

วิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

The Operation of Pneumatic Impact Wrench Analysis by Fuzzy Logic System

ณัฐพงศ์ โชคสัมฤทธิ์ผล¹ อรรถสิทธิ์ วงศ์เจริญ¹ และเรวัฒน์ บุญจันทร์¹
Nuttapong Choksumrittipon¹, Athasit Wongcharoen¹ and Rewat Bunchan¹

¹เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Received: January 17, 2023

Revised: February 15, 2023

Accepted: February 20, 2023

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงคำนวณมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลม (pneumatic impact wrench) ที่เป็นเครื่องมือสำหรับการขันประกอบสลักเกลียวของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม โดยเป้าหมายของงานวิจัยต้องการหาทางเลือกใหม่สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของการขันประกอบสลักเกลียวด้วยบล็อกลมที่ไม่ต้องการตรวจสอบแรงบิดขั้นแน่นของสลักเกลียวโดยละเอียด ผลลัพธ์ของงานวิจัยมีโอกาสนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้กับระบบการป้องกันความผิดพลาด (ระบบโศคา-โยเกะ) ที่มีหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของจำนวนการครั้งในการขันประกอบสลักเกลียวด้วยบล็อกลมของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม โดยทำการวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมจากสัญญาณเซนเซอร์วัดความดันลม (pneumatic pressure sensor) ที่วัดความดันลมในระบบขณะที่บล็อกลมทำงานและทำการวิเคราะห์จากความดันลมที่เปลี่ยนแปลงไปชั่วขณะในช่วงเวลาที่บล็อกลมทำงาน โดยนำระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ (fuzzy logic system) มาเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือถือเป็นที่น่าสนใจ สามารถวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมได้ว่า เป็นกรณีแรงบิดขั้นแน่นหรือกรณีไม่เกิดแรงบิดขั้นแน่น จากผลการวิจัยพบว่า การวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือมีความเป็นไปได้ในการนำไปพัฒนาและใช้จริงในอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: บล็อกลม เซนเซอร์วัดความดันลม ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ แรงบิดขั้นแน่น ไม่เกิดแรงบิดขั้นแน่น ระบบโศคา-โยเกะ

Abstract

This research utilized computational analysis to examine how a pneumatic impact wrench, a common instrument for tightening bolt assemblies in the workplace, operates. The aim of this research is to discover a new substitute that does not necessitate a thorough analysis of the tightening torque of the bolt to confirm the accuracy of bolt tightening using the pneumatic impact wrench in the production process. The findings of this study may be used to improve the error prevention system (Poka Yoke), which is in charge of ensuring the precision of the number of attempts made during bolt assembly using a pneumatic impact wrench in industrial production. The operation of the pneumatic impact wrench is examined using a fuzzy logic system to assess the instantaneous change in air pressure during the pneumatic impact wrench operation from the pressure sensor signal that detects the air pressure in the system during the pneumatic impact wrench operation. The results of this analysis are acceptable and can be used to assess the tightening or loosening cases of a pneumatic impact wrench. The results showed that it was possible to apply the fuzzy logic system's pneumatic impact wrench analysis to industrial manufacturing.

Keywords: pneumatic impact wrench, pressure sensor, fuzzy logic system, tightening, untightening, Poka Yoke system



บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตมีความก้าวหน้าอย่างมากในทางด้านเทคโนโลยีการผลิตและหนึ่งในนั้นคือเทคโนโลยีการป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตที่มีมนุษย์ดำเนินงานในกระบวนการเนื่องจากความผิดพลาดในกระบวนการผลิตถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์ อาจจะทำให้เกิดความเสียหายในด้านความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ (Semsri, Suksukont, Sisamut & Pudtipatkosit, 2021) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ควรจะเกิดขึ้นถ้าเราสามารถป้องกันได้ ระบบโพคา-โยเกะ เป็นระบบป้องกันความผิดพลาดที่ได้รับ ความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมถูกนำมาใช้ในการป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากความไม่ได้ตั้งใจของ พนักงาน โดยส่วนใหญ่จะเป็นวิธีการควบคุมเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดจากกระบวนการ (Somsirikarnjanakoon, Prasopchaichana, Tongjiphitak, Suthachewa & Srikosak, 2018) และในกระบวนการประกอบชิ้นงานด้วย สลักเกลียวในปัจจุบันมีการใช้เครื่องมืออยู่หลายประเภท

ด้วยกัน เช่น บล็อกลม บล็อกไฟฟ้า เครื่องขันสลักเกลียว แบบนัทรีนเนอร์และเครื่องมือชนิดอื่น ๆ กระบวนการประกอบ สลักเกลียวที่ใช้บล็อกลมค่อนข้างเป็นที่นิยมเนื่องจากมีความรวดเร็วในการทำงานมากกว่าชนิดอื่น ๆ ในส่วนของการตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการขันประกอบ ด้วยบล็อกลมจะใช้ประแจวัดแรงบิด (torque wrench) ที่เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบความแน่นของสลักเกลียว (Xia, Xie & Wang 2019) และ (Xu, Zhao & Chen 2019) โดยเครื่องมือชนิดนี้จะถูกนำมาใช้หลังจากที่ได้ใช้บล็อกลม ประกอบชิ้นงานด้วยสลักเกลียวเสร็จสิ้น เบื้องต้นจะเห็นได้ว่า ในกระบวนการจะมีสองขั้นตอนด้วยกันคือกระบวนการ ประกอบและกระบวนการตรวจสอบ ซึ่งข้อดีของประแจ วัดแรงบิดคือสามารถตรวจสอบแรงบิดของสลักเกลียว ว่า เป็นแรงบิดขันแน่นได้อย่างละเอียด จะเหมาะสมกับ กระบวนการประกอบที่ให้ความสำคัญกับแรงบิดขันแน่นของ สลักเกลียว ตัวอย่างเช่น กระบวนการประกอบเครื่องยนต์ กระบวนการประกอบล้อรถยนต์ เป็นต้น ในด้านของข้อ เสียนี้ก็ต้องใช้สองขั้นตอนด้วยกันในกระบวนการ แต่

ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนในบางกระบวนการไม่จำเป็นต้องตรวจสอบแรงบิดขันแน่นของสลักเกลียวซ้ำ เนื่องจากว่าแรงบิดของบล็อกกลที่ใช้ในการขันสลักเกลียว นั้นเพียงพอสำหรับแรงบิดขันแน่นของสลักเกลียว (Lee, Talluri & Chung 2019) ต้องการเพียงจะตรวจสอบว่า การขันสลักเกลียวครบถูกต้องตามจำนวนในกระบวนการหรือไม่ ตัวอย่างเช่น กระบวนการประกอบแผ่นกันร้อนท่อไอเสีย และแผ่นเหล็กกันกระแทกใต้เครื่องยนต์ เป็นต้น

งานวิจัยนี้ต้องการหาทางเลือกในการตรวจสอบกระบวนการขันประกอบสลักเกลียวด้วยบล็อกกลในกระบวนการผลิตที่ไม่ต้องการตรวจสอบแรงบิดขันแน่นของสลักเกลียวโดยละเอียด เพียงต้องการทราบว่า ในการทำงานของบล็อกกลในแต่ละครั้งเป็นการทำงานในกรณีแรงบิดขันแน่นหรือไม่ เพื่อหาแนวทางการวิเคราะห์การทำงานของบล็อกกลไปพัฒนากับระบบการป้องกันความผิดพลาด (Poka-Yoke) ที่มีหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของจำนวนครั้งในการขันประกอบสลักเกลียวด้วยบล็อกกลของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เพื่อป้องกันความผิดพลาดของการขันประกอบสลักเกลียวในกระบวนการประกอบ

บล็อกกลหรือประแจลมเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับขันประกอบสลักเกลียว โดยมีหลักการทำงานคือให้ลมไหลผ่านไปที่โรเตอร์ จากนั้นโรเตอร์จะเกิดการหมุนและส่งกำลังไปที่ชุดลูกตี (hammer) ที่เชื่อมต่ออยู่กับแกน Anvil (Lee et al., 2019) ในขณะที่บล็อกกลทำงานในกรณีแรงบิดขันแน่นจะเกิดการกระแทกกันภายในชุดลูกตี ส่งผลให้โรเตอร์เกิดการหมุนและหยุดเป็นจังหวะตามจังหวะกระแทกของชุดลูกตีในช่วงการทำงานนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ของลมเกิดขึ้น ส่งผลให้ความดันลมในระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะนำความดันลมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในระบบในขณะนั้นมาทำการวิเคราะห์เพื่อทำการตรวจสอบการทำงานของบล็อกกล

ในการออกแบบระบบวิเคราะห์หรือระบบจำแนกประเภทนั้นมีวิธีการที่หลากหลายด้วยกัน เช่น วิธีการทางสถิติ (statistical approach) ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) และระบบอื่น ๆ จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการนำระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือเข้า

มาใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจจับ และจำแนกประเภท ซึ่งการนำมาประยุกต์ใช้ในงานจะมีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของงานที่นำไปวิเคราะห์ งานวิจัยของ Khalid, Yusof and Mokayed (2011) ทำการตรวจสอบลายเซ็นออนไลน์ด้วยการรวมตัวแยกประเภทสำหรับการตรวจสอบลายเซ็นและทำการสรุปผลด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยทำการวิเคราะห์จาก ระยะของลายเซ็น เวลาในการเซ็น ผลของการวิเคราะห์จากโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ (BPNN) และผลของการวิเคราะห์จากการแบ่งกลุ่มสัมพันธ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation classifier) ผลลัพธ์ของงานวิจัยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ให้ดีขึ้นได้โดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ และผลของการวิเคราะห์จากการแบ่งกลุ่มสัมพันธ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน งานวิจัยของ Anas (2016) ทำการตรวจจับขอบวัตถุที่อยู่ในรูปภาพด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยทำการนำระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือไปเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการตรวจจับขอบแบบเดิม ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจจับขอบวัตถุให้ดีขึ้นได้ งานวิจัยของ Pharne and Patil (2017) ทำการวินิจฉัยข้อบกพร่องของมอเตอร์ด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยทำการวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์และนำสัญญาณไปทำการวิเคราะห์ ผลลัพธ์ของงานวิจัยสามารถวินิจฉัยสถานะของมอเตอร์ได้ว่าอยู่ในเกณฑ์สภาพดี ยอมรับได้ ต้องได้รับการดูแล และยอมรับไม่ได้สามารถช่วยบุคลากรที่เกี่ยวข้องให้ทำการตรวจสอบและบำรุงรักษาก่อนที่จะเกิดความเสียหายได้ งานวิจัยของ Ülkir, Gökmen and Kaplanoğlu (2017); Karuna, Ganesh, Das and Kumar (2017) ใช้ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือวิเคราะห์สัญญาณคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (EMG) เพื่อทำการแบ่งประเภทของการเคลื่อนไหวของข้อมือ โดย Ülkir et al. (2017) นำสัญญาณมาทำการหาความถี่ด้วยวิธีการ Root Mean Square--RMS Wavelet Length--WL และ Kurtosis (Kurt) เพื่อเป็นอินพุตของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Karuna et al., 2017) นำสัญญาณมาทำการหาความถี่ด้วยวิธีการ Root Mean Square--RMS และนำค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณเป็นอินพุตของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ ผลลัพธ์ของ Ülkir et al. (2017) สามารถแยกประเภทของการงอข้อมือได้ 3

ระดับ และ Karuna et al. (2017) สามารถแยกประเภทของการรบกวนและการยึดข้อมือได้อย่างละ 3 ระดับ ทั้งสองงานวิจัยสรุปว่า ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือเป็นเครื่องมือที่ไม่จำเป็นต้องทำการสอน (training) ให้กับระบบ สามารถใช้งานได้ง่ายเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ งานวิจัยของ Buemi, Giacalone, Naccari and Spampinato (2016); Sahid and Alaydrus (2020) ใช้ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือตรวจจับการเกิดเพลิงไหม้ โดย Buemi et al. (2016) ทำการนำเสนอการตรวจจับการเกิดเพลิงไหม้จากวิดีโอด้วยฮอรัสอัลกอริทึม (Horus Algorithm) เป็นอัลกอริทึมที่มีการนำระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือไปค้นหาชุดของพิกเซล (Pixel) ในภาพที่อาจจะเกิดเพลิงไหม้ และนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทดสอบการเคลื่อนไหวของเปลวเพลิง เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดเพลิงไหม้ งานวิจัยของ Sahid and Alaydrus (2020) นำค่าจากเซนเซอร์ตรวจจับควัน เซนเซอร์วัดคาร์บอนไดออกไซด์ และเซนเซอร์ตรวจจับเปลวเพลิงเป็นอินพุตของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ และทำการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อการเกิดเพลิงไหม้ของอินพุตแต่ละชนิดเทียบกับเวลาเพื่อชี้แจงถึงประสิทธิภาพในการตรวจจับการเกิดเพลิงไหม้ของเซนเซอร์แต่ละชนิด งานวิจัยของ Kumar, Raj and Abarna (2018) ตรวจจับข้อผิดพลาดสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ ทำการวิเคราะห์จากค่ากระแสของขดลวดที่สเตเตอร์ (Stator) ทั้ง 3 เฟส และเวลาการทำงานของมอเตอร์ ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์สภาวะการทำงานของมอเตอร์ว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ อันตราย และอันตรายมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันมอเตอร์ไม่ให้เกิดความเสียหายได้ งานวิจัยของ Mendoza, Schweitzer and Weber (2019) ทำการตรวจจับการเกิดข้อผิดพลาดสำหรับการอาร์ค (Arc) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านด้วยตัวกรองคาลมานและระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าภายในบ้านเพื่อทำการวิเคราะห์ และทำการจำลองการอาร์คให้เกิดขึ้นเพื่อทำการจำลองสถานการณ์ ผลลัพธ์ในงานวิจัยสามารถช่วยให้ทราบถึงอาการของความผิดปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านที่เกิดขึ้นได้หลังจากมีการอาร์คเกิดขึ้นในระบบ งานวิจัยของ Gougam, Rahmoune,

Benazzouz and Merainani (2019) ทำการวินิจฉัยข้อบกพร่องของตลับลูกปืนตามการแยกคุณลักษณะของการแปลงเวฟเลตเชิงประจักษ์ (EWT) และระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือภายใต้สภาวะการทำงานที่ผันแปร โดยทำการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในขณะที่เครื่องจักรทำงาน และทำการนำสัญญาณที่วัดได้ไปแปลงเวฟเลตเชิงประจักษ์ เพื่อทำการแยกองค์ประกอบของความถี่ และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเป็นอินพุตของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ ผลลัพธ์ของงานวิจัยสามารถวินิจฉัยได้ว่า ตลับลูกปืนอยู่ในสภาวะปกติ ความผิดปกติที่เกิดจากวงแหวนชั้นนอก ความผิดปกติที่เกิดจากวงแหวนชั้นใน และความผิดปกติที่เกิดจากเม็ดลูกกลิ้ง

ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือเป็นวิธีที่มีความเรียบง่ายในการใช้งาน เป็นวิธีที่สามารถจัดการกับความซับซ้อนของระบบได้เป็นอย่างดี (Ülkir et al., 2017) และไม่มีฟังก์ชันการวิเคราะห์ที่ยู่ยากในระบบ ดังนั้นระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือจึงมีศักยภาพสูงและเป็นตัวเลือกที่ดีในการนำมาสร้างระบบวิเคราะห์ (Sahid & Alaydrus, 2020) จากเหตุผลข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือมาเป็นเครื่องมือวิเคราะห์การทำงานของบล็อกกลม และนอกจากนั้นระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือมีพื้นฐานจากคณิตศาสตร์ จึงสามารถนำระบบการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ไปต่อยอดพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์ให้สามารถใช้ได้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตได้

ในงานวิจัยนี้แนะนำวิธีการวิเคราะห์การทำงานของบล็อกกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ เพื่อวิเคราะห์การทำงานของบล็อกกลม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย บล็อกกลม เซนเซอร์วัดความดันลม ดิจิตัลเพรชเชอร์สวิตช์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ บล็อกกลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ บล็อกกลมยี่ห้อ Kuani รุ่น KI-1308 แสดงดังภาพ 1 เซนเซอร์วัดความดันลมยี่ห้อ SMC รุ่น PSE-530 วัดความดันช่วง 0 ถึง 10 บาร์

อนาล็อกเอาต์พุต 1 ถึง 5 โวลต์ ทำหน้าที่วัดความดันลม ในขณะที่บล็อกลมทำงานแสดงดังภาพ 2 ดิจิตัลเพรชเชอร์ สวิตช์ ยี่ห้อ Airtac รุ่น DPSN1-10020 ใช้สำหรับแสดงค่า ความดันลมในระบบและสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันลม ก่อนใช้งาน แสดงดังภาพ 3 และไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega2560 ทำหน้าที่อ่านค่าความดันลมจาก เซนเซอร์วัดความดันลมและส่งให้คอมพิวเตอร์ทำการ วิเคราะห์แสดงดังภาพ 4

โดยในส่วนของอุปกรณ์จะมีการเชื่อมต่อกันดังนี้ ระบบ Pneumatic จะนำเซนเซอร์วัดความดันลมต่อเข้ากับ ระบบลมของบล็อกลม ดังภาพ 5 เพื่อวัดความดันลมของ ระบบในขณะที่บล็อกลมทำงานและใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ อ่านค่าความดันของลมในระบบจากเซนเซอร์วัดความดันลม และนำค่าความดันลมที่อ่านได้มาทำการวิเคราะห์ ดัง ภาพ 6

ในส่วนของการวิเคราะห์สัญญาณจะสร้างระบบ วิเคราะห์สัญญาณด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือโดยใช้ โปรแกรม MATLAB ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณแสดง ดังภาพ 7



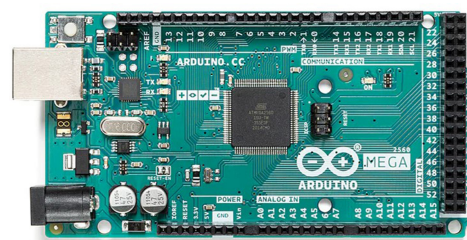
ภาพ 1 บล็อกลมยี่ห้อ Kuani รุ่น KI-1308



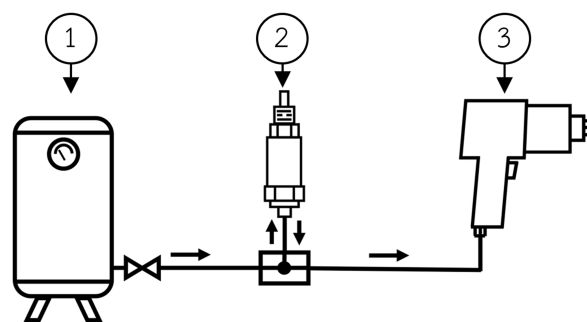
ภาพ 2 เซนเซอร์วัดความดันลมยี่ห้อ SMC รุ่น PSE-530



ภาพ 3 ดิจิตัลเพรชเชอร์สวิตช์ยี่ห้อ Airtac รุ่น DPSN1-10020



ภาพ 4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega2560

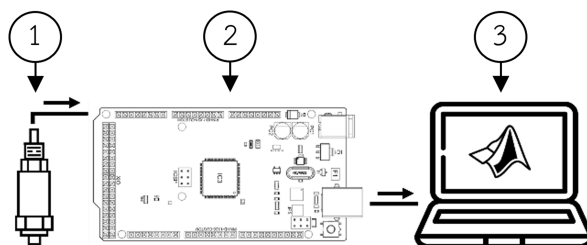


ภาพ 5 ภาพแสดงระบบ Pneumatic

จากภาพ 5 หมายเลข 1 คือ แหล่งจ่ายลม

หมายเลข 2 คือ เซนเซอร์วัดความดันลม

หมายเลข 3 คือ บล็อกลม

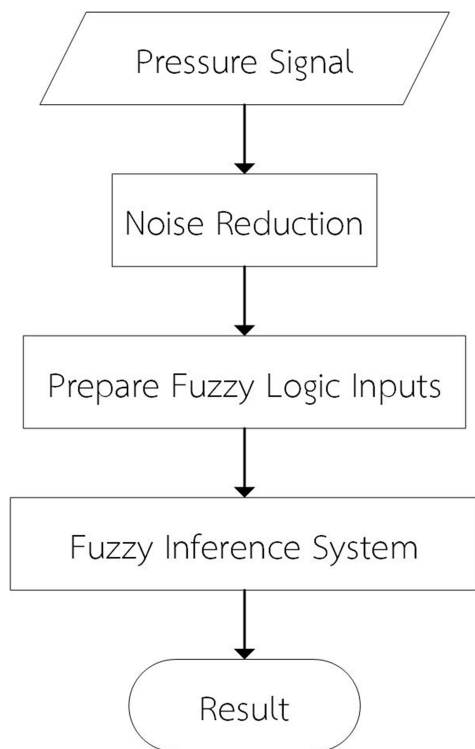


ภาพ 6 ภาพแสดงการต่อเซนเซอร์วัดความดันลมกับไมโคร คอนโทรลเลอร์และเครื่องคอมพิวเตอร์

จากภาพ 6 หมายเลข 1 คือ เซนเซอร์วัดความดันลม

หมายเลข 2 คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์

หมายเลข 3 คือ เครื่องคอมพิวเตอร์



ภาพ 7 แสดงลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณ จากภาพ 7 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณจะมีอยู่ 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 1.รับสัญญาณจากเซนเซอร์วัดความดันลม
 - 2.การกรองสัญญาณรบกวน
 - 3.การเตรียมอินพุตสำหรับระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ
 - 4.ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ
- โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะแสดงในหัวข้อถัดไป

2. การกรองสัญญาณรบกวน

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวกรองคาลมานมิติเดียว (1D-Kalman Filter) ในการกรองสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณของเซนเซอร์วัดความดันลม ตัวกรองคาลมานมิติเดียวมีสมการดังนี้ Marselli, Daudet, Amann and Pellandini (1998); Roveda, Riva, Bucca and Piga (2021)

$$f_n = f_{(n-1)} + k_n (p_n - f_{(n-1)}) \quad (1)$$

เมื่อ f_n คือ ค่าสัญญาณที่ทำการกรองเสร็จสิ้น

$f_{(n-1)}$ คือ ค่าสัญญาณที่ทำการกรองเสร็จสิ้นในรอบก่อน

k_n คือ ค่า Kalman Gain

p_n คือ ค่าสัญญาณจากเซนเซอร์

3. การเตรียมข้อมูลอินพุตสำหรับระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

การเตรียมข้อมูลอินพุตในขั้นตอนแรกจะเป็นการแยกสัญญาณในช่วงที่บล็อกลมทำงานออกจากสัญญาณทั้งหมด และขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนการเตรียมข้อมูลอินพุตสำหรับระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลอินพุตสำหรับระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นจะเป็นการแยกปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อการวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลม โดยสิ่งที่เป็นปัจจัยหลักของการวิเคราะห์มีดังนี้

1. ขนาดระยะห่างของท่อลมระหว่างบล็อกลมและเซนเซอร์วัดความดันลม
2. ระยะเวลาการทำงานของบล็อกลม
3. จำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในขณะที่บล็อกลมทำงาน
4. พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นต่อ 1 ลูกคลื่น

โดยปัจจัยในข้อ 1 นั้นเป็นปัจจัยภายนอกที่สามารถระบุได้ ส่วนข้อ 2 ถึงข้อ 4 เป็นปัจจัยที่เกิดขึ้นจากการวัดความดันลมในขณะที่บล็อกลมทำงาน ต้องทำการแยกออกมาจากสัญญาณของเซนเซอร์วัดความดันลม โดยแต่ละปัจจัยมีวิธีการเตรียมข้อมูลที่แตกต่างกัน แสดงดังต่อไปนี้

3.1 การแยกสัญญาณ

การแยกสัญญาณคือการนำสัญญาณในช่วงที่ต้องการวิเคราะห์ออกมาจากสัญญาณทั้งหมด และสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ คือ สัญญาณในช่วงที่บล็อกลมทำงาน จะอยู่ในช่วงที่บล็อกลมมีอัตราการไหลจนถึงจุดคงที่ แสดงดังภาพ 8 (ก) หมายเลข 2

สัญญาณที่แยกออกมาวิเคราะห์จะอยู่ระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของการแยกสัญญาณ เงื่อนไขของการแยกสัญญาณ ดังนี้

$$Signal = \begin{cases} \beta < 30^\circ \\ Signal = Signal_{[\beta-\alpha]} \\ \alpha > 80^\circ \end{cases} \quad (2)$$

3.2 ระยะเวลาการทำงานของบล็อกลม

สามารถหาได้จากเวลาของจุดเริ่มต้นลบกับเวลาของจุดสิ้นสุดของสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์

$$t_{op} = t_{start} - t_{end} \quad (3)$$

3.3 จำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในสัญญาณ

จำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในสัญญาณสามารถใช้วิธีการหาจุดยอดของลูกคลื่นและทำการหาค่าสะสมของจำนวนจุดยอดลูกคลื่นเพื่อหาจำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในสัญญาณ

วิธีการหาจุดยอดของลูกคลื่นจะใช้วิธีค้นหาค่าประกอบสูงสุดของลูกคลื่นนั้น ๆ มีวิธีการ ดังนี้

$$peak = \begin{cases} f_n \geq f_{n-1} \\ peak = f_n \\ f_n \geq f_{n+1} \end{cases} \quad (4)$$

เมื่อ $peak$ คือ จุดยอดของลูกคลื่น

f_n คือ สัญญาณปัจจุบัน

$f_{(n+1)}$ คือ สัญญาณในรอบถัดไป

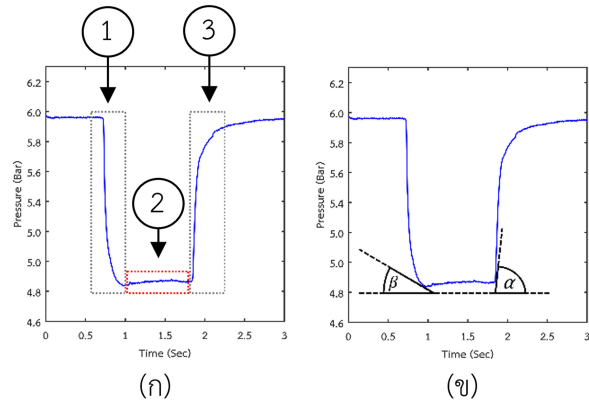
$f_{(n-1)}$ คือ สัญญาณในรอบที่แล้ว

วิธีการหาค่าสะสมของจำนวนจุดยอดลูกคลื่นมีวิธีการ ดังนี้

$$n_w = peak_n + peak_{n+1} + peak_{n+...n} \quad (5)$$

เมื่อ n_w คือ จำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในสัญญาณ

$peak_n$ ถึง $peak_{(n+...n)}$ คือ จุดยอดของลูกคลื่นที่หาได้จากสมการที่ (4)



ภาพ 8 ภาพ (ก) แสดงช่วงการทำงานของบล็อกลม ภาพ (ข) แสดงวิธีการแยกสัญญาณในช่วงที่บล็อกลมทำงาน

จากภาพ 8 หมายเลข 1 คือ ช่วงเริ่มกดวาล์วบล็อกลมและบล็อกลมเริ่มมีอัตราการไหลเกิดขึ้น

หมายเลข 2 คือ ช่วงที่บล็อกลมมีอัตราการไหลจนถึงจุดคงที่

หมายเลข 3 คือ ช่วงปล่อยวาล์วบล็อกลมเป็นช่วงที่บล็อกลมไม่มีอัตราการไหลเกิดขึ้น การแยกสัญญาณในช่วงที่บล็อกลมทำงานออกมาเพื่อทำการวิเคราะห์ สามารถทำได้จากการตรวจสอบความลาดเอียงของสัญญาณ (Jumahat, Beng, Misran, Islam & Mahri, 2019) โดยทำการคำนวณหามุม β เพื่อหาจุดเริ่มต้นของการแยกสัญญาณ และคำนวณหามุม α เพื่อหาจุดสิ้นสุดของการแยกสัญญาณ จากภาพ 8 เห็นได้ว่าลักษณะสัญญาณในช่วงระหว่างหมายเลข 1 ก่อนเข้าสู่หมายเลข 2 สัญญาณมีความลาดเอียงน้อยลงเข้าใกล้ 0 องศา พบว่า ที่มุม β มีค่าน้อยกว่า 30 องศา เป็นการเริ่มเข้าสู่ช่วงการทำงานของบล็อกลม และลักษณะสัญญาณในช่วงระหว่างหมายเลข 2 ก่อนเข้าสู่หมายเลข 3 สัญญาณมีความลาดเอียงเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ 90 องศา พบว่า ที่มุม α มีค่ามากกว่า 80 องศา เป็นช่วงที่บล็อกลมหยุดการทำงาน

3.4 พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น

พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นหมายถึงขนาดเฉลี่ยพื้นที่ของคลื่นความดันลมที่เกิดขึ้นในขณะที่บล็อกลมทำงาน โดยในกรณีแรงบิดขึ้นแน่นอนจะมีขนาดเฉลี่ยของลูกคลื่นมากกว่ากรณีไม่ได้เป็นแรงบิดขึ้นแน่นอน เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของความดันลมจากการกระทบของลูกตี (hammer) ในขณะที่เกิดแรงบิดขึ้นแน่นอน และพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นมี

ขนาดแตกต่างกันไปตามความยาวของสายลม ในการหาพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นใช้วิธีการหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยปริพันธ์ และในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการประมาณปริพันธ์ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูและทำการหาค่าเฉลี่ยพื้นที่ของลูกคลื่นที่เกิดขึ้นทั้งหมดในสัญญาณเพื่อทำการหาพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น

วิธีการประมาณปริพันธ์ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูมีสมการ ดังนี้ Ratanaprasert, Ananchuen, Chumchob, Supaporn and Howsud (2016)

$$wa = \frac{b-a}{2n} [f(x_0) + 2f(x_1) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)] \quad (6)$$

เมื่อ wa คือ พื้นที่ของลูกคลื่นนั้น ๆ

b คือ จุดเริ่มต้นของลูกคลื่น

a คือ จุดสิ้นสุดของลูกคลื่น

n คือ จำนวนจุดของสัญญาณในลูกคลื่น

$f(x_0)$ ถึง $f(x_n)$ คือ ค่าความดันลมในช่วงเวลานั้น ๆ ลบกับค่าความดันลมตำแหน่งแรกของลูกคลื่นนั้น ๆ

การหาค่าเฉลี่ยพื้นที่ของลูกคลื่นที่เกิดขึ้นทั้งหมดในสัญญาณมีสมการ ดังนี้

$$x_{wa} = \frac{wa_n + wa_{n+1} + wa_{[n+...n]}}{n}$$

เมื่อ x_{wa} คือ ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของลูกคลื่นที่เกิดขึ้นทั้งหมดในสัญญาณ

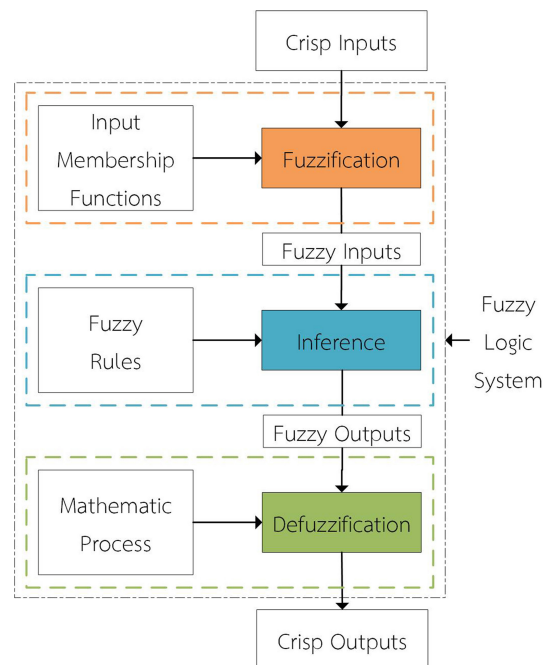
$wa_{[n...]}$ คือ พื้นที่ของลูกคลื่นนั้น ๆ

n คือ จำนวนลูกคลื่นทั้งหมดที่เกิดขึ้นในสัญญาณ

4. ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือเพื่อวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยชุดข้อมูลตัวอย่างจำนวน 100 ข้อมูล แบ่งเป็นกรณีไม่เกิดแรงบิดขั้นแน่น 50 ข้อมูล และกรณีแรงบิดขั้นแน่น 50 ข้อมูล

ขั้นตอนการสร้างระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลม ในงานวิจัยนี้ใช้ Fuzzy Logic Designer ที่เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือของโปรแกรม MATLAB ในการสร้างระบบวิเคราะห์และใช้ระบบกฎฟัซซีแบบแมมดานิ (Mamdani) โดยโครงสร้างพื้นฐานของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักด้วยกัน คือ การแปลงข้อมูลอินพุตทั่วไปให้เป็นอินพุตแบบฟัซซี (Fuzzification) การวินิจฉัยหรือการตีความ (inference) และการสรุปเหตุผล (defuzzification) (Pratumsuwan, 2018; Gougam et al., 2019) แสดงดังภาพ 9



ภาพ 9 โครงสร้างพื้นฐานของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ขั้นตอนการสร้างระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือในโปรแกรม MATLAB มีอยู่ 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ด้วยกัน

1. Fuzzification จะเป็นการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) ของข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุต
2. Inference จะเป็นการสร้างกฎฟัซซี (Fuzzy Rule) สำหรับวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลม
3. Defuzzification คือกระบวนการสรุปเหตุผลของตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือกระบวนการแปลงเอาต์พุต

4.1 สร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function)

ในงานวิจัยนี้มีอินพุตสำหรับระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมทั้งหมดจำนวน 4 อินพุต และมีเอาต์พุตของระบบจำนวน 1 เอาต์พุต มีการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้งหมด 5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ในแต่ละฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะมีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะเฉพาะของอินพุตแต่ละชนิด โดยการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามารถสร้างได้จากการหาค่าเฉลี่ย ค่ามากที่สุด และค่าน้อยที่สุด จากตัวอย่างข้อมูล และทำการปรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้เหมาะสมกับระบบวิเคราะห์จากการหาช่วงข้อมูลที่ทับซ้อนกันของแต่ละฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

จากภาพ 10 ค่าความเป็นสมาชิกของความยาวท่อลมสามารถกำหนดได้ ดังนี้ VS--Very Short S--Short M--Medium L--Long และ VL--Very Long โดยแต่ละกลุ่มจะมีค่าความยาวท่อลมและชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ดังนี้

$$\begin{aligned}VS &= [0 \ 0 \ 2 \ 4] \text{ ชนิด trapmf} \\S &= [2 \ 4 \ 6] \text{ ชนิด trimf} \\M &= [4 \ 6 \ 8] \text{ ชนิด trimf} \\L &= [6 \ 8 \ 10] \text{ ชนิด trimf} \\VL &= [8 \ 10 \ 12 \ 12] \text{ ชนิด trapmf}\end{aligned}$$

จากภาพ 11 ค่าความเป็นสมาชิกของระยะเวลาการทำงานสามารถกำหนดได้ ดังนี้ VS--Very Short S--Short M--Medium และ L--Long โดยแต่ละกลุ่มจะมีระยะเวลาและชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ดังนี้

$$\begin{aligned}VS &= [0 \ 0 \ 0.5 \ 1] \text{ ชนิด trapmf} \\S &= [0.5 \ 1.25 \ 2] \text{ ชนิด trimf} \\M &= [1 \ 2 \ 3] \text{ ชนิด trimf} \\L &= [2 \ 3 \ 5 \ 5] \text{ ชนิด trapmf}\end{aligned}$$

จากภาพ 12 ค่าความเป็นสมาชิกของจำนวนลูกคลื่นสามารถกำหนดได้ดังนี้ L--Little M--Medium และ AL--A lot โดยแต่ละกลุ่มจะมีจำนวนลูกคลื่นและชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ดังนี้

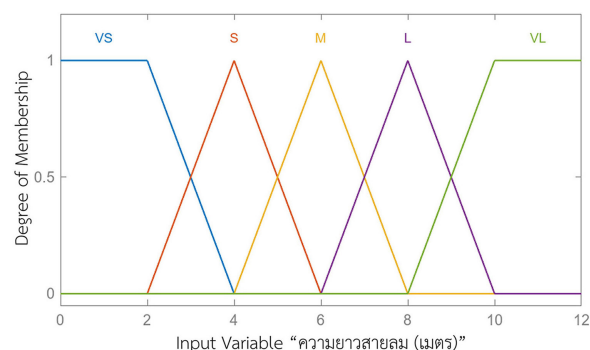
$$\begin{aligned}L &= [0 \ 0 \ 20 \ 30] \text{ ชนิด trapmf} \\M &= [20 \ 30 \ 50] \text{ ชนิด trimf} \\AL &= [30 \ 50 \ 120 \ 120] \text{ ชนิด trapmf}\end{aligned}$$

จากภาพ 13 ค่าความเป็นสมาชิกของระยะเวลาการทำงานสามารถกำหนดได้ ดังนี้ VS--Very Small S--Small M--Medium L--Large และ VL--Very Large โดยแต่ละกลุ่มจะมีพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นและชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ดังนี้

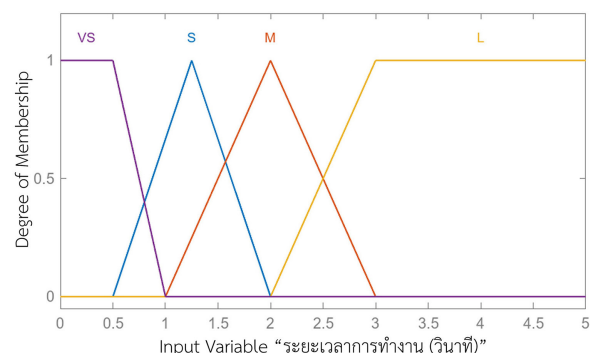
$$\begin{aligned}VS &= [0 \ 0 \ 0.01 \ 0.02] \text{ ชนิด trapmf} \\S &= [0.015 \ 0.02 \ 0.03 \ 0.04] \text{ ชนิด trapmf} \\M &= [0.02 \ 0.04 \ 0.06 \ 0.08] \text{ ชนิด trapmf} \\L &= [0.04 \ 0.065 \ 0.085 \ 0.12] \text{ ชนิด trapmf} \\VL &= [0.08 \ 0.1 \ 0.3 \ 0.3] \text{ ชนิด trapmf}\end{aligned}$$

จากภาพ 14 ค่าความเป็นสมาชิกของผลการวิเคราะห์สามารถกำหนดได้ดังนี้ U--Untightening F--Fuzzy และ T--Tightening โดยแต่ละกลุ่มจะมีค่าผลการวิเคราะห์และชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ดังนี้

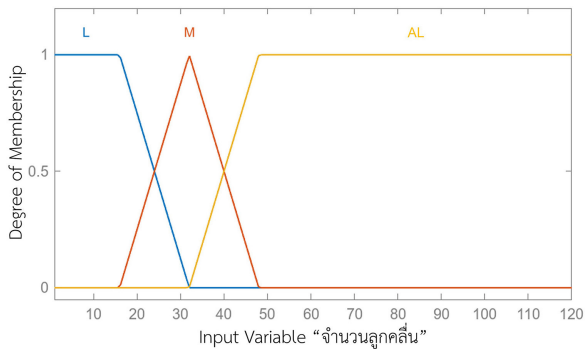
$$\begin{aligned}U &= [0 \ 0 \ 0.2 \ 0.5] \text{ ชนิด trapmf} \\F &= [0.25 \ 0.5 \ 0.75] \text{ ชนิด trimf} \\T &= [0.5 \ 0.8 \ 1 \ 1] \text{ ชนิด trapmf}\end{aligned}$$



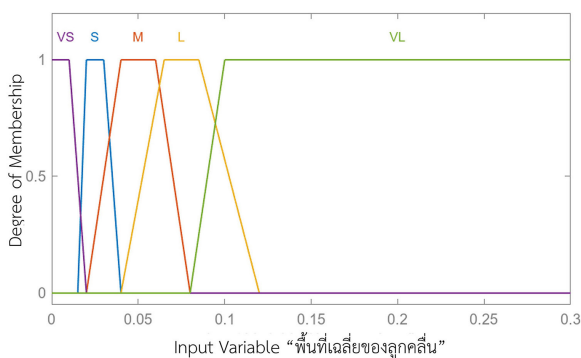
ภาพ 10 แสดงการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความยาวท่อลม



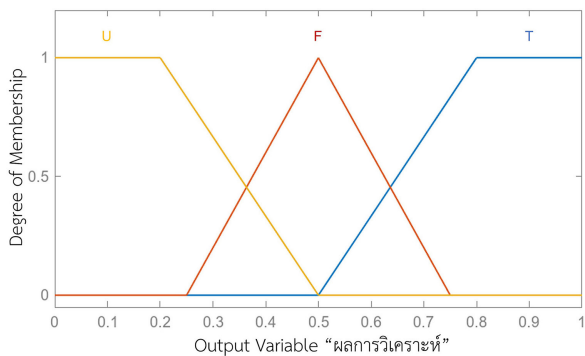
ภาพ 11 แสดงการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระยะเวลาการทำงานของบล็อกลม



ภาพ 12 แสดงการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของจำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในสัญญาณ



ภาพ 13 แสดงการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในสัญญาณ



ภาพ 14 แสดงการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของผลการวิเคราะห์

4.2 กฎฟัซซี (Fuzzy Rule)

การสร้างกฎฟัซซีสำหรับการวิเคราะห์การทำงานของบล็อกสามารถแบ่งความสัมพันธ์ของอินพุตได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้ กลุ่มแรก คือ ความยาวท่อลมและพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น และกลุ่มที่สอง คือ ระยะเวลาการทำงานและจำนวนลูกคลื่น

4.2.1 สร้างกฎจากความยาวท่อลมและพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น

ความสัมพันธ์ของระยะความยาวท่อลมและพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นมีความแปรผกผันต่อกัน เมื่อท่อลมมีความยาวมากขึ้นความสูงของลูกคลื่นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความดันจะมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ขนาดพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นจะมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย สามารถอธิบายได้จากสมการสูญเสียความดันเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อมีสมการ ดังนี้ Brkić (2011)

$$\Delta p = \frac{LfV^2\rho}{2D_{in}} \quad (8)$$

เมื่อ Δp คือ ความดันที่สูญเสีย (Bar)

f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหลแบบราบเรียบ

L คือ ความยาวของท่อลม (เมตร)

V คือ ความเร็วของการไหลเฉลี่ยผ่านท่อ (m/s)

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว (kg/m³)

D_{in} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (เมตร)

กฎจากความยาวท่อลมและพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นสามารถสร้างได้ ดังนี้

จากตาราง 1 การสร้างกฎจากความยาวท่อลมและพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นสามารถสร้างกฎได้ทั้งหมด 25 ข้อ

4.2.2 สร้างกฎจากระยะเวลาการทำงานและจำนวนของลูกคลื่น

ความสัมพันธ์ของระยะเวลาการทำงานกับจำนวนของลูกคลื่นมีความแปรผันตรงต่อกัน เมื่อระยะเวลาการทำงานมากขึ้นจำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

กฎจากระยะเวลาการทำงานและจำนวนของลูกคลื่นสามารถสร้างได้ ดังนี้

จากตาราง 2 การสร้างกฎจากระยะเวลาการทำงานและจำนวนของลูกคลื่นสามารถสร้างกฎได้ทั้งหมด 12 ข้อ

ตาราง 1

แสดงการสร้างกฎจากความยาวท่อลมและพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น

Rule		พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น				
		VS	S	M	L	VL
ความยาวท่อลม	VS	U	U	U	F	T
	S	U	U	F	T	F
	M	U	F	T	T	F
	L	U	T	T	T	U
	VL	U	T	T	F	U

ตาราง 2

แสดงการสร้างกฎจากระยะเวลาการทำงานและจำนวนของลูกคลื่น

Rule		จำนวนลูกคลื่น		
		L	M	AL
ระยะเวลา	VS	U	U	U
	S	T	T	U
	M	M	T	M
	L	U	M	T

4.3 การแปลงเอาต์พุต (Defuzzification)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการหาจุดศูนย์กลาง (Central of Gravity--COG) มีสมการ ดังนี้ Gougam et al. (2019)

$$COG = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i w_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (9)$$

เมื่อ COG คือ ค่าของจุดศูนย์กลาง
 N คือ ค่าตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ i
 α_i คือ ค่าฟัซซีของเอาต์พุตในเซตฟัซซีตำแหน่งที่ i
 w_i คือ พื้นที่ใต้โค้งของเซตฟัซซีตำแหน่งที่ i

โดยค่า COG จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการทำงานของบล็อกลมว่า เป็นการทำงานในกรณีไม่เกิดแรงบิตชันแน่นหรือเป็นการทำงานในกรณีแรงบิตชันแน่น ค่า COG ต่อผลการวิเคราะห์หมีเงื่อนไข ดังนี้

1.การทำงานในกรณีไม่เกิดแรงบิตชันแน่นจะมีค่า $COG \leq 0.5$

2.การทำงานในกรณีแรงบิตชันแน่นจะมีค่า $COG > 0.5$

การกำหนดค่า COG สำหรับผลการวิเคราะห์นั้น มาจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของผลการวิเคราะห์ โดยในจุดที่ค่าความเป็นสมาชิกของ F--Fuzzy เท่ากับ 1 มีค่าของผลการวิเคราะห์เท่ากับ 0.5 และเมื่อผลรวมของค่า COG ออกมามีค่ามากกว่า 0.5 สามารถตีความได้ว่าการวิเคราะห์ของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นมีค่ามากกว่าความคลุมเครือ ผลการวิเคราะห์จึงจัดอยู่ในกรณีแรงบิตชันแน่น

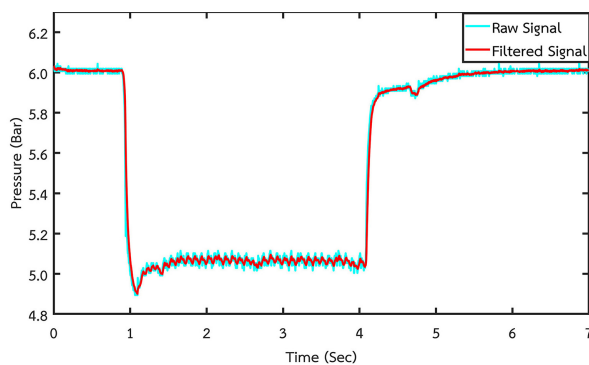
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. การกรองสัญญาณรบกวน

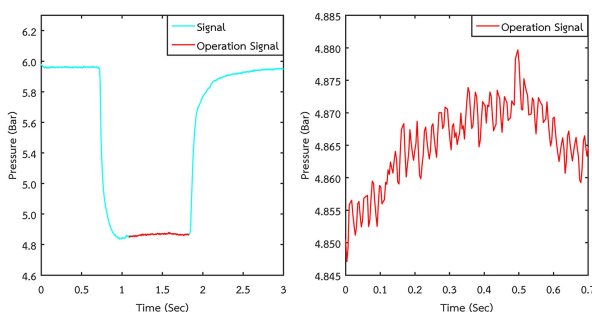
ผลของการใช้ตัวกรองคาลมานมิติเดียว (1D-Kalman Filter) ในการกรองสัญญาณรบกวน แสดงดังภาพ 15 พบว่าตัวกรองสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้สามารถทำการหาจำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในสัญญาณได้ดีขึ้น เนื่องจากได้ทำการกำจัดลักษณะของสัญญาณที่ไม่สามารถคาดคะเนแบบแผนของการเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนที่ส่งผลต่อเงื่อนไขของการตรวจจับลูกคลื่นได้โดยต้องกำหนดค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนของ k_n ให้เหมาะสมกับระบบ การกำหนดค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการทดสอบการกำหนดค่าเพื่อหาค่าที่เหมาะสม พบว่าค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเท่ากับ 0.05 ถึงจะให้ผลการกรองที่เหมาะสมที่สุด สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ และยังคงไว้ซึ่งลักษณะที่สำคัญต่อการวิเคราะห์สัญญาณ

2. การแยกสัญญาณ

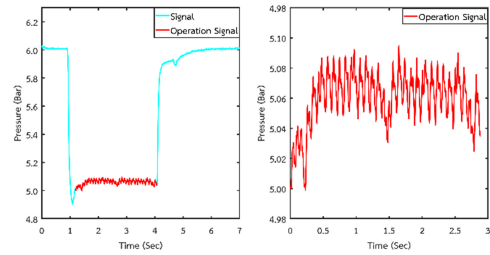
การแยกสัญญาณในช่วงที่บล็อกลมทำงานเพื่อทำการวิเคราะห์ ภาพ 16 แสดงการแยกสัญญาณช่วงที่บล็อกลมทำงานในกรณีไม่เกิดแรงบดขั้้นแน่น และภาพ 17 แสดงการแยกสัญญาณช่วงที่บล็อกลมทำงานในกรณีแรงบดขั้้นแน่น โดยภาพรวมของสัญญาณของทั้งสองกรณีแสดงดังภาพ 16 (ก) และภาพ 17 (ก) สัญญาณในช่วงที่บล็อกลมทำงานแสดงดังภาพ 16 (ข) และภาพ 17 (ข) โดยความแตกต่างที่สามารถจำแนกทั้งสองกรณีออกจากกันได้ คือ ระยะเวลาในการทำงาน และพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น โดยในกรณีแรงบดขั้้นแน่นจะมีระยะเวลาการทำงานที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 1-1.5 วินาทีขึ้นไป และพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นจากภาพ 16 (ข) พบว่า มีพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นอยู่ที่ 0.012376 ตารางหน่วย ซึ่งน้อยกว่ากรณีแรงบดขั้้นแน่น ในภาพ 17 (ข) ที่มีพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นอยู่ที่ 0.09727 ตารางหน่วย



ภาพ 15 แสดงลักษณะสัญญาณก่อนและหลังการทำการกรองสัญญาณ



ภาพ 16 แสดงลักษณะสัญญาณในกรณีไม่เกิดแรงบดขั้้นแน่นที่ระยะท่อลม 6 เมตร ภาพ (ก) แสดงภาพรวมของสัญญาณ ภาพ (ข) แสดงสัญญาณช่วงที่บล็อกลมทำงาน



ภาพ 17 แสดงลักษณะสัญญาณในกรณีแรงบดขั้้นแน่นที่ระยะท่อลม 6 เมตร ภาพ (ก) แสดงภาพรวมของสัญญาณ ภาพ (ข) แสดงสัญญาณช่วงที่บล็อกลมทำงาน

3. ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

การวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือในกรณีไม่เกิดแรงบดขั้้นแน่นจากสัญญาณในภาพ 16 สามารถแจกแจงอินพุตได้ ดังนี้

ความยาวท่อลม = 6 เมตร

พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น = 0.012376 ตารางหน่วย

จำนวนลูกคลื่น = 17 ลูก

ระยะเวลา = 0.7385 วินาที

สัญญาณจากภาพ 16 ตรงกับกฎฟัซซี่ทั้งหมด 4 ข้อด้วยกัน มีดังนี้

1. If จำนวนลูกคลื่น is L and ระยะเวลา is S then Output is T.
2. If จำนวนลูกคลื่น is M and ระยะเวลา is S then Output is T.
3. If จำนวนลูกคลื่น is M and ระยะเวลา is VS then Output is U.
4. If ความยาวท่อลม is M and พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น is VS then Output is U.

จากอินพุตของสัญญาณและกฎของฟัซซี่ที่กล่าวมาข้างต้น ค่าความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังภาพ 18 และในส่วนของการแปลงเอาต์พุต (defuzzification) ของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของการขั้้นแน่นออกมาได้เท่ากับ

0.397 ผลการวิเคราะห์ที่อยู่ในเกณฑ์ของการทำงานกรณีไม่เกิดแรงบดขั้้นแน่น

การวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือในกรณีแรงบดขั้้นแน่นจากสัญญาณในภาพ 17 สามารถแจกแจงอินพุตได้ ดังนี้

ความยาวท่อลม = 6 เมตร

พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น = 0.060554 ตารางหน่วย

จำนวนลูกคลื่น = 49 ลูก

ระยะเวลา = 2.877 วินาที

สัญญาณจากภาพ 17 ตรงกับกฎฟัซซี่ทั้งหมด 4 ข้อด้วยกัน มีดังนี้

1. If จำนวนลูกคลื่น is AL and ระยะเวลา is M then Output is F.

2. If จำนวนลูกคลื่น is AL and ระยะเวลา is M then Output is T.

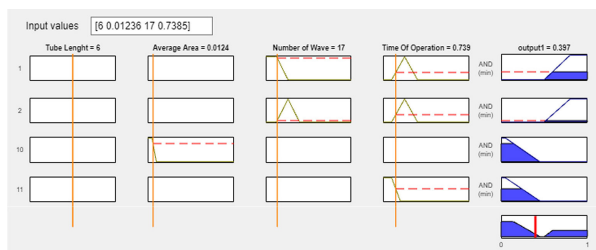
3. If ความยาวท่อลม is M and พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น is M then Output is T.

4. If ความยาวท่อลม is M and พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น is L then Output is T.

จากอินพุตของสัญญาณและกฎของฟัซซี่ที่กล่าวมาข้างต้น ค่าความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังภาพ 19 และในส่วนของการแปลงเอาต์พุต (defuzzification) ของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของการขึ้นแน่นออกมาได้เท่ากับ 0.781 ผลการวิเคราะห์ที่อยู่ในเกณฑ์ของการทำงานกรณีแรงบดขั้้นแน่น

ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถจัดการกับอินพุตในส่วนของการสัมพันธ์ของระยะความยาวท่อลม และพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นมีความแปรผกผันต่อกันได้เป็นอย่างดี จากภาพ 20 จะเห็นได้ว่าพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นจะมีขนาดเล็กลงตามความยาวท่อลมที่เพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ย ค่ามากที่สุด และค่าน้อยที่สุดของพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นต่อความยาวท่อลม แสดงดังตาราง 3

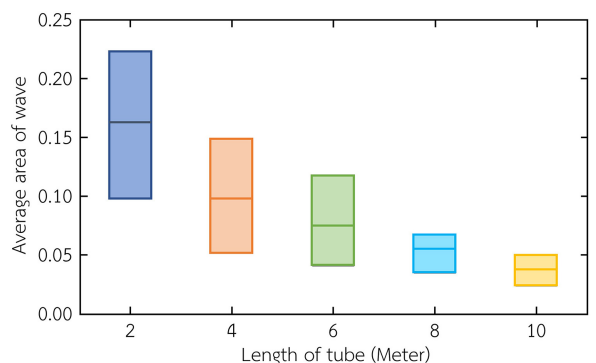
จากสัญญาณในภาพ 21 (ก) แสดงลักษณะภาพรวมสัญญาณในกรณีแรงบดขั้้นแน่นที่ท่อลมระยะ 2 เมตร และภาพ 22 (ก) แสดงลักษณะภาพรวมสัญญาณในกรณีแรงบดขั้้นแน่นที่ท่อลมระยะ 10 เมตร พบว่า สัญญาณที่ท่อลมระยะ 2 เมตร จากภาพ 21 (ข) มีพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นอยู่ที่ 0.20604 ตารางหน่วย และสัญญาณที่ท่อลมระยะ 10 เมตร จากภาพ 22 (ข) มีพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นอยู่ที่ 0.036391 ตารางหน่วย สามารถสรุปได้ว่าระยะความยาวของท่อลมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นมีขนาดเล็กลง ดังข้อมูลที่แสดงในตาราง 3



ภาพ 18 แสดง Fuzzy Rule Inference ของการวิเคราะห์การทำงานในกรณีไม่เกิดแรงบดขั้้นแน่น



ภาพ 19 แสดง Fuzzy Rule Inference ของการวิเคราะห์การทำงานในกรณีแรงบดขั้้นแน่น

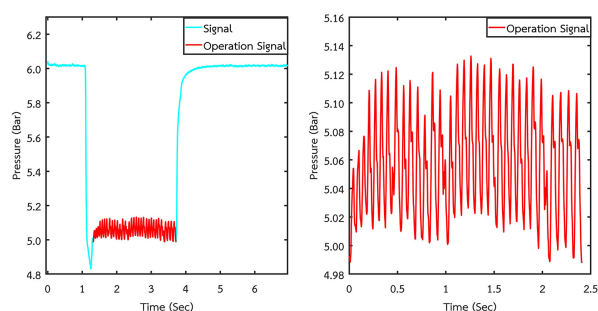


ภาพ 20 แสดงพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นต่อความยาวท่อลม

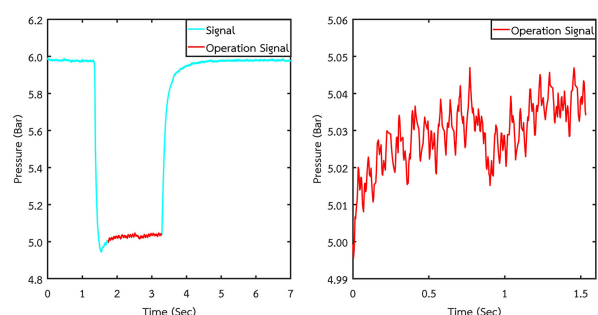
ตาราง 3

แสดงค่าเฉลี่ย ค่ามากที่สุด และค่าน้อยที่สุด ของพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นต่อความยาวท่อลม

ความยาวของท่อลม (เมตร.)	พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น		
	Max.	Min.	Mean.
2	0.2221	0.0987	0.1636
4	0.1476	0.0530	0.0987
6	0.1172	0.0418	0.0745
8	0.0660	0.0356	0.0561
10	0.0495	0.0249	0.0395



ภาพ 21 แสดงลักษณะสัญญาณในกรณีแรงบิดขั้นแน่นที่ระยะท่อลม 2 เมตร ภาพ (ก) แสดงภาพรวมของสัญญาณ ภาพ (ข) แสดงสัญญาณช่วงที่บล็อกลมทำงาน



ภาพ 22 แสดงลักษณะสัญญาณในกรณีแรงบิดขั้นแน่นที่ระยะท่อลม 10 เมตร ภาพ (ก) แสดงภาพรวมของสัญญาณ ภาพ (ข) แสดงสัญญาณช่วงที่บล็อกลมทำงาน

การวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือในกรณีแรงบิดขั้นแน่นที่ระยะท่อลม

2 เมตร จากสัญญาณในภาพ 21 สามารถแจกแจงอินพุตได้ ดังนี้

ความยาวท่อลม = 2 เมตร

พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น = 0.20604 ตารางหน่วย

จำนวนลูกคลื่น = 39 ลูก

ระยะเวลา = 2.639 วินาที

สัญญาณจากภาพ 21 ตรงกับกฎฟัซซีทั้งหมด 5 ข้อด้วยกัน มีดังนี้

1. If จำนวนลูกคลื่น is M and ระยะเวลา is M then Output is T.

2. If จำนวนลูกคลื่น is AL and ระยะเวลา is M then Output is F.

3. If จำนวนลูกคลื่น is M and ระยะเวลา is L then Output is F.

4. If จำนวนลูกคลื่น is AL and ระยะเวลา is L then Output is T.

5. If ความยาวท่อลม is VS and พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น is VL then Output is T.

จากอินพุตของสัญญาณและกฎของฟัซซีที่กล่าวมาข้างต้น ค่าความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังภาพ 23 และในส่วนของการแปลงเอาต์พุต (defuzzification) ของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถวิเคราะห์หาค่าความถูกต้องของการขึ้นแน่นออกมาได้เท่ากับ 0.724 ผลการวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ของการทำงานกรณีแรงบิดขั้นแน่น

การวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือในกรณีแรงบิดขั้นแน่นที่ระยะท่อลม 10 เมตร จากสัญญาณในภาพ 22 สามารถแจกแจงอินพุตได้ ดังนี้

ความยาวท่อลม = 10 เมตร

พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น = 0.036391 ตารางหน่วย

จำนวนลูกคลื่น = 24 ลูก

ระยะเวลา = 1.5295 วินาที

สัญญาณจากภาพ 22 ตรงกับกฎฟัซซีทั้งหมด 6 ข้อด้วยกัน มีดังนี้

1. If จำนวนลูกคลื่น is L and ระยะเวลา is S then Output is T.

2. If จำนวนลูกคลื่น is M and ระยะเวลา is S then Output is T.

3. If จำนวนลูกคลื่น is L and ระยะเวลา is M then Output is F.

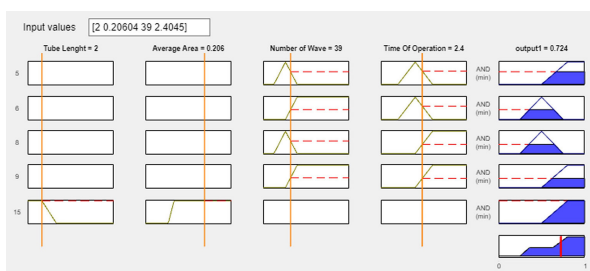
4. If จำนวนลูกคลื่น is M and ระยะเวลา is M then Output is T.

5. If ความยาวท่อลม is VL and พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น is S then Output is T.

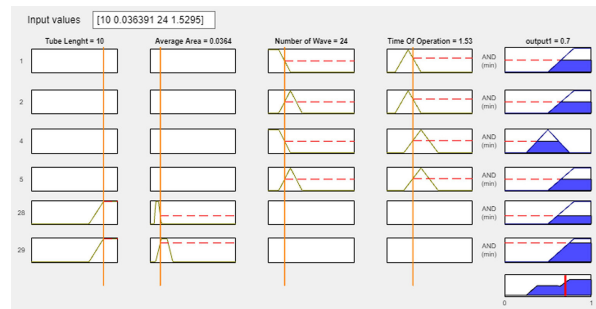
6. If ความยาวท่อลม is VL and พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น is M then Output is T.

จากอินพุตของสัญญาณและกฎของฟัซซีที่กล่าวมาข้างต้น ค่าความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังภาพ 24 และในส่วนของการแปลงเอาต์พุต (defuzzification) ของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของการขึ้นแน่นอนออกมาได้เท่ากับ 0.7 ผลการวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ของการทำงานกรณีแรงบิดขึ้นแน่นอน

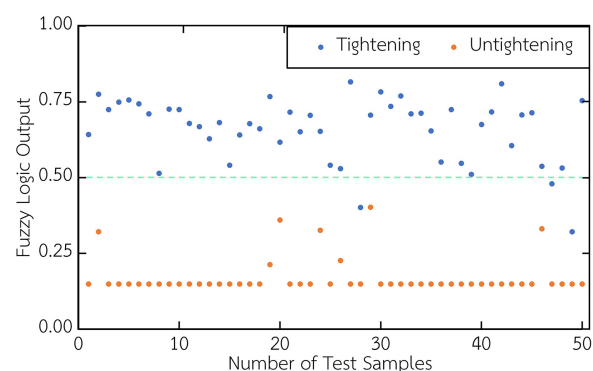
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบระบบการวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือที่สร้างขึ้น ด้วยชุดข้อมูลทดสอบจำนวน 100 ข้อมูล แบ่งเป็นกรณีไม่เกิดแรงบิดขึ้นแน่นอน 50 ข้อมูล และกรณีแรงบิดขึ้นแน่นอน 50 ข้อมูล การทดสอบจะแบ่งตามระยะความยาวท่อลมที่ 2 4 6 8 และ 10 เมตร ผลการทดสอบแสดงดังภาพ 25



ภาพ 23 แสดง Fuzzy Rule Inference ของการวิเคราะห์การทำงานในกรณีแรงบิดขึ้นแน่นอนที่ระยะท่อลม 2 เมตร



ภาพ 24 แสดง Fuzzy Rule Inference ของการวิเคราะห์การทำงานในกรณีแรงบิดขึ้นแน่นอนที่ระยะท่อลม 10 เมตร



ภาพ 25 แสดงผลการทดสอบระบบการวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

จากภาพ 25 จะเห็นได้ว่าเอาต์พุตในกรณีแรงบิดขึ้นแน่นอนจะมีค่ามากกว่า 0.5 และในกรณีไม่ได้เป็นแรงบิดขึ้นแน่นอนจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5

จากการทดสอบระบบวิเคราะห์ค่าเอาต์พุตในกรณีไม่ได้เป็นแรงบิดขึ้นแน่นอนส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ที่ 0.14863 เนื่องจากว่าสัญญาณความดันลมไม่มีลูกคลื่นเกิดขึ้น (เกิดจากลูกคลื่นมีขนาดเล็กมากและถูกกรองออกด้วยตัวกรองคาถาตามมิติเดียว) หรือถ้ามีลูกคลื่นเกิดขึ้นพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่นจะมีขนาดเล็กมาก รวมถึงในกรณีที่ระยะเวลาในการทำงานน้อย (น้อยกว่า 0.5 วินาที) ส่วนใหญ่แล้วในกรณีข้างต้นจะตรงกับกฎฟัซซีในข้อใดข้อหนึ่งหรือมากกว่า 1 ข้อ มีดังนี้

1. If พื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น is VS Output is U.

2. If ระยะเวลาการทำงาน is VS Output is U.

ผลการทดสอบระบบการวิเคราะห์การทำงานของ บล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือพบว่า มีเอาต์พุต ในกรณีแรงบิดชันแน่นที่มีค่าน้อยกว่า 0.5 อยู่ 3 ข้อมูล จากทั้งหมด 50 ข้อมูล ถือว่าเป็นการวิเคราะห์ผิดพลาด สามารถคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำได้เท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์และในกรณีไม่เกิดแรงบิดชันแน่นมีค่าความ แม่นยำอยู่ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่า ระบบมีความแม่นยำ โดยรวมอยู่ที่ 97 เปอร์เซ็นต์ การวิเคราะห์ในกรณีแรงบิด ชันแน่นที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น เกิดจาก 3 ข้อมูลที่นำ มาทดสอบ เป็นการชันน็อตที่เกิดแรงบิดชันแน่น แต่มีเวลา ในการทำงานของบล็อกลมน้อย ส่งผลให้จำนวนลูกคลื่น มีขนาดน้อยกว่ากฎของกรณีแรงบิดชันแน่นที่ได้สร้างไว้ ระบบจึงวิเคราะห์ออกมาว่าไม่ได้เป็นกรณีแรงบิดชันแน่น และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นถือว่าเป็นข้อดี เนื่องจากในการชัน ประกอบสลักเกลียวด้วยบล็อกลมนั้นต้องใช้ระยะเวลาที่ มากพอเพื่อเป็นการยืนยันว่าการชันสลักเกลียวเป็นกรณี แรงบิดชันแน่นที่แท้จริง

สรุปผล

จากการออกแบบการวิเคราะห์การทำงานของ บล็อกลมด้วยระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ สามารถสรุป ได้ดังนี้ ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือมีความสามารถในการ จัดการกับตัวแปรอินพุตของระบบการวิเคราะห์การทำงานของ บล็อกลมที่มีหลายตัวแปรและมีค่าตัวแปรหลายขนาด ได้ดีจากการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและการสร้างกฎ ของระบบฟัซซี ในงานวิจัยนี้เห็นได้ชัดเจนในเรื่องของการ จัดการกับความสัมพันธ์ที่มีความแปรผกผันกันของอินพุต

ระหว่างความยาวท่อลมและพื้นที่เฉลี่ยของลูกคลื่น ข้อดี ของการใช้ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือในการวิเคราะห์ คือ สามารถปรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎฟัซซีตาม ตัวอย่างข้อมูลได้โดยไม่มีความยุ่งยาก เหมาะสำหรับเป็น เครื่องมือเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์สัญญาณหรือข้อมูล

การวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบ ตรรกศาสตร์คลุมเครือในงานวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์การ ทำงานของบล็อกลมได้แม่นยำถึง 97 เปอร์เซ็นต์

ผลจากงานวิจัยนี้ถือว่าเป็นแนวโน้มที่ดีของ การนำระบบวิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมด้วยระบบ ตรรกศาสตร์คลุมเครือไปพัฒนาต่อ สำหรับสร้างระบบ การป้องกันความผิดพลาด (ระบบโศคา-โยเกะ) ที่มีหน้าที่ ตรวจสอบความถูกต้องของจำนวนการครั้งในการชัน ประกอบสลักเกลียวด้วยบล็อกลมของกระบวนการผลิต ในอุตสาหกรรมต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ตัวอย่างของบล็อกลมที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ในงานวิจัยคือบล็อกลมยี่ห้อ Kuani รุ่น KI-1308 ผู้วิจัย ได้ทำการสร้างระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือเพื่อทำการ วิเคราะห์การทำงานของบล็อกลมจากข้อมูลของบล็อกลมรุ่น ที่ได้นำเสนอ เพื่อเป็นการหาแนวทางวิเคราะห์การทำงานของ บล็อกลม หากต้องการที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับบล็อกลม รุ่นอื่นจะต้องทำการปรับข้อมูลของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) และกฎของฟัซซีให้เข้ากับ พฤติกรรมการทำงานของบล็อกลมชนิดนั้น ๆ



References

- Anas, E. (2016). Edge detection techniques using fuzzy logic. *2016 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)* (pp. 169-173). Noida, India: IEEE.
<https://doi.org/10.1109/SPIN.2016.7566682>
- Brkić, D. (2011). A gas distribution network hydraulic problem from practice. *Petroleum Science and Technology*, 29(4), 366-377. <http://dx.doi.org/10.1080/10916460903394003>

- Buemi, A., Giacalone, D., Naccari, F., & Spampinato, G. (2016). Efficient fire detection using fuzzy logic. *2016 IEEE 6th International Conference on Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin)* (pp. 237-240). Berlin, Germany: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCE-Berlin.2016.7684764>
- Gougam, F., Rahmoune, C., Benazzouz, D., & Merainani, B. (2019). Bearing fault diagnosis based on feature extraction of Empirical Wavelet Transform (EWT) and Fuzzy Logic System (FLS) under variable operating conditions. *Journal of Vibroengineering*, 21(6), 1636-1650. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20092>
- Jumahat, S., Beng, G. K., Misran, N., Islam, M. T., & Mahri, N. (2019). Automatic QRS onset detection of ECG signal using secant line slope formula. *2019 IEEE 15th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)* (pp. 132-136). Penang, Malaysia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSPA.2019.86959823>
- Karuna, M., Ganesh, Ch., Das, R. P., & Kumar, M. V. (2017). Classification of wrist movements through EMG Signals with fuzzy logic algorithm. *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)* (pp. 2258-2261). Chennai, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8389854>
- Khalid, M., Yusof, R., & Mokayed, H. (2011). Fusion of multi-classifiers for online signature verification using fuzzy logic inference. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 7(5), 2709-2726. <http://www.ijicic.org/isme09-si16.pdf>
- Kumar, R. S., Raj, L. G. C., & Abarna, J. (2018). Analysis of fuzzy logic based fault detection for three phase induction motor drive system. *2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)* (pp. 700-705). Chennai, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEES.2018.8443247>
- Lee, Y. G., Talluri, T., & Chung, H. T. (2019). Development of impact wrench torque measurement system. *2019 IEEE International Conference on Architecture, Construction, Environment and Hydraulics (ICACEH)* (pp. 33-36). Xiamen, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACEH484242019.9042104>
- Marselli, C., Daudet, D., Amann, H. P., & Pellandini, F. (1998). Application of Kalman filtering to noise reduction on microsensor signals. *Proceedings of the Colloque interdisciplinaire en instrumentation: C2I'98* (pp. 443-450). France: The Open University and Jisc. <https://core.ac.uk/download/pdf/20641186.pdf>
- Mendoza, C., Schweitzer, P., & Weber, S. (2019). Kalman filter and a fuzzy logic processor for series arcing fault detection in a home electrical network. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 107(3), 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.11.002>
- Pharne, S., & Patil, A. (2017). Fault diagnosis of motor using fuzzy logic technique. *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)* (pp. 3110-3115). Chennai, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8390029>

- Pratumsuwan, P. (2018). *Fuzzy logic control*. Bangkok: Se-Education Public Company Limited. (in Thai)
- Ratanaprasert, C., Ananchuen, N., Chumchob, N., Supaporn, W., & Howsud, T. (2016). Integrals. In N. Ananchuen, M. Chaiya, J. Rakbud & R. Srithus (Eds.). *Calculus II. Silpakorn University*. <http://www.math.sc.su.ac.th/web3/textbooks/cal2/Calculus2-ch1-integrals.pdf>. (in Thai)
- Roveda, L., Riva, D., Bucca, G., & Piga, D. (2021). External joint torques estimation for a position-controlled manipulator employing an extended Kalman Filter. *2021 18th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)* (pp. 101-107). Gangneung, Korea (South): IEEE. <https://doi.org/10.1109/UR52253.2021.9494674>
- Sahid, D., & Alaydrus, M. (2020). Multi sensor fire detection in low voltage electrical panel using modular fuzzy logic. *2020 2nd International Conference on Broadband Communications, Wireless Sensors and Powering (BCWSP)* (pp. 31-35), Yogyakarta, Indonesia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/BCWSP50066.2020.9249400>
- Semsri, A., Suksukont, A., Sisamut, S., & Pudtipatkosit, T. (2021). Quality control and loss reduction in the front side fender model assembly process using Poka-Yoke Techniques. *RMUTP Research Journal*, 15(2), 103-118. <https://doi.org/10.14456/jrmutp.2021.25>. (in Thai)
- Somsirikarnjanakoon, T., Prasopchaichana, K., Tongjiphitak, K., Suthachewa, K., & Srikosak, K. (2018). Defect reduction in assembly process: Case study of automotive manufacturer. *IE Network Conference 2018 (July 23-26)*. Ubon Ratchathani: IE Network. (in Thai)
- Ülker, O., Gökmen, G., & Kaplanoğlu, E. (2017). Emg signal classification using fuzzy logic. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 5(2), 97-101. <https://doi.org/10.17694/bajece.337941>
- Xia, Z., Xie, F., & Wang, X. (2019). Design of electric fixed torque wrench based on speed difference detection. *2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)* (pp. 3724-3729). Nanchang, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2019.8832745>.
- Xu, J., Zhao, Y., & Chen, K. (2020). Development of a high-precision digital display torque wrench. *Journal of Physics: Conference Series, Volume 1626, 2020 4th International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering 21-22 June 2020* (pp. 1-6). Beijing, China: IOP Publishing Ltd. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1626/1/012138>

