย่างต่อเนื่อง (Continuous Diagnostics) หรือใช้แนวทางตามตาราง E.1 ในภาคผนวก E ของมาตรฐาน ISO 13849-1

ตารางที่ 2 เกณฑ์การประเมินค่า DCavg

ผลการประเมิน	เกณฑ์การประเมิน (%)
None (ไม่ใช้)	$\text{DCavg} < 60\%$
Low	$60\% \leq \text{DCavg} \leq 90\%$
Medium	$90\% \leq \text{DCavg} \leq 99\%$
High	$99\% \leq \text{DCavg}$

สมโภช เจริญคำ และคณะ, การออกแบบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ : กรณีศึกษาสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกอัตโนมัติ

บทความวิจัย (Research Article)

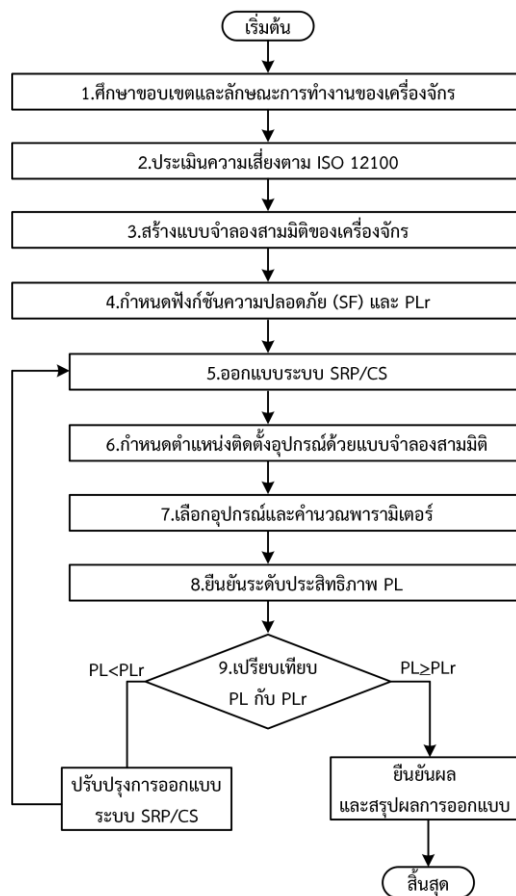
2.5 การประเมินความเสี่ยงจากความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม (Common Cause Failure: CCF)

ความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม Common Cause Failure (CCF) และส่งผลต่อหลายช่องสัญญาณพร้อมกัน การประเมิน CCF ดำเนินการในรูปแบบของรายการตรวจสอบ (Checklist) ที่ให้คะแนนตามมาตรการลดความเสี่ยง เช่น การแยกแหล่งพลังงาน การแยกสายสัญญาณ และความหลากหลายของอุปกรณ์ โดยระบบจะถือว่าผ่านเกณฑ์เมื่อได้คะแนนรวมไม่น้อยกว่า 65 คะแนน [18]

การรวมกันของโครงสร้างระบบ ค่า MTTFd ค่า DCavg และผลการประเมิน CCF จะถูกนำมาใช้ในการตัดสินระดับประสิทธิภาพ (PL) ที่ระบบสามารถบรรลุได้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ระดับ คือ a ถึง e โดยระดับ e เป็นระดับสูงสุดที่มีความน่าจะเป็นของความล้มเหลวอันตรายต่ำที่สุด งานวิจัยจำนวนมากชี้ให้เห็นว่าการเลือก Category ที่เหมาะสม เช่น Category 3 หรือ Category 4 มีผลโดยตรงต่อระดับ PL ที่สามารถบรรลุได้ และต้องพิจารณาควบคู่กับคุณสมบัติของอุปกรณ์ในระบบ [6]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นรูปแบบการวิจัยเชิงวิศวกรรม (Engineering Research) ที่มุ่งเน้นการออกแบบและประเมินระบบควบคุมที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของเครื่องจักรกลอัตโนมัติ โดยใช้กรณีศึกษาของสายพานลำเลียงที่มีระบบคัดแยกอัตโนมัติด้วยกระบอกสุบลมของบริษัทผลิตเครื่องจักรกลแห่งหนึ่งมาเป็นแบบตัวอย่างในการทำกรณีศึกษาและเครื่องมือในงานวิจัย ให้สอดคล้องกับข้อกำหนดในมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยมีการบูรณาการแบบจำลอง 3 มิติของเครื่องจักร เข้ากับกระบวนการประเมินและออกแบบระบบ SRP/CS



รูปที่ 2 แผนภาพขั้นตอนลำดับขั้นการวิจัย

3.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบการวิจัยของงานนี้จะการใช้อนุพัญาน ISO 12100 เป็นเครื่องมือในการประเมินความเสี่ยงของเครื่องจักรกรณีศึกษา โดยใช้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ที่มีประสบการณ์การด้านการสร้างเครื่องจักรไม่น้อยกว่า 5 ปี ประกอบไปด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัย ผู้เชี่ยวชาญด้านระบบไฟฟ้าและควบคุม และผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบทางกล ซึ่งผลการประเมินดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัย (Safety Function) และระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr)

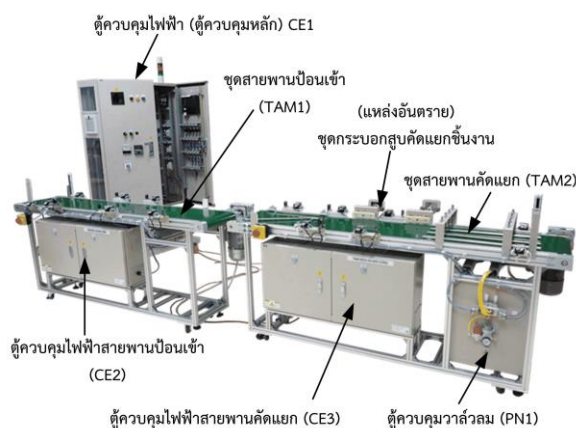
จากนั้น มาตรฐาน ISO 13849-1 จะถูกใช้เป็นกรอบเชิงวิศวกรรมผ่านพารามิเตอร์หลัก 4 ตัว ได้แก่

บทความวิจัย (Research Article)

โครงสร้างของระบบตามข้อกำหนด ค่าเฉลี่ยเวลาที่จะเกิดความล้มเหลวที่เป็นอันตราย (MTTFd) ค่าเฉลี่ยการครอบคลุมของการวินิจฉัย (DCavg) และความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม (CCF) เพื่อใช้ยืนยันระดับประสิทธิภาพของระบบควบคุมความปลอดภัยที่ออกแบบขึ้น โดยลำดับขั้นตอนการวิจัยสรุปได้เป็น 9 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงรูปภาพที่ 2

3.2 การกำหนดขอบเขตและลักษณะเครื่องจักรกลที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

เครื่องจักรกลที่ใช้ในการศึกษา คือ สายพานลำเลียงที่มีระบบคัดแยกแบบอัตโนมัติด้วยกระบอบสูบ ดังแสดงในรูปที่ 3 มีการทำงานร่วมกันระหว่างผู้ปฏิบัติงานและเครื่องจักรในขั้นตอนการป้อนชิ้นงาน การตรวจสอบ และการแก้ไขปัญหา โดยเครื่องจักรดังกล่าวถูกเลือกเป็นกรณีศึกษาเนื่องจากมีลักษณะอันตรายที่พบบ่อยในภาคอุตสาหกรรม เช่น การเคลื่อนที่ของสายพาน การเคลื่อนที่เชิงเส้นของกระบอบสูบ และความเสี่ยงจากการเข้าถึงพื้นที่อันตรายโดยไม่ตั้งใจ อีกทั้งผลจากการวิจัยนี้จะนำไปสู่การปรับปรุงเครื่องจักรกลในรุ่นถัดไปที่จะมีการจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ



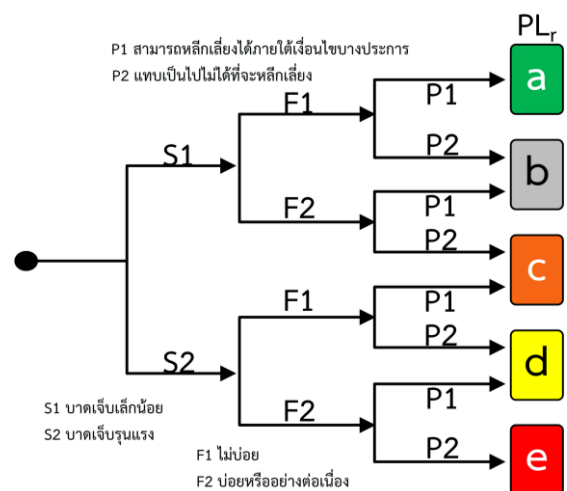
รูปที่ 3 เครื่องจักรเดิมที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

3.3 การประเมินความเสี่ยงเพื่อกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัย (Safety Function) และค่า PLr

การประเมินความเสี่ยงดำเนินการตามหลักการของ ISO 12100 โดยประกอบด้วยขั้นตอนการระบุอันตราย (Hazard Identification) การวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk Analysis) และการประเมินความเสี่ยง (Risk Evaluation) ของเครื่องจักร นำไปสู่การกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัย จำนวน 2 ฟังก์ชัน คือ SF1 และ SF2 ซึ่งจะแสดงในหัวข้อ 3.4

การกำหนดระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) มาตรฐาน ISO 13849-1 โดยกำหนดให้ใช้กราฟความเสี่ยง (Risk Graph) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยพิจารณาปัจจัยหลัก 3 อย่างได้แก่

- ความรุนแรงของอันตราย (Severity : S)
- ความถี่หรือระยะเวลาการสัมผัสอันตราย (Frequency : F)
- ความเป็นไปได้ในการหลีกเลี่ยงอันตราย (Possibility of Avoidance : P)



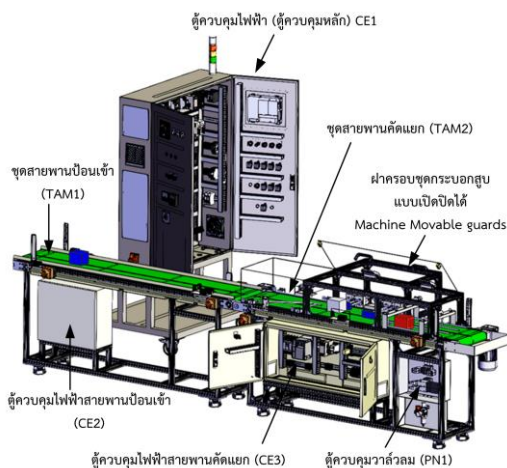
รูปที่ 4 กราฟความเสี่ยงที่ใช้ในการประเมินระดับ PLr

สมโภช เียงคำ และคณะ, การออกแบบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรด้วยมาตรฐาน ISO 13849-1 โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ : กรณีศึกษาสายพานลำเลียงแบบมีระบบคัดแยกอัตโนมัติ

บทความวิจัย (Research Article)

3.4 การจัดทำแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงเครื่องจักร

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาประเด็นการออกแบบและติดตั้งร่วมกับผู้เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้จึงมีการจัดทำแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ความเสี่ยง และใช้อธิบายหลักการออกแบบตำแหน่งการติดตั้งส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) เพื่อการควบคุมความเสี่ยงให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลอง 3 มิติ สำหรับเครื่องจักรใหม่ที่จะใช้ปรับปรุงระบบ SRP/CS

การนำเสนอด้วยแบบจำลอง 3 มิติ (3D Model) จะช่วยให้เห็นภาพแนวทางและใช้อธิบายถึงมาตรการลดความเสี่ยงด้วยฟังก์ชันความปลอดภัย SF1 และ SF2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) Safety Function ที่ 1 (SF1) : การหยุดการทำงานของสายพานลำเลียงเมื่อเกิดสถานการณ์ฉุกเฉิน มีการออกแบบปรับปรุงเฉพาะระบบควบคุมเท่านั้น โดยไม่มีการปรับปรุงโครงสร้างเครื่องจักร

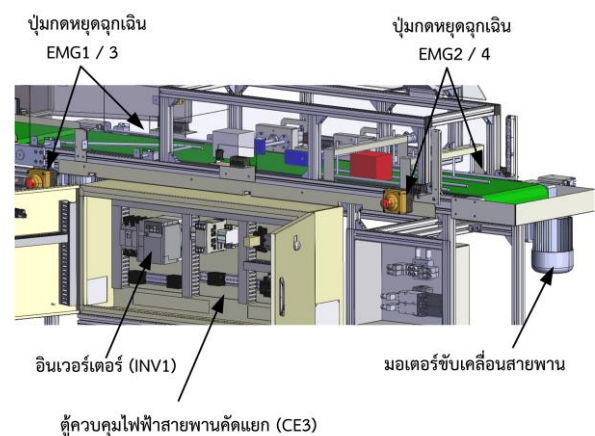
2) Safety Function ที่ 2 (SF2) : การป้องกันการเคลื่อนที่ของกระบอกระบบเมื่อมีผู้ปฏิบัติงานอยู่ในพื้นที่อันตราย มีการออกแบบปรับปรุงระบบควบคุมและการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม คือ เซฟตี้การ์ดแบบเปิด-ปิดได้ และวาล์วนิรภัย

3.5 การออกแบบระบบ SRP/CS

การออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัยดำเนินการตามข้อกำหนดของ ISO 13849-1 โดยแบ่งโครงสร้างระบบออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

- 1) ส่วนรับสัญญาณ (Input)
- 2) ส่วนประมวลผลเชิงตรรกะ (Logic)
- 3) ส่วนกระทำการ (Output)

สำหรับแต่ละฟังก์ชันความปลอดภัยทั้ง SF1 และ SF2 จะมีการกำหนดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ด้วยแบบจำลอง 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7

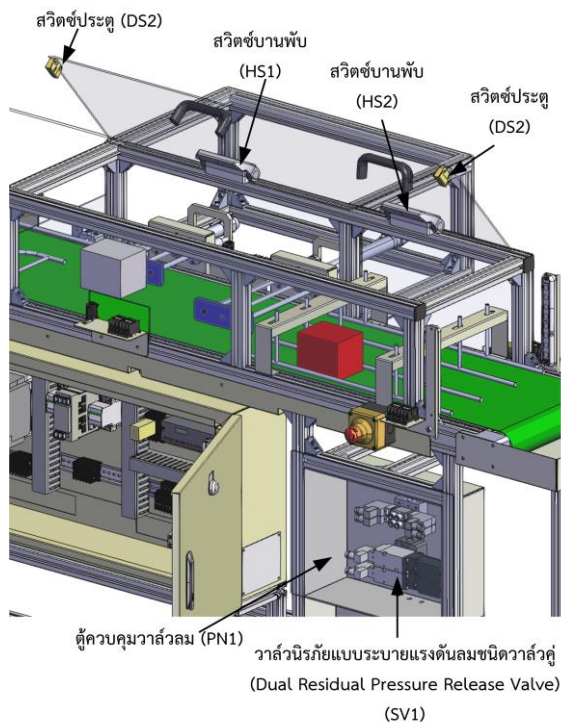


รูปที่ 6 แบบจำลอง 3 มิติ ของ SF1

การเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย จะพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเทคนิคของอุปกรณ์ เช่น ค่า MTTFd และค่า DCavg ที่อ้างอิงจากเอกสารของผู้ผลิต และ

บทความวิจัย (Research Article)

ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณระดับ
ประสิทธิภาพ (PL) ของระบบ SRP/CS



รูปที่ 7 แบบจำลอง 3 มิติ ของ SF2

3.6 การคำนวณและการยืนยันระดับประสิทธิภาพ (PL Verification)

การประเมินระดับประสิทธิภาพ (PL) ของระบบ SRP/CS ดำเนินการตามขั้นตอนของ ISO 13849-1 โดยพิจารณาองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่

- ค่า MTTFd ของระบบย่อย (Subsystem)
- ค่า DCavg ของระบบ
- การประเมินความล้มเหลวจากสาเหตุร่วม (CCF)
- โครงสร้างระบบตามรูปแบบ (Category)

โดยผลการคำนวณจะถูกสรุปในรูปแบบตารางผลการประเมิน PL และรูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างตามรูปแบบ (Category) DCavg MTTFd ของแต่ละฟังก์ชันความปลอดภัย ซึ่งเป็นรูปภาพตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ISO 13849-1

4. ผลการวิจัย (Results)

ผลการวิจัยนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินความเสี่ยง การออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัย และการยืนยันระดับประสิทธิภาพ (PL) ของส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) สำหรับเครื่องจักรกลการศึกษา ตามกรอบมาตรฐาน ISO 13849-1 มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการประเมินความเสี่ยงและการกำหนด PLr

จากการประเมินความเสี่ยงของเครื่องจักรกลสายพานลำเลียงที่มีระบบคัดแยกอัตโนมัติ พบว่าอันตรายหลักเกิดจากการเคลื่อนที่ของสายพาน การทำงานของกระบอกสูบลม และการเข้าถึงพื้นที่อันตรายในระหว่างการปฏิบัติงานและการแก้ไข ปัญหา การวิเคราะห์ตามแนวทาง ISO 12100 และการใช้ Risk Graph ส่งผลให้ต้องกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัยจำนวน 2 ฟังก์ชัน เพื่อควบคุมความเสี่ยงให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ดังนี้

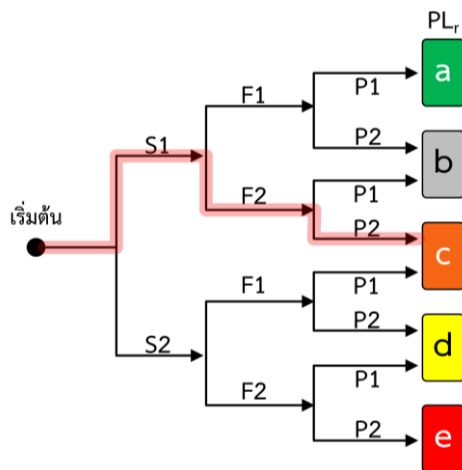
1) Safety Function ที่ 1 (SF1) : การหยุดการทำงานของสายพานลำเลียงเมื่อเกิดสถานการณ์ฉุกเฉิน

2) Safety Function ที่ 2 (SF2) : การป้องกันการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบลมเมื่อมีผู้ปฏิบัติงานอยู่ในพื้นที่อันตราย

การประเมินโดยใช้กราฟความเสี่ยงพบว่า Safety Function ทั้งสองฟังก์ชัน (SF1, SF2) มีระดับ

บทความวิจัย (Research Article)

ประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) อยู่ในระดับ c ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นในการใช้ระบบควบคุมความปลอดภัยที่มีความน่าเชื่อถือในระดับปานกลางถึงสูง เพื่อรองรับการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และเครื่องจักร แสดงได้ดังรูปที่ 8

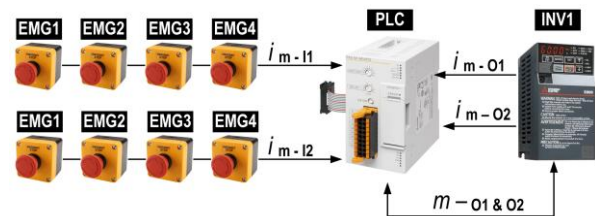


รูปที่ 8 กราฟความเสี่ยงที่ใช้กำหนดระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr)

4.2 ผลการออกแบบโครงสร้างระบบ SRP/CS

ผลการออกแบบส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) แสดงให้เห็นว่าแต่ละ Safety Function จะเลือกใช้ระบบ 2 ช่องสัญญาณ (Dual Channel) รองรับการใช้งานร่วมกับโครงสร้างตามรูปแบบ (Category) 3 และ 4 แต่เนื่องจาก FX5-SF-MU4T5 ที่เลือกใช้มีคุณลักษณะเป็น Safety Controller [10] สามารถติดตั้งและเชื่อมต่อสื่อสารกับ PLC เดิมของเครื่องจักรได้ง่าย ลดต้นทุนและพื้นที่การติดตั้ง อีกทั้งยังมีฟังก์ชันการตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์อินพุต ที่เป็นความสามารถในการตรวจจับความบกพร่อง ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขในโครงสร้างตามรูปแบบ (Category) 4 จึงมีความเหมาะสมกับระดับ PLr โดย

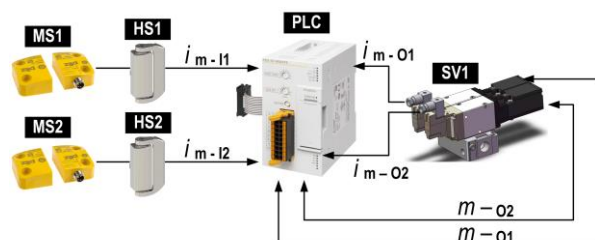
มีการจัดส่วนประกอบ Input Logic และ Output อย่างเป็นระบบ ดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ SF1 และ SF2 ตามลำดับ



รูปที่ 9 โครงสร้างระบบของ SF1 โดยใช้โครงสร้างที่กำหนดไว้ตามรูปแบบ (Category) 4

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบที่สอดคล้องกับโครงสร้างรูปแบบ (Category) 4 โดยอุปกรณ์อินพุตเป็นปุ่มกดหยุดฉุกเฉินแบบหน้าสัมผัส 2 NC แยกเข้าแต่ละช่องสัญญาณ (Channel) และยังมีระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Feedback) ของอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนสายพาน

การออกแบบที่สอดคล้องกับโครงสร้างรูปแบบ (Category) 4 อุปกรณ์อินพุตมีการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความหลากหลายใน Channel เดียวกัน และยังมีระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Feedback) ของอุปกรณ์วาล์วนิรภัยที่ใช้ในการระบายลมออกจากระบบแสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 โครงสร้างระบบของ SF2 โดยใช้โครงสร้างที่กำหนดไว้ตามรูปแบบ (Category) 4

บทความวิจัย (Research Article)

4.3 ผลการคำนวณและการประเมินค่าคะแนนของพารามิเตอร์ที่ใช้

1) ผลการคำนวณค่า Mean Time To Dangerous Failure (MTTFd) ของทั้ง 2 ฟังก์ชันความปลอดภัยแสดงใน ตารางที่ 3 และ 4

สำหรับ SF2 จะเป็นระบบที่มีความซับซ้อน มีการใช้อุปกรณ์ Input ที่หลากหลาย ประกอบกับข้อมูลจากผู้ผลิตส่วนใหญ่เป็นข้อมูล B10d จึงจะต้องมีการรวมค่า MTTFd โดยใช้สมการที่ 1 และ 2 ในการคำนวณและสรุปผลดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณ MTTFd ของ SF1

ส่วนของระบบ	B10d (Cycle)	PHFD (1/h)	Nop (Cycle)
ข้อมูลการเดินเครื่องจักรกล : มีการใช้งานปีละ 282 วัน ๆ ละ 6 ชั่วโมง และมีการกดปุ่ม EMG เฉลี่ย วันละ 2 ครั้ง (ใช้ในการหาค่า Nop)			
Input EMG1-4	600,000	Fault Exclusion	564
Logic PLC		1.5×10^{-8}	
Output INV		1.5×10^{-8}	100
MTTFd _{Total} (I/L/O)	ใช้รูปแบบผลรวม PHFD = 3.0×10^{-8} นำค่าไปเทียบจาก Table K.1 ในมาตรฐาน ISO 13849-1 [18] สรุปได้ว่าเป็น Ple MTTFd High อยู่ในช่วง 82 ถึง 91 ปี		

จากข้อมูลตารางที่ 3 และ 4 ผลการคำนวณพบว่าอุปกรณ์ทุกส่วนมีค่า MTTFd อยู่ในช่วง High มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ของมาตรฐาน ISO 13849-1 ส่งผล

ให้ส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) ของ SF1 และ SF2 มีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการออกแบบฟังก์ชันความปลอดภัย

ตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณ MTTFd ของ SF2

ส่วนของระบบ	B10d (Cycle)	PHFD (1/h)	Nop (Cycle)
ข้อมูลการเดินเครื่องจักรกล : มีการใช้งานปีละ 282 วัน ๆ ละ 6 ชั่วโมง และมีการเปิดฝา Movable guards เฉลี่ยวันละ 24 ครั้ง ๆ เป็นการทำงานตามวงจรปกติ (ใช้ในการหาค่า Nop)			
Input MS	2,000,000		6,768
Input HS	6,000,000		6,768
Logic PLC		1.5×10^{-8}	
Output SV1	10,000,000		9,024

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณ MTTFd ของ SF2 (ต่อ)

ส่วนของระบบ	B10d (Cycle)	PHFD (1/h)	Nop (Cycle)
MTTFd _{Input}	การรวมผล Input ที่มี 2 ช่องสัญญาณ ใช้สมการ D.2 ในเล่มมาตรฐาน [18] (MS = 2,955 และ HS = 7,387) เทียบค่าตาราง K.1 ได้ PHFD 1.13×10^{-9}		
MTTFd _{output}	11,081 ปี เทียบค่าตาราง K.1 ได้ PHFD 9.06×10^{-10}		
MTTFd _{Total} (I/L/O)	ใช้รูปแบบผลรวม PHFD = 1.70×10^{-8} นำค่าไปเทียบจาก Table K.1 ในมาตรฐาน ISO 13849-1 [18] สรุปได้ว่าเป็น PLe (MTTFd High อยู่ในช่วง 130 ถึง 150 ปี)		

2) ผลการคำนวณค่า DCavg แสดงถึงค่าเฉลี่ยการครอบคลุมของการวินิจฉัยของ ภายในส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) โดยใช้หลักเกณฑ์ดังแสดงใน ตารางที่ 5 ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในภาคผนวก E ของเล่มมาตรฐาน ISO 13849-1 [18] ซึ่งจะนำผลจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการตรวจสอบระบบในขั้นตอนการออกแบบจริง

จากการตรวจสอบคุณลักษณะจากเอกสารเทคนิคของผู้ผลิตอุปกรณ์ Safety PLC รุ่น FX5-SF-MU4T5 มีคุณสมบัติที่สอดคล้องกับ Category 4 [8] และถูกใช้เป็นอุปกรณ์ Logic ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นผลการประเมินพบว่า Safety Function ทั้งสองมีการออกแบบที่สอดคล้องกับตารางที่ 5 จึงมีค่า DCavg อยู่ในระดับ High ($\geq 90\%$) ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของโครงสร้างรูปแบบ (Category) 4

3) ผลการประเมินค่าคะแนน CCF ดำเนินการตามแนวทางที่ระบุไว้ในภาคผนวก (Annex F) ของ ISO 13849-1 โดยใช้แบบตรวจสอบรายการ (Checklist) และให้คะแนนตามมาตรการป้องกันความล้มเหลวร่วม

ตารางที่ 5 ค่า DCavg ของระบบ SRP/CS

ข้อ	วิธีการตรวจจับความบกพร่อง	ค่า DCavg (%)	ระดับ
1	โครงสร้างมีระบบสำรอง (Redundant)	99%	High
2	การตรวจสอบการลัดวงจร (การส่งสัญญาณพัลส์ทดสอบ) Short Circuit Monitoring (Test Pluse)	99%	High
3	เลือกใช้ Safety Controller ที่ผ่านการรับรองมาตรฐาน (เช่น PLe/SIL3)	99%	High
4	มีวงจรป้อนกลับที่ตรวจสอบได้ Monitored Feedback Loops	99%	High

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 6 ผลการประเมิน CCF ของระบบ SRP/CS

รายการประเมิน CCF	มาตรการที่ใช้	คะแนน
การออกแบบ	แยกวงจรจ่ายไฟและมีระบบป้องกัน	15
ความหลากหลายของอุปกรณ์	ใช้อุปกรณ์ต่างรุ่น/ต่างเทคโนโลยี	10
การป้องกันสภาพแวดล้อม	ติดตั้งในตู้ควบคุม IP54	10
	การป้องกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	25
การแยก การแบ่งส่วน	แยกสายและรางเดินสาย	15
การวิเคราะห์และการฝึกอบรม	การวิเคราะห์ FMEA	5
รวมคะแนน CCF		80

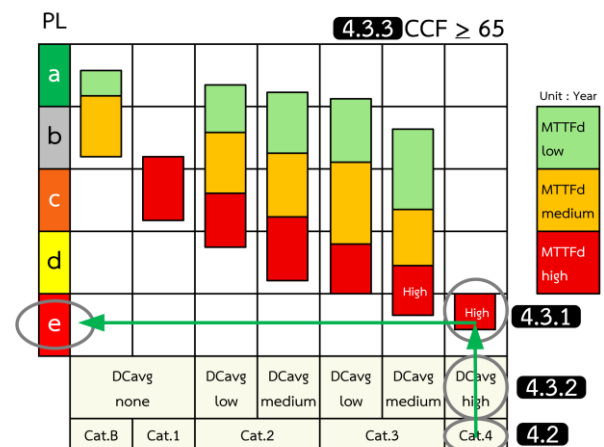
จากข้อมูลตารางที่ 6 ผลการประเมินพบว่าระบบ SRP/CS มีคะแนน CCF รวมเท่ากับ 80 คะแนน ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ที่ 65 คะแนน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างระบบและมาตรการป้องกันความล้มเหลวรวมมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบติดตั้งระบบควบคุมความปลอดภัย

4.4 ผลการประเมินระดับประสิทธิภาพ (PL) ของระบบ SRP/CS

ผลการคำนวณระดับประสิทธิภาพของระบบ SRP/CS สำหรับแต่ละ Safety Function เมื่อพิจารณา 4 องค์ประกอบสำคัญไปแล้วนั้น จะมีการนำมารวมเข้าด้วยกัน เพื่อใช้แสดงการสรุปผล PL ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 13 ซึ่งเป็นแผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ที่มีความสอดคล้องกัน อีกทั้งยังเป็นแผนภาพสำคัญที่นิยมใช้และพบได้บ่อยครั้งในการแสดงผล PL ของหน่วยงานรับรองมาตรฐาน

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) และระดับประสิทธิภาพที่ได้จากการออกแบบ (PL)

SF	PLr	PL จากการออกแบบ	ผลการประเมิน
SF1	c	e	PL > PLr
SF2	c	e	PL > PLr



รูปที่ 13 ภาพความสัมพันธ์ของ 4 องค์ประกอบที่สำคัญในการพิจารณาค่า PL

ผลการประเมินพบว่า Safety Function ที่ 1 สามารถบรรลุระดับ PL = e และ Safety Function ที่ 2 สามารถบรรลุระดับ PL = e ซึ่งทั้งสองกรณีมีค่า PL สูงกว่าหรือเท่ากับค่า PLr ที่กำหนดไว้

4.5 ผลการเปรียบเทียบค่า PL ก่อนและหลังปรับปรุงระบบ

ก่อนการออกแบบในงานวิจัยนี้ เครื่องจักรเดิมมุ่งเน้นการผลิตโดยมุมมองของการใช้งานเป็นหลัก ไม่มีแนวโน้มทางของมาตรฐาน ISO 12100 และ 13849-1 มาวิเคราะห์ฟังก์ชันความปลอดภัยอย่าง

บทความวิจัย (Research Article)

เป็นระบบ ระบบเดิมไม่มีการออกแบบโครงสร้างแบบ Redundancy ไม่มีระบบตรวจจับความบกพร่อง และไม่มีการประเมิน Common Cause Failure (CCF) ตามข้อกำหนดของ ISO 13849-1 ส่งผลให้ไม่สามารถยืนยันระดับประสิทธิภาพ (PL) ของระบบเดิมได้อย่างชัดเจน ภายหลังการออกแบบตามมาตรฐาน ISO 12100 และ ISO 13849-1 ระบบ SRP/CS ถูกพัฒนาให้มีโครงสร้างแบบ 2 ช่องสัญญาณ (Dual Channel) มีระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Feedback Monitoring) และมีการเลือกใช้อุปกรณ์ที่รองรับการวินิจฉัยความบกพร่อง ส่งผลให้ระบบสามารถบรรลุระดับประสิทธิภาพ $PL = e$ ซึ่งสูงกว่าค่า PLr ที่กำหนดไว้ที่ระดับ c ผลการปรับปรุงดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้มาตรฐานด้านความปลอดภัยของเครื่องจักรสามารถช่วยยกระดับความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมความปลอดภัย และทำให้กระบวนการออกแบบมีความเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

5. อภิปรายผลและสรุปผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างแนวทางการออกแบบส่วนที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบควบคุม (SRP/CS) ด้วยใช้มาตรฐาน ISO 12100 และ ISO 13849-1 ร่วมกับการใช้แบบจำลอง 3 มิติ เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัยสำหรับเครื่องจักรกลอัตโนมัติที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ โดยเฉพาะในกรณีของสายพานลำเลียงที่มีการเข้าถึงพื้นที่อันตรายระหว่างการป้อนชิ้นงาน ตรวจสอบ และแก้ไขปัญหา

ผลจากการบรรลุผลตามวัตถุประสงค์ โดยการประเมินความเสี่ยงและกำหนดฟังก์ชันความปลอดภัยได้ 2 ฟังก์ชัน คือ การหยุดฉุกเฉิน (SF1) และการหยุดเมื่อเปิดประตูเซฟตี้การ์ด (SF1) โดยมีระดับประสิทธิภาพที่ต้องการ (PLr) อยู่ในระดับ c และผลการประเมินระดับประสิทธิภาพจากการออกแบบระบบ SRP/CS

โดยใช้โครงสร้างรูปแบบ (Category) 4 และใช้ PLC Safety Controller กับวาล์วนิรภัยควบคุมการระบายลม และอินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์ ทำให้ค่า $MTTFd$ อยู่ระดับ High และค่า $DCavg$ ระดับ High พร้อมคะแนน CCF 80 คะแนน ส่งผลให้ค่า PL ที่คำนวณได้บรรลุระดับ e ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายที่ต้องการ ($PL : e > PLr : c$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ihainen. [13] ที่ดำเนินการวิจัยกับเครื่องจักรของบริษัท Schneider Electric

ผลของความคุ้มค่าในการออกแบบที่เลือกใช้โครงสร้างรูปแบบ (Category) 4 สามารถตรวจสอบความขัดข้องแบบจุดเดียว (Single Fault) และความขัดข้องแบบสะสม (Accumulation of Faults) ในกรณีที่ผู้ปฏิบัติงานต้องอยู่ปฏิบัติงานใกล้กับเครื่องจักรตลอดเวลา มีโอกาสส่งผลต่อการประเมินพารามิเตอร์ความถี่ ($F2$) หากมีการทำงานมากขึ้นกว่าปัจจุบัน อีกทั้งยังช่วยลดความเสี่ยงที่เกิดจากความบกพร่องที่มองไม่เห็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ดีกว่า Category 2 หรือ 3 แม้ต้นทุนเริ่มต้นของโครงสร้าง Category 4 จะสูงกว่า แต่เมื่อพิจารณาตามแนวคิดของ Peltonen. [1] เรื่องการตรวจสอบอัตราการทำงาน (Demand Rate) ระบบที่มี PL สูงกว่ามักมีความน่าเชื่อถือและอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้น

ผลจากการทำแบบจำลอง 3 มิติในงานวิจัยทำให้เห็นตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ SRP/CS และระยะปลอดภัยได้อย่างแม่นยำก่อนการติดตั้งจริง มีผลที่สอดคล้องอย่างมีนัยสำคัญกับงานวิจัยสากลในกลุ่ม Industry 4.0 ของ Ahola. [11] ที่จะช่วยเพิ่มการมองเห็นและความโปร่งใสของข้อมูล ตลอดจนใช้เป็นข้อมูลในแฟ้มเอกสารทางเทคนิค เพื่อยืนยันความสอดคล้องตามกฎหมาย ซึ่งช่วยลดช่องว่างระหว่างการออกแบบและการติดตั้ง ใช้เป็นต้นแบบในการเปลี่ยนจากการคาดเดาความปลอดภัยมาเป็นการคำนวณและยืนยันผล

บทความวิจัย (Research Article)

การนำแนวทางในงานวิจัยนี้ไปใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับงานของ สุภาณวงศ์ ศรีลาศักดิ์ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย [2] ซึ่งเน้นการประเมินความเสี่ยงเพื่อแก้ไขเครื่องจักรเดิม ผ่านมาตรการติดตั้งการป้องกันที่ขอบเขตวิจัยไม่ได้มีการออกแบบและประเมินระบบ SRP/CS หากเกิดความผิดพลาดในเรื่องนี้ เครื่องจักรจะกลายเป็นอันตรายทันที อาจส่งผลกระทบต่อในเชิงเศรษฐศาสตร์จากการจากค่าใช้จ่ายทางอ้อม เช่น การหยุดชะงักของการผลิต (Downtime) และค่ารักษาพยาบาล ซึ่งมักมีมูลค่าสูงกว่าค่าอุปกรณ์ความปลอดภัย ในเชิงสังคมการดำเนินตามแนวทางวิจัยนี้จะช่วยปิดช่องว่างของเหตุจากพฤติกรรมมนุษย์ เช่น การเพิกเฉยต่อสัญญาณหรือการแจ้งเตือน

งานวิจัยนี้อาจมีข้อจำกัดในเรื่องการประเมินที่อาศัยข้อมูลจากผู้ผลิต ยังขาดขั้นตอนการทดสอบระบบการทำงานจริง ซึ่งจะต้องดำเนินการทดสอบและตรวจสอบมาตรการต่าง ๆ โดยใช้มาตรฐาน ISO 13849-2 เมื่อมีการปรับปรุงหรือสร้างเครื่องจักรขึ้นมาใช้งานจริง

ในส่วนของการข้อเสนอแนะ ควรมีการศึกษาทำวิจัยรูปแบบนี้ในเครื่องจักรประเภทอื่น หรือมีแหล่งอันตรายแบบอื่น ๆ เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบระบบควบคุมความปลอดภัย ซึ่งจะช่วยยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันของผู้ผลิตเครื่องจักรไทย ให้ทัดเทียมกับมาตรฐานสากล ตลอดจนการพัฒนากฎหมายด้านความปลอดภัยของประเทศไทย ให้มีการตรวจสอบและประเมินระบบควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักรกลเพิ่มเติม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณอย่างยิ่งต่ออาจารย์ที่ปรึกษา เจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรามคำแหง

และมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ตลอดจนผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และแรงสนับสนุนที่เป็นประโยชน์ตลอดกระบวนการศึกษาวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่จากหน่วยงานภาครัฐที่เอื้อเฟื้อข้อมูลด้านความปลอดภัยในเครื่องจักรกล แหล่งข้อมูลวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศที่ช่วยให้บทความเรื่องนี้สามารถจัดทำได้อย่างสมบูรณ์และมีความน่าเชื่อถือในเชิงวิชาการ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Peltonen, “Leveraging Industry 4.0 for machinery safety management,” M.S. thesis, Dept. Automation and Elect. Eng., Aalto Univ., Espoo, Finland, 2023.
- [2] สุภาณวงศ์ ศรีลาศักดิ์ และเอกไท วิโรจน์สกุลชัย, “การประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของเครื่องจักรโดยใช้หลักการ ISO 12100 (กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องสำอาง),” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 2, หน้า 53–64, 2567.
- [3] สำนักงานกองทุนทดแทน, “สถานการณ์การประสบอันตรายหรือเจ็บป่วย เนื่องจากการทำงาน ปี 2563–2567,” [ออนไลน์]. Available: https://www.sso.go.th/wpr/assets/upload/files_storage/sso_th/65e64958a0565ddc98ebc2ee6cc1fbf4.pdf. [เข้าถึงเมื่อ: 15 มกราคม 2569].
- [4] กองความปลอดภัยแรงงาน, “กรณีศึกษาอุบัติเหตุจากการทำงานเกี่ยวกับเครื่องจักร: กรณีเกิดอุบัติเหตุถูกจี้ถูกเครื่องบีบขึ้นรูปกล่องกระดาษหนีบเสียชีวิต,” [ออนไลน์]. Available:

บทความวิจัย (Research Article)

- <https://osh.labour.go.th/wp-content/uploads/2026/03/machine-1047.pdf>. [เข้าถึงเมื่อ: 10 เมษายน 2569].
- [5] A. Kozłowski, J. Smyła, M. Bembenek, P. Wojtas, and L. Kasprzyczak, “The role and importance of risk assessment in machinery design and control systems on the example of a model research line designed for the production of low-emission composite fuel,” *Journal of KONBiN*, vol. 53, no. 1, pp. 25–46, 2023, doi: 10.5604/01.3001.0016.3234.
- [6] M. Sága Jr., I. Kuric, I. Klačková, and D. Więcek, “Comparison of risk assessment approaches and analyzes used in technical transport systems,” *Transportation Research Procedia*, vol. 74, pp. 516–521, 2023, doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.176.
- [7] *Safety Guide — Safety in the working environment*, 2nd ed., Torino, Italy: Reer S.p.A. , 2025.
- [8] *A Practical Guide to Machinery Safety*, 5th ed., Billingham, U.K. : TÜV SÜD , 2014.
- [9] *Safety in Focus: Machinery Directive and ISO 13849 In Practice*, Tokyo, Japan: SMC Corporation, 2019.
- [10] *Safety Programmable Controller/Safety Controller*, Tokyo, Japan: Mitsubishi Electric Corporation, 2024.
- [11] P. Ahola, “The Influence of CE Marking on Machine Design Solutions,” B.S. thesis, Dept. Mech. Eng. and Machine Automation, Tampere Univ. of Applied Sciences, Tampere, Finland, 2025.
- [12] สำนักงานมาตรฐานแรงงาน, แนวปฏิบัติเกี่ยวกับมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับเครื่องจักร. โตเกียว, ญี่ปุ่น: กระทรวงสาธารณสุข แรงงาน และสวัสดิการ, 2550. [ออนไลน์]. Available: <https://www.mhlw.go.jp/content/11300000/001408240.pdf>. [เข้าถึงเมื่อ: 4 กุมภาพันธ์ 2569].
- [13] H. Ihainen, “Machine safety: Risk assessment and safety design,” M.S. thesis, Dept. Automation Eng., Seinäjoki Univ. of Applied Sciences, Seinäjoki, Finland, 2019.
- [14] M. E. Del Giudice, M. Sharafkhani, M. Di Nardo, T. Murino, and M. C. Leva, “Exploring safety of machineries and training: An overview of current literature applied to manufacturing environments,” *Processes*, vol. 12, no. 4, Art. no. 684, 2024, doi: 10.3390/pr12040684.
- [15] *Safety of Machinery — General Principles for Design — Risk Assessment and Risk Reduction*, ISO 12100:2010, 2010.
- [16] *Safety Solution Advanced Guide*, 1st ed., Kyoto, Japan: OMRON Corporation, 2018.
- [17] Pizzato Elettrica, “Introduction to safety engineering,” [Online]. Available: <https://www.pizzato.com/media/images/catalog/item/File/Pdf/Document/introdu>

บทความวิจัย (Research Article)

ction_safety.pdf. [Accessed: 15 May 2026].

- [18] *Safety of Machinery — Safety-Related Parts of Control Systems — Part 1: General Principles for Design*, ISO 13849-1:2023, 4th ed., 2023.