

ตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายแบบหลายวัตถุประสงค์ที่ผสมผสานกับระบบอนุमानแบบ
ฟัซซี่สำหรับปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน
An FIS-Integrated Multi-Objective Goal Programming Model for Cobot
Assignment Problem

มาริษา กิมาพร วุฒินันท์ นุ่นแก้ว*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Marrisa Kimaporn Wuttinan Nunkaew*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering,
Thammasat University, Pathum Thani, 12120

*Corresponding author Email: nwuttinan@engr.tu.ac.th

(Received: June 16, 2024; Revised: July 26, 2024; Accepted: August 15, 2024)

บทคัดย่อ

จากการที่ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานนั้นมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง การพิจารณาเพียงปัจจัยเดียวตามวิธีมอบหมายงานแบบดั้งเดิมนั้นไม่สามารถการันตีคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายแบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับการหาคำตอบของปัญหา พร้อมด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพนักงาน หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานและงาน ระบบอนุमानแบบฟัซซี่ถูกนำมาใช้ร่วมกันแบบผสมผสานในการวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะและความพึงพอใจของการมอบหมายงานภายใต้เกณฑ์ 24 เกณฑ์ ผลจากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอให้นั้นให้ค่าสมรรถนะโดยรวมและค่าความพึงพอใจโดยรวมที่ดีกว่าวิธีการมอบหมายงานแบบดั้งเดิมที่พิจารณาเฉพาะฟังก์ชันของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน

คำสำคัญ: ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน สมรรถนะ ความพึงพอใจ ตัวแบบการพิจารณาตามลำดับความสำคัญ

ABSTRACT

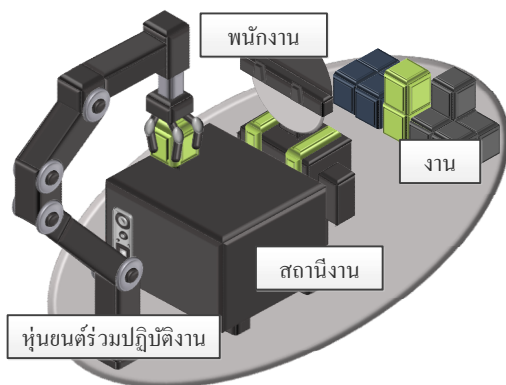
Due to facing multiple factors in the cobot assignment problem, considering only a single one as in the traditional assignment method cannot guarantee the optimal solution. This research then proposed a multi-objective goal programming model for solving this problem with the consideration of relationships between workers, cobots, and tasks. The Fuzzy Inference System (FIS) was integrated to analyze the performance and preference of the assignment based on 24 criteria. The comparison results demonstrated that the proposed method obtained the overall performance and preference values that overcome the conventional assignment method considering only cobot functions.

Keyword: Cobot assignment problem, performance, preference, lexicographic model.

1. บทนำ

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาวิศวกรรมมีความพยายามที่จะพัฒนารูปแบบการผลิตไปสู่ยุคอุตสาหกรรม 5.0 หรือ “Industry 5.0” ที่เน้นการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และเครื่องจักร ซึ่งจะแตกต่างกับยุคอุตสาหกรรม 4.0 ที่ใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น ข้อมูลมหึมา (big data) อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things, IoT) ตลอดจนปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ให้มีบทบาทหลักตลอดกระบวนการผลิต เพื่อทดแทนแรงงานมนุษย์ เช่นเดียวกับการใช้ “หุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบดั้งเดิม” (traditional industrial robot) แต่ในอุตสาหกรรม 5.0 นั้นจะเป็นการออกแบบกระบวนการผลิตโดยคำนึงถึงมนุษย์เป็นศูนย์กลาง [1] ซึ่งจะทำให้เกิดความสมดุลระหว่างมนุษย์และเทคโนโลยีในกระบวนการผลิต [2]

แนวคิดความร่วมมือระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Human-Robot Collaboration, HRC) ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี 1996 ในแนวคิดนี้ความหมายของหุ่นยนต์ถูกตั้งนิยามใหม่ด้วยคำว่า “หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน” (Collaborative robot) หรือ “โคบอท” (Cobot) [3, 4] สิ่งสำคัญในการนำหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานเข้ามาใช้งานร่วมกับมนุษย์คือการใช้ประโยชน์จากลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์ ความแม่นยำ ความสามารถในการทำซ้ำ และความแข็งแรง ควบคู่ไปกับความสามารถด้านการรับรู้ของมนุษย์ เช่น การแก้ปัญหา การตัดสินใจแบบเร่งด่วน และการรับรู้ด้วยสายตา [5, 6] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์

อย่างไรก็ตามในการใช้หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีการพิจารณาการทำงานระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์อย่างรอบคอบ ทั้งในเรื่องความปลอดภัยของพนักงาน คุณภาพของงาน หรือความเสียหายจากการทำงานที่ผิดพลาดของหุ่นยนต์ ดังนั้นนอกเหนือจากการพิจารณาสมรรถนะในการผลิตแล้ว การพิจารณาข้อจำกัดของการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานแต่ละประเภทมีคุณลักษณะทั้งในส่วนของฟังก์ชันการทำงาน คุณสมบัติของวัสดุ รวมถึงข้อจำกัดในการทำงานที่แตกต่างกันไป

นอกจากนี้การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) อย่างใกล้ชิดระหว่างหุ่นยนต์กับพนักงาน ดังนั้นพนักงานจำเป็นต้องมีความรู้และทักษะที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ที่ได้รับมอบหมายให้ทำงานร่วมด้วย อีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญคือสภาพจิตใจและสภาพร่างกายของพนักงาน [7, 8] ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่สุด เนื่องจากพนักงานที่ทำงานร่วมกับหุ่นยนต์นั้นไม่ควรที่จะได้รับบาดเจ็บจากการทำงาน ตกอยู่ในสถานการณ์ที่เป็นอันตรายต่อชีวิต หรือส่งผลกระทบต่อจิตใจ ดังนั้นเพื่อป้องกันข้อผิดพลาดเหล่านี้ การคำนึงถึงความรู้ควบคู่ไปกับความปลอดภัย ตลอดจนความพึงพอใจของพนักงานก็เป็นสิ่งสำคัญที่ไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานแบบหลายเกณฑ์ โดยการพิจารณาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบหลัก 3 ส่วนแบบเป็นคู่ (pairwise) ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานกับงาน หุ่นยนต์กับงาน และพนักงานกับหุ่นยนต์ โดยใช้ระบบอนุมานแบบฟัซซีสำหรับการวิเคราะห์ผลการประเมินตามเกณฑ์ในแต่ละมุมมอง และทำการมอบหมายงานด้วยตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการที่นำเสนอสามารถกำหนดการมอบหมายงานที่มีการพิจารณาปัจจัยที่ครอบคลุมการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ได้ดีกว่าการพิจารณาเพียงปัจจัยหรือมุมมองเดียวในการมอบหมายงานแบบทั่วไป

2. การศึกษางานวิจัย

การใช้หุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์มีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณา ซึ่งมีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาและเสนอมุมมองในการจัดการ สามารถสรุปได้ดังนี้

งานวิจัยของ Malik and Bilberg [9] และ Ranz และคณะ [10] ได้นำเสนอการจัดสรรงาน (allocation of tasks) และการกระจายงาน (distribution of assembly tasks) โดยคำนึงถึงทักษะของมนุษย์และหุ่นยนต์ เพื่อเพิ่มคุณภาพงานและประสิทธิภาพในการทำงานร่วมกัน รวมถึงในงานวิจัยของ Bettoni และคณะ [7] และ Faccio และคณะ [11] ก็มีการเน้นถึงความสำคัญของการจัดสรรงานและการออกแบบพื้นที่ทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์ โดยเสนอวิธีการที่พิจารณาความปลอดภัยของพนักงาน ซึ่งมีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1) เพิ่มผลผลิตสูงสุด 2) ทำให้มนุษย์สามารถทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ได้อย่างปลอดภัย นอกจากนี้วิธีการวัดเวลา (Methods-Time Measurement) ยังถูกนำเสนอเพื่อคำนวณเวลาในแต่ละกระบวนการรวมกับการใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) ในการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน [12]

ในงานวิจัยของ Blankemeyer และคณะ [13] Tsarouchi และคณะ [14], Tsarouchi และคณะ [15], Faber และคณะ [16] ได้เสนอแนวคิดว่าการทำงานระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์นั้นช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและแบ่งเบาภาระงานที่ไม่เป็นไปตามหลักสรีรศาสตร์แต่ยังไม่แพร่หลายในบางอุตสาหกรรม เนื่องจากขาดข้อมูลและความรู้เกี่ยวกับการทำงานร่วมกัน งานวิจัยเหล่านี้จึงเสนอวิธีสำหรับการวางแผนการทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์ เช่น การประเมินความเหมาะสมของสถานที่ทำงาน การจัดตารางการทำงาน รวมถึงการมอบหมายงานให้กับมนุษย์และหุ่นยนต์

นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอแนวคิดการมอบหมายงานของโคบอตร่วมกับปัญหาการจัดตารางการทำงานของการผลิตแบบตามสั่ง (cobot assignment in conjunction with the job shop scheduling problem) [17-19] ด้วยวิธีอัลกอริทึมทางพันธุกรรม

ร่วมกับการเข้ารหัสคีย์สุ่มแบบเอนเคอริ่ง (hybrid genetic algorithm that incorporates biased random-key encoding) และการค้นหาบริเวณใกล้เคียงแบบแปรผัน (variable neighborhood search) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักคือการหาผลรวมแบบมาตรฐาน (normalized sum) ของต้นทุนการผลิตและปริมาณการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้งานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์มีประสิทธิภาพการผลิต (production efficiency) ที่ดีขึ้น

จากการศึกษาวิจัยส่วนใหญ่มีการพิจารณาเพียงประเด็นเดียวเป็นหลัก เช่น การเลือกประเภทหุ่นยนต์ที่เหมาะสมกับพนักงานหรืองาน ด้วยการพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุด แต่มองข้ามการพิจารณาความปลอดภัยหรือความพึงพอใจของพนักงาน [20-22] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวางแผนการทำงานแบบทั่วไปนั้นไม่เพียงพอที่จะสนับสนุนการทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาหลายเกณฑ์และหลายมุมมอง เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพ ตรงตามฟังก์ชันการทำงานของหุ่นยนต์ ตลอดจนมีสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยต่อการทำงาน สิ่งเหล่านี้จะช่วยสนับสนุนทั้งสมรรถนะโดยรวมในการทำงานและความปลอดภัยของพนักงาน [7, 23]

3. วิธีการที่นำเสนอ

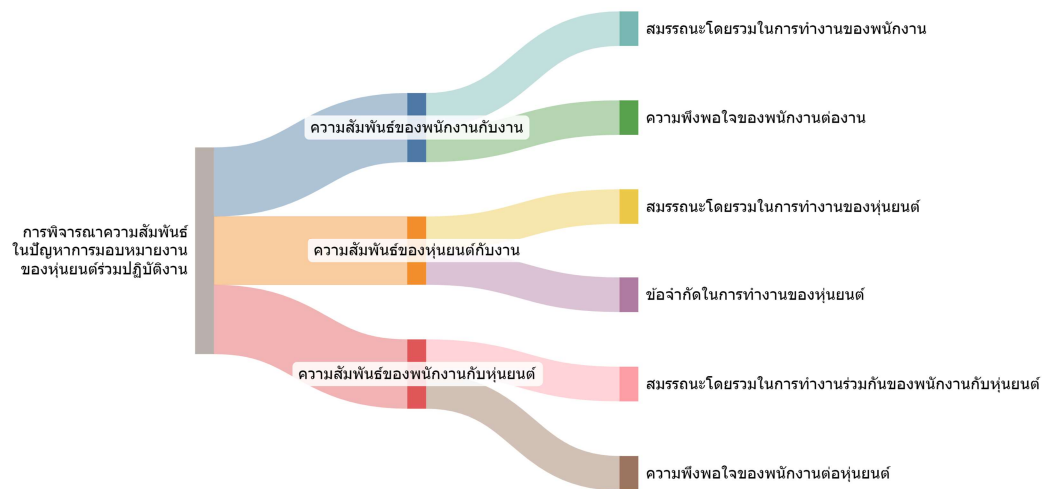
สำหรับรายละเอียดของวิธีการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วยเกณฑ์ ระบุขอบเขตแบบฟัซซี และตัวแบบที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังนี้

3.1 เกณฑ์

การกำหนดเกณฑ์ (criteria) ที่ใช้สำหรับการประเมินเพื่อประกอบการตัดสินใจในการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากผลของการประเมินนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบของปัญหาการมอบหมายหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานในขั้นตอนถัดไป ดังนั้นเกณฑ์ที่ใช้จะมีอิทธิพลต่อการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานโดยตรง งานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์

ภายใต้มุมมองในการพิจารณา (point of view) ตามความสัมพันธ์ในการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบหลัก 3 ส่วน (พนักงาน หุ่นยนต์ และงาน) ของปัญหาการมอบหมายหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน ผู้วิจัยจึงแบ่งการพิจารณา

ความสัมพันธ์ออกเป็น 3 คู่ ได้แก่ ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงาน และความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ภายใต้มุมมองที่นำเสนอ

ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน (P_1) ประกอบไปด้วยมุมมองด้านสมรรถนะโดยรวมในการทำงานของพนักงาน 4 เกณฑ์ ($C_1 - C_4$) [8, 10, 12, 24-26] และมุมมองความพึงพอใจของพนักงานต่องาน 4 เกณฑ์ ($C_5 - C_8$) [16, 27-29] ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ใน P_1 นี้เกี่ยวข้องกับข้อมูลของทักษะของพนักงานแต่ละคนและความคิดเห็นของพนักงานที่มีต่อการทำงำนนั้น ๆ

ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงาน (P_2) ประกอบไปด้วยมุมมองสมรรถนะโดยรวมในการทำงานของหุ่นยนต์ 4 เกณฑ์ ($C_9 - C_{12}$) [6, 7, 10, 15, 30] และข้อจำกัดในการทำงานของหุ่นยนต์ 4 เกณฑ์ ($C_{13} - C_{16}$) [6, 13, 15, 31] ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ในกลุ่มนี้จะเกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์และกระบวนการผลิตชิ้นงาน เช่น ฟังก์ชันการทำงานของหุ่นยนต์ คุณลักษณะพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ (work envelope) เป็นต้น

ความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์ (P_3) ประกอบด้วยมุมมองสมรรถนะโดยรวมในการทำงานร่วมกันของหุ่นยนต์และพนักงาน 4 เกณฑ์ ($C_{17} - C_{20}$) [8, 10, 15, 32-34] และความพึงพอใจของพนักงานต่อหุ่นยนต์ 4 เกณฑ์ ($C_{21} - C_{24}$) [11, 20, 27, 35-37]

โดยในแต่ละมุมมองจะมีเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาที่เหมือนกันแต่จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์และมุมมองที่กำลังพิจารณา เช่น ความสามารถในการผลิต หากพิจารณาความสัมพันธ์ของพนักงานกับงานจะหมายถึงความสามารถในการผลิตชิ้นงานของพนักงาน ในขณะที่หากพิจารณาความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงานนั้นจะหมายถึงความสามารถในการผลิตชิ้นงานของหุ่นยนต์ และหากพิจารณาความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับพนักงานจะหมายถึงความสามารถในการผลิตชิ้นงานร่วมกันของพนักงานและหุ่นยนต์ ซึ่งเกณฑ์ทั้งหมดที่ใช้ในการประเมินในแต่ละความสัมพันธ์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินการทำงานตามมุมมองของความสัมพันธ์

P ₁ : ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน	P ₂ : ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงาน	P ₃ : ความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์
P ₁₋₁ : สมรรถนะโดยรวมในการทำงานของพนักงาน	P ₂₋₁ : สมรรถนะโดยรวมในการทำงานของหุ่นยนต์	P ₃₋₁ : สมรรถนะโดยรวมในการทำงานร่วมกันของพนักงานกับหุ่นยนต์
C ₁ : ความสามารถในการผลิต (หน่วย)	C ₉ : ความสามารถในการผลิต (หน่วย)	C ₁₇ : ความสามารถในการผลิตร่วมกัน (หน่วย)
C ₂ : คุณภาพของชิ้นงาน (ร้อยละ)	C ₁₀ : คุณภาพของชิ้นงาน (ร้อยละ)	C ₁₈ : คุณภาพของชิ้นงาน (ร้อยละ)
C ₃ : ความต่อเนื่องในการปฏิบัติงาน (ชั่วโมง)	C ₁₁ : รอบเวลาการผลิตที่เหมาะสม (ชั่วโมง)	C ₁₉ : ความต่อเนื่องในการปฏิบัติงานร่วมกัน (ชั่วโมง)
C ₄ : ทักษะการปฏิบัติงาน (คะแนน)	C ₁₂ : ฟังก์ชันการทำงานของหุ่นยนต์ (คะแนน)	C ₂₀ : ทักษะการควบคุมหุ่นยนต์ (คะแนน)
P ₁₋₂ : ความพึงพอใจของพนักงานต่องาน	P ₂₋₂ : ข้อจำกัดในการทำงานของหุ่นยนต์	P ₃₋₂ : ความพึงพอใจของพนักงานต่อหุ่นยนต์
C ₅ : การเคลื่อนไหวและการยศาสตร์ (คะแนน)	C ₁₃ : แรงและกำลังสูงสุด (คะแนน)	C ₂₁ : การเคลื่อนไหวและการยศาสตร์ (คะแนน)
C ₆ : ความยืดหยุ่นในการปฏิบัติงาน (คะแนน)	C ₁₄ : พื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ (คะแนน)	C ₂₂ : ความยืดหยุ่นในการควบคุมหุ่นยนต์ (คะแนน)
C ₇ : ความเครียดจากการปฏิบัติงาน (คะแนน)	C ₁₅ : ความเหมาะสมของวัสดุ (คะแนน)	C ₂₃ : ความกังวลจากการควบคุมหุ่นยนต์ (คะแนน)
C ₈ : การเปลี่ยนแปลงของงาน (คะแนน)	C ₁₆ : ความซับซ้อนของระบบ (คะแนน)	C ₂₄ : ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน (คะแนน)

3.2 ระบบอนุมานแบบฟัซซี่

ระบบอนุมานแบบฟัซซี่ (Fuzzy Inference System, FIS) เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่มีความคลุมเครือ มีความไม่แน่นอน หรือไม่ได้มีคำตอบแค่จริงหรือเท็จเท่านั้น แต่จะแสดงออกมาในรูปแบบแยะ ปาน กลาง สูง หรือเรียกว่าตัวแปรภาษา (linguistic variable) [38] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ FIS ในการวิเคราะห์ค่าจากการประเมินตามเกณฑ์ภายใต้การพิจารณาความสัมพันธ์ในการทำงานทั้ง 3 ความสัมพันธ์ (ดังตารางที่ 1) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานในการทำงานของระบบอนุมานแบบฟัซซี่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนหลัก ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้ [39-41]

ส่วนที่ 1 “การฟัซซิฟิเคชัน” (Fuzzification) คือการ

สร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) และกำหนดพารามิเตอร์ในลักษณะของตัวแปรภาษา เพื่อใช้สำหรับการแปลงข้อมูลป้อนเข้าแบบตัวเลข (crisp input) ให้เป็นข้อมูลป้อนเข้าแบบฟัซซี่ (fuzzify input) โดยการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function, TrapMF) ของตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรผลลัพธ์นั้น ผู้วิจัยได้กำหนดค่าของพารามิเตอร์ทั้ง 3 ระดับ (B , N , H) ด้วยการวิเคราะห์ช่วงของข้อมูลที่ได้มาจากผลของแบบสอบถาม โดยผู้เชี่ยวชาญสำหรับความสัมพันธ์ทั้ง 3 มุมมอง ($P_1 - P_3$) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ TrapMF

P ₁ : ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน				P ₂ : ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงาน				P ₃ : ความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์			
เกณฑ์	แยะ	ปานกลาง	สูง	เกณฑ์	แยะ	ปานกลาง	สูง	เกณฑ์	แยะ	ปานกลาง	สูง
(Criteria)	(Bad: B)	(Normal: N)	(High: H)	(Criteria)	(Bad: B)	(Normal: N)	(High: H)	(Criteria)	(Bad: B)	(Normal: N)	(High: H)
C ₁	[40 40 50 60]	[50 60 70 80]	[70 80 100 100]	C ₉	[40 40 50 60]	[50 60 70 80]	[70 80 100 100]	C ₁₇	[40 40 50 60]	[50 60 70 80]	[70 80 100 100]
C ₂	[0 0 20 40]	[20 40 50 70]	[50 70 100 100]	C ₁₀	[0 0 20 40]	[20 40 50 70]	[50 70 100 100]	C ₁₈	[0 0 20 40]	[20 40 50 70]	[50 70 100 100]
C ₃	[1 1 1.33 1.67]	[1.33 1.67 2 2.5]	[2 2.5 3 3]	C ₁₁	[1 1 1.33 1.67]	[1.33 1.67 2 2.5]	[2 2.5 3 3]	C ₁₉	[1 1 1.33 1.67]	[1.33 1.67 2 2.5]	[2 2.5 3 3]
C ₄	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₁₂	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₂₀	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]
FIS _{WH}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]	FIS _{RH}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]	FIS _{WR}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]
C ₅	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₁₃	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₂₁	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]
C ₆	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₁₄	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₂₂	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]
C ₇	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₁₅	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₂₃	[6 8 10 10]	[3 5 6 8]	[0 0 3 5]
C ₈	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₁₆	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₂₄	[6 8 10 10]	[3 5 6 8]	[0 0 3 5]
FIS _{HW}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]	FIS _{HR}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]	FIS _{RW}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]

ส่วนที่ 2 การกำหนด “กฎแบบฟัซซี่” (Fuzzy rule) ซึ่งจะใช้สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรผลลัพธ์ ซึ่งในกรณีนี้ตัวแปรป้อนเข้าจะหมายถึง เกณฑ์ (criteria: C_1 - C_{24}) และตัวแปรผลลัพธ์จะหมายถึงค่าสมรรถนะโดยรวมและค่าความพึงพอใจของแต่ละความสัมพันธ์ ($FIS_{WH, HW}$, $FIS_{RH, HR}$, $FIS_{WR, RW}$) โดยกฎที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเกณฑ์กับค่าสมรรถนะโดยรวมและค่าความพึงพอใจจะอยู่ในรูปแบบของ “If-Then” [42] ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กฎแบบฟัซซี่สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์

กฎที่	$FIS_{WH, HW, RH, HR, WR, RW}$			
	$C_{1,5,9,13,17,21}$	$C_{2,6,10,14,18,22}$	$C_{3,7,11,15,19,23}$	$C_{4,8,12,16,20,24}$
1	High	High	High	High
2	High	Normal	High	High
3	High	High	Normal	High
4	High	High	High	Normal
5	Normal	High	High	High
6	High	High	Bad	High
7	High	High	Bad	Normal
8	Normal	High	Bad	High
9	Normal	High	Bad	Normal
10	High	Normal	Normal	High
11	High	Normal	High	Normal
12	High	High	Normal	Normal
13	High	Normal	Normal	Normal
14	Normal	Normal	High	High
15	Normal	High	Normal	High
16	Normal	Normal	Normal	High
17	Normal	High	High	Normal
18	Normal	Normal	High	Normal
19	Normal	High	Normal	Normal
20	Normal	Normal	Normal	Normal

ส่วนที่ 3 การกำหนด “กลไกการอนุมานแบบฟัซซี่” (Fuzzy inference engine) เป็นขั้นตอนที่ทำการตรวจสอบข้อมูลป้อนเข้าผ่านกฎที่กำหนดขึ้นจากส่วนที่ 2 เพื่อใช้ในการตีความหาผลลัพธ์ โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้การอนุมานแบบแมมดานิชนิดที่ 1 (Mamdani Type I) ซึ่งนำเสนอโดยศาสตราจารย์ Ebrahim Mamdani ในปี ค.ศ. 1975 [43] โดยใช้วิธีการจัดองค์ประกอบค่าสูงสุด-ค่า

ต่ำสุด (max-min inference) ซึ่งวิธีการกำหนดกลไกการอนุมานให้กับระบบอนุมานแบบฟัซซี่แสดงได้ดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 การกำหนดรายละเอียดของ FIS แบบ Mamdani Type I ในโปรแกรม MATLAB

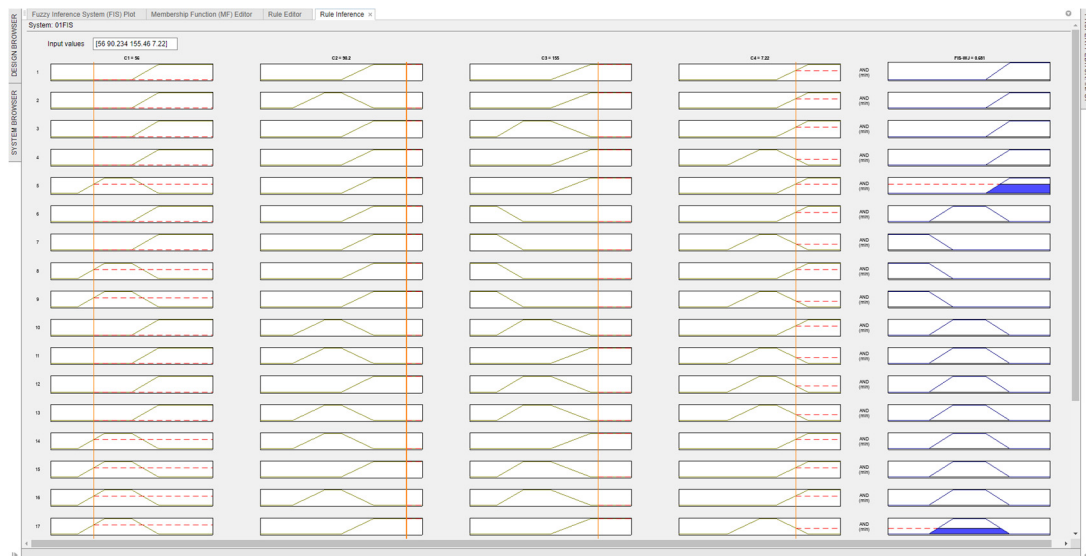
ส่วนที่ 4 “การดีฟัซซิฟิเคชัน” (Defuzzification) เป็นการแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของฟัซซี่ให้กลับไปเป็นค่าผลลัพธ์แบบตัวเลข (crisp output) เช่นเดียวกับข้อมูลป้อนเข้า รวมถึงเป็นการสรุปผลและสามารถนำค่าที่ได้ไปใช้งานต่อ ซึ่งวิธีการที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันและเป็นวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้คือวิธีการหาจุดศูนย์กลาง (Center of Gravity, COG) ตัวอย่างการหาค่าสมรรถนะโดยรวมของพนักงานคนที่ 1 ในการทำงานที่ 1 ซึ่งตรงกับกฎข้อที่ 5 และ 17 มีรายละเอียดดังนี้

$$[C_1, C_2, C_3, C_4] = [56, 90.23, 155.46, 7.22]$$

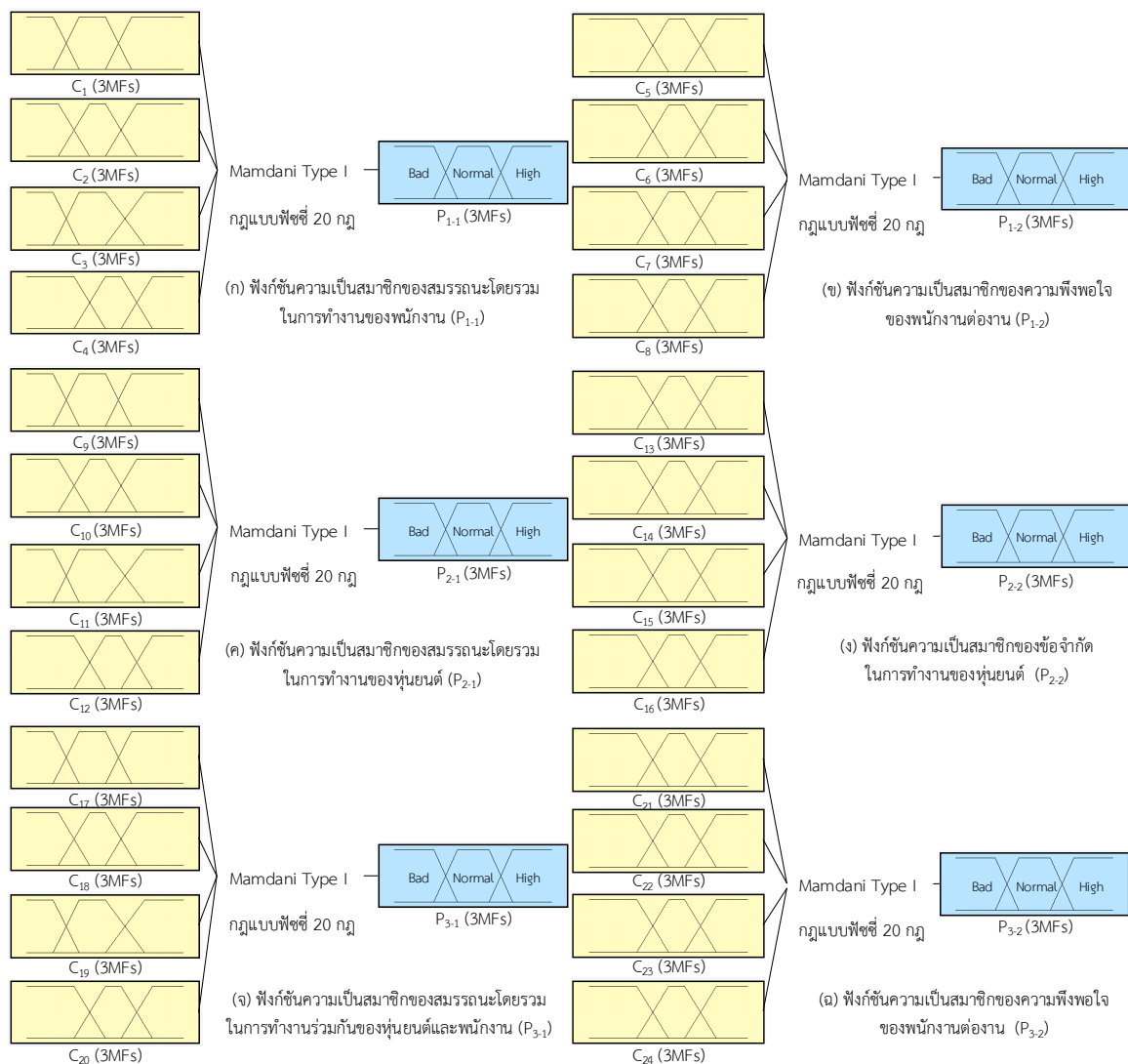
กฎที่ 5: If C_1 is Normal and C_2 is High and C_3 is High and C_4 is High Then FIS_{WJ} is High

กฎที่ 17: If C_1 is Normal and C_2 is High and C_3 is High and C_4 is Normal Then FIS_{WJ} is Normal

รูปที่ 4 เป็นตัวอย่างการหาค่า COG ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยแต่ละคอลัมน์จะค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรผลลัพธ์ (คอลัมน์ขวาสุด) ตามกฎทั้ง 20 กฎ (ในแต่ละแถว) และรูปที่ 5 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรผลลัพธ์



รูปที่ 4 การดีฟัซซิฟิเคชันด้วยโปรแกรม MATLAB ของพนักงานคนที่ 1 ในการทำงานที่ 1



รูปที่ 5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรผลลัพธ์

3.3 ตัวแบบที่นำเสนอสำหรับการมอบหมายงานของ หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน

ในการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานด้วย
ตัวแบบที่มีการพิจารณาตามลำดับความสำคัญของ
วัตถุประสงค์ (Lexicographic Goal Programming
model, LGP) มีรายละเอียดดังนี้

ดัชนี (Index sets)

w = พนักงานคนที่ $w = 1, 2, 3, \dots, W$

h = งานที่ $h = 1, 2, 3, \dots, H$

r = หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานตัวที่ $r = 1, 2, 3, \dots, R$

t = วัตถุประสงค์ที่ $t = 1, 2, 3, \dots, T$

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)

x_{rwh} = การมอบหมายพนักงานคนที่ w ให้กับงานที่ h
สำหรับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานตัวที่ r

y_{wr} = การมอบหมายพนักงานคนที่ w ให้หุ่นยนต์ร่วม
ปฏิบัติงานตัวที่ r

η_t = ค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ t

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง (Related parameters)

fis_{wh} = ค่าสมรรถนะของการพิจารณาพนักงานคนที่ w
ให้กับงานที่ h

fis_{rh} = ค่าสมรรถนะของการพิจารณาหุ่นยนต์ร่วม
ปฏิบัติงานตัวที่ r ให้กับงานที่ h

fis_{wr} = ค่าสมรรถนะของการพิจารณาพนักงานคนที่ w
ให้กับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานตัวที่ r

fis_{hw} = ค่าความพึงพอใจของการพิจารณางานที่ h
ให้กับพนักงานคนที่ w

fis_{hr} = ข้อจำกัดของการพิจารณางานที่ h ให้กับ
หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานตัวที่ r

fis_{rw} = ค่าความพึงพอใจของการพิจารณาหุ่นยนต์ร่วม
ปฏิบัติงานตัวที่ r ให้กับพนักงานคนที่ w

$nr_w^{\min}$ = จำนวนหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานขั้นต่ำของพนักงาน
คนที่ w

$nr_w^{\max}$ = จำนวนหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานสูงสุดของพนักงาน
คนที่ w

$nh_r^{\min}$ = จำนวนงานขั้นต่ำของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานตัว
ที่ r

$nh_w^{\min}$ = จำนวนงานขั้นต่ำของพนักงานคนที่ w

$nh_w^{\max}$ = จำนวนงานสูงสุดของพนักงานคนที่ w

τ_t = ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ลำดับที่ t

η_t^* = ค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ t ที่
ยอมรับได้

สมการวัตถุประสงค์ (Objective functions)

วัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 จะเป็นการหาค่าสมรรถนะ
โดยรวมเฉลี่ยที่สูงที่สุดในการพิจารณาความสัมพันธ์ของ
สมรรถนะในการปฏิบัติงานของพนักงาน สมรรถนะในการ
ทำงานของหุ่นยนต์ สมรรถนะในการปฏิบัติงานร่วมกับ
หุ่นยนต์ของพนักงาน โดยสามารถแสดงดังสมการที่ (1)

$$\max Z_1 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{H} \sum_{r=1}^R \left(\sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H x_{rwh} \cdot fis_{wh} \right) + \frac{1}{H} \sum_{w=1}^W \left(\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \cdot fis_{rh} \right) + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \sum_{w=1}^W y_{wr} \cdot fis_{wr} \right) \quad (1)$$

วัตถุประสงค์ลำดับที่ 2 จะเป็นการหาค่าความพึง
พอใจโดยรวมเฉลี่ยที่สูงที่สุดในการพิจารณาความสัมพันธ์
ระหว่างความพึงพอใจของพนักงานที่มีต่องาน ข้อจำกัดใน
การทำงานของหุ่นยนต์ ความพึงพอใจของพนักงานต่อ
หุ่นยนต์ โดยสามารถแสดงดังสมการที่ (2)

$$\max Z_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{H} \sum_{r=1}^R \left(\sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H x_{rwh} \cdot fis_{hw} \right) + \frac{1}{H} \sum_{w=1}^W \left(\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \cdot fis_{hr} \right) + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \sum_{w=1}^W y_{wr} \cdot fis_{rw} \right) \quad (2)$$

สมการเป้าหมาย (Goal functions)

สมการเป้าหมายลำดับที่ 1 และ 2 เป็นการกำหนดให้สมการวัตถุประสงค์ของแต่ละลำดับเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของแต่ละวัตถุประสงค์แล้ว จะต้องมีการบรรลุตามค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์นั้น ๆ ที่ได้ทำการกำหนดเอาไว้ โดยสมการเป้าหมายของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 และ 2 แสดงได้ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$Z_1 + \eta_1 = \tau_1 \quad (3)$$

$$Z_2 + \eta_2 = \tau_2 \quad (4)$$

อย่างไรก็ตามสมการเป้าหมายทั้ง 2 ลำดับไม่ได้มีการพิจารณาค่าเบี่ยงเบนเชิงบวกเนื่องจากค่าเป้าหมายถูกกำหนดเป็นค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะโดยรวมและค่าความพึงพอใจโดยรวมเฉลี่ยที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นไม่ว่าอย่างไรค่าที่ได้จากสมการวัตถุประสงค์จะไม่มีทางมีค่าเกิน 1 จึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาค่าเบี่ยงเบนเชิงบวกในสมการวัตถุประสงค์ทั้ง 2 ลำดับ

โดยตัวแบบที่นำเสนอสำหรับการแก้ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานแสดงได้ดังนี้

สมการวัตถุประสงค์ (Objective function)

$$\text{lex min} = [\eta_1, \eta_2] \quad (5)$$

เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

$$\frac{1}{3} \left(\frac{1}{H} \sum_{r=1}^R \left(\sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H x_{rwh} \text{fis}_{wh} \right) + \frac{1}{H} \sum_{w=1}^W \left(\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \text{fis}_{rh} \right) + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \sum_{w=1}^W y_{wr} \text{fis}_{wr} \right) + \eta_1 = \tau_1 \quad (6)$$

$$\frac{1}{3} \left(\frac{1}{H} \sum_{r=1}^R \left(\sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H x_{rwh} \text{fis}_{hw} \right) + \frac{1}{H} \sum_{w=1}^W \left(\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \text{fis}_{hr} \right) + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \sum_{w=1}^W y_{wr} \text{fis}_{rw} \right) + \eta_2 = \tau_2 \quad (7)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{w=1}^W x_{rwh} = 1; \quad \forall h \quad (8)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \geq nh_w^{\min}; \quad \forall w \quad (9)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \leq nh_w^{\max}; \quad \forall w \quad (10)$$

$$\sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H x_{rwh} \geq nh_r^{\min}; \quad \forall r \quad (11)$$

$$\sum_{w=1}^W y_{wr} = 1; \quad \forall r \quad (12)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \geq nr_w^{\min}; \quad \forall w \quad (13)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \leq nr_w^{\max}; \quad \forall w \quad (14)$$

$$\sum_{h=1}^H x_{rwh} \leq y_{wr} \times M; \quad \forall w, r \quad (15)$$

$$\eta_i \leq \eta_i^* \quad (16)$$

$$x_{rwh}, y_{wr} \text{ is binary}; \quad \forall w, r, h \quad (17)$$

สมการที่ (5) เป็นสมการวัตถุประสงค์ในหาค่าเบี่ยงเบนเชิงลบที่ต่ำที่สุดตามลำดับความสำคัญของเป้าหมาย สมการที่ (6) และ (7) เป็นสมการเป้าหมาย สมการที่ (8) เป็นเงื่อนไขเพื่อกำหนดให้งานทุกงานจะต้องมีหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานและพนักงานควบคุม สมการที่ (9) และ (10) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดจำนวนงานขั้นต่ำและจำนวนงานสูงสุด (ตามลำดับ) ให้กับพนักงาน สมการที่ (11) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดจำนวนงานขั้นต่ำให้กับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน สมการที่ (12) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดให้หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานทุกตัวจะต้องมีพนักงานควบคุม 1 คน สมการที่ (13) และ (14) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดจำนวนหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานขั้นต่ำและสูงสุด (ตามลำดับ) ให้กับพนักงานแต่ละคน สมการที่ (15) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดให้ตัวแปรการตัดสินใจของการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานและพนักงานมีความสอดคล้องกัน โดยที่ M คือค่ามาก ๆ สมการที่ (16) เป็นเงื่อนไขในการหาค่าตอบลำดับที่ 2 โดยกำหนดให้ค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 จะต้องไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ (η_i^*) สมการที่ (17) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น

โดยตัวอย่างการแก้ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานด้วยตัวแบบที่นำเสนอจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4. ปัญหาตัวอย่าง

ในการแสดงประสิทธิภาพของการแก้ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานด้วยวิธีที่นำเสนอ งานวิจัยนี้ได้กำหนดปัญหาตัวอย่างที่มีทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิตดังนี้ พนักงาน 4 คน หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน 4 ตัว และงาน 10 งาน โดยในการวิเคราะห์การประเมินการทำงานตามเกณฑ์ด้วยระบบอนุमानแบบฟัซซีนั้นจะใช้โปรแกรม MATLAB และทำการหาคำตอบของการมอบหมายงานด้วยตัวแบบที่นำเสนอตามสมการที่ (5)–(17) โดยใช้โปรแกรม Lingo 18.0

ในขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการประเมินตามเกณฑ์ของแต่ละความสัมพันธ์ที่ได้กำหนดเอาไว้ในตารางที่ 2 และทำการวิเคราะห์ผลการประเมินด้วยระบบอนุमानแบบฟัซซีตามมุมมองของค่าสมรรถนะและค่าความพึงพอใจในแต่ละความสัมพันธ์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานกับงาน หุ่นยนต์กับงาน และพนักงานกับหุ่นยนต์แสดงได้ดังตารางที่ 4 5 และ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์การประเมินการทำงานตามเกณฑ์ของความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานกับงาน

	W_1	W_2	W_3	W_4
H_1	0.681 ^a /0.570 ^b	0.512/0.357	0.616/0.832	0.605/0.804
H_2	0.586/0.520	0.716/0.729	0.682/0.562	0.593/0.552
H_3	0.651/0.393	0.428/0.675	0.826/0.530	0.837/0.714
H_4	0.539/0.552	0.175/0.533	0.547/0.543	0.401/0.404
H_5	0.344/0.528	0.833/0.381	0.837/0.563	0.43/0.508
H_6	0.648/0.474	0.429/0.515	0.193/0.841	0.195/0.426
H_7	0.164/0.835	0.176/0.617	0.646/0.629	0.273/0.654
H_8	0.550/0.837	0.837/0.503	0.521/0.837	0.431/0.826
H_9	0.837/0.521	0.821/0.719	0.779/0.413	0.179/0.617
H_{10}	0.559/0.441	0.515/0.559	0.595/0.644	0.368/0.837

หมายเหตุ ^a หมายถึง FIS_{WH} และ ^b หมายถึง FIS_{HW}

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การประเมินการทำงานตามเกณฑ์ของความสัมพันธ์ระหว่างหุ่นยนต์กับงาน

	R_1	R_2	R_3	R_4
H_1	0.506 ^c /0.837 ^d	0.653/0.522	0.163/0.617	0.586/0.520
H_2	0.541/0.629	0.361/0.718	0.837/0.546	0.812/0.648
H_3	0.163/0.530	0.185/0.552	0.587/0.679	0.822/0.651
H_4	0.693/0.550	0.593/0.833	0.741/0.507	0.503/0.595
H_5	0.690/0.823	0.315/0.603	0.827/0.545	0.628/0.652
H_6	0.582/0.473	0.634/0.534	0.724/0.595	0.342/0.688
H_7	0.833/0.630	0.163/0.683	0.179/0.52	0.782/0.664
H_8	0.378/0.828	0.615/0.545	0.626/0.474	0.785/0.556
H_9	0.321/0.598	0.837/0.681	0.826/0.805	0.822/0.707
H_{10}	0.554/0.638	0.692/0.447	0.733/0.762	0.714/0.411

หมายเหตุ ^c แทน FIS_{RH} และ ^d แทน FIS_{HR}

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์การประเมินการทำงานตามเกณฑ์ของความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานกับหุ่นยนต์

	W_1	W_2	W_3	W_4
R_1	0.656 ^e /0.450 ^f	0.238/0.450	0.318/0.450	0.493/0.450
R_2	0.588/0.577	0.822/0.577	0.837/0.577	0.72/0.577
R_3	0.612/0.826	0.277/0.826	0.814/0.826	0.831/0.826
R_4	0.822/0.555	0.646/0.622	0.837/0.837	0.669/0.581

หมายเหตุ ^e หมายถึง FIS_{WR} และ ^f หมายถึง FIS_{RW}

ในขั้นตอนสุดท้ายค่าที่ได้จากการประเมินข้างต้นจะถูกนำมาใช้ในตัวแบบที่นำเสนอ เพื่อหาคำตอบของการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานในปัญหาตัวอย่าง ซึ่งจากการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 นั้น ค่าสมรรถนะโดยรวม (Z_1) และค่าความพึงพอใจโดยรวม (Z_2) มีค่าเท่ากับ 0.724 และ 0.586 ตามลำดับ โดยค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 0.276 และ 0.414 ตามลำดับ และเมื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 2 โดยกำหนดให้ค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 มีค่ายึดหยุ่นได้ไม่เกินร้อยละ 10 จากค่าเดิม (หรือมีค่าเท่ากับ 0.304) ค่าสมรรถนะโดยรวม (Z_1) นั้นมีค่าเท่ากับ 0.699 ในขณะที่ค่าความพึงพอใจโดยรวม (Z_2) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.643 โดยในการ

หาคำตอบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 2 ค่าความพึงพอใจโดยรวมของความสัมพันธระหว่างพนักงานกับงาน (FIS_{JW}) และหุ่นยนต์กับงาน (FIS_{JR}) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.503 เป็น 6.624 และ 6.003 เป็น 6.572 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 7) แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาสมรรถนะในการทำงานเพียงมุมมองเดียวไม่สามารถตัดสินได้ว่าพนักงานจะมีความพึงพอใจกับงานมากที่สุด รวมถึงหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานจะสามารถปฏิบัติงานได้ตามข้อกำหนดของงานเสมอไป

ตารางที่ 7 ผลการมอบหมายงานด้วยวิธีการที่นำเสนอ

min η_1	วัตถุประสงค์ลำดับที่ 1			วัตถุประสงค์ลำดับที่ 2		
	FIS_{WH}	6.805 ^g	0.681 ^h	FIS_{HW}	5.503	0.550
	FIS_{RH}	7.042	0.704	FIS_{HR}	6.003	0.600
	FIS_{WR}	3.146	0.787	FIS_{RW}	2.433	0.608
	Z_1	0.724		Z_2	0.586	
min η_2	η_1	0.276		η_2	0.414	
	วัตถุประสงค์ลำดับที่ 1			วัตถุประสงค์ลำดับที่ 2		
	FIS_{WH}	6.614	0.661	FIS_{HW}	6.624	0.662
	FIS_{RH}	6.494	0.649	FIS_{HR}	6.572	0.657
	FIS_{WR}	3.146	0.787	FIS_{RW}	2.433	0.608
	Z_1	0.699		Z_2	0.643	
	$\eta_1 \leq \eta_1^* (0.304)$ ร้อยละ 10 จาก $\eta_1 (0.276)$					
	η_1	0.301		η_2	0.357	

หมายเหตุ ^g หมายถึง ค่าผลรวมของ FIS ในการมอบหมายงาน และ

^h หมายถึง ค่าเฉลี่ยของ FIS ในการมอบหมายงาน

นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์พบว่าวิธีที่นำเสนอให้ค่าสมรรถนะของทั้ง 3 ความสัมพันธ์ (FIS_{WH} , FIS_{RH} , FIS_{WR}) ที่ดีกว่า เช่นเดียวกับค่าความพึงพอใจในแต่ละความสัมพันธ์ (FIS_{HW} , FIS_{HR}) มีเพียงค่าความพึงพอใจของพนักงานต่อหุ่นยนต์ (FIS_{RW}) ที่วิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์มีค่าดีกว่าอยู่ 0.023 อย่างไรก็ตามแม้ว่าวิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์จะให้ค่าความพึงพอใจของพนักงานต่อหุ่นยนต์ที่ดีกว่า

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในภาพรวมจะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าทั้งในส่วนของค่าสมรรถนะโดยรวม (Z_1) ที่มากกว่าถึง 0.199 หรือเท่ากับ 0.699 และค่าความพึงพอใจโดยรวม (Z_2) ที่มากกว่า 0.009 หรือเท่ากับ 0.643 ซึ่งชี้ให้เห็นถึงข้อดีของการพิจารณาความสัมพันธ์แบบหลายเกณฑ์ตามวิธีที่นำเสนอโดยการเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์แสดงได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากวิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์และวิธีที่นำเสนอ

วิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์	สถานีนงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานที่ได้					วิธีที่นำเสนอ	สถานีนงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานที่ได้				
	หุ่นยนต์	พนักงาน	งานที่ได้รับมอบหมาย				หุ่นยนต์	พนักงาน	งานที่ได้รับมอบหมาย		
	R_1	W_3	H_2	H_8	-		R_1	W_1	H_1	H_4	H_6
	R_2	W_4	H_9	H_{10}	-		R_2	W_2	H_2	H_9	-
	R_3	W_1	H_1	H_5	H_7		R_3	W_4	H_3	H_{10}	-
	R_4	W_2	H_3	H_4	H_6		R_4	W_3	H_5	H_7	H_8
	ค่า FIS โดยรวมของแต่ละความสัมพันธ์						ค่า FIS โดยรวมของแต่ละความสัมพันธ์				
	FIS_{WJ}	0.397	FIS_{JW}	0.651			FIS_{WJ}	0.661*	FIS_{JW}	0.662*	
	FIS_{RJ}	0.528	FIS_{JR}	0.620			FIS_{RJ}	0.649*	FIS_{JR}	0.657*	
	FIS_{WR}	0.574	FIS_{RW}	0.631*			FIS_{WR}	0.787*	FIS_{RW}	0.608	
Z_1	0.500	Z_2	0.634		Z_1	0.699*	Z_2	0.643*			

หมายเหตุ * หมายถึง ค่าที่ดีที่สุด

5. การอภิปรายและสรุปผล

จากการที่มีหลายปัจจัยเกี่ยวข้องกับการทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน การมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานโดยไม่คำนึงถึงปัจจัยที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยนี้จึงมีผลต่อสมรรถนะและความพึงพอใจในการทำงาน นอกจากนี้ในกรณีที่มีการพิจารณาเพียงมุมมองเดียว แม้ว่าจะทำให้มีค่าที่พิจารณาในมุมมองนั้นเป็นค่าสูงสุด แต่ก็เป็นการมองข้ามมุมมองอื่น ๆ ที่มีความสำคัญเช่นกัน

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีในการแก้ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานที่มีการประเมินการทำงานแบบหลายเกณฑ์ เพื่อให้สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบหลักทั้ง 3 ส่วนของปัญหานี้ ได้แก่ พนักงาน หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน และงาน ภายใต้การพิจารณาความสัมพันธ์ 3 รูปแบบคือ ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน (P_1) ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานกับงาน (P_2) และความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน (P_3) ได้อย่างครอบคลุมทั้งในส่วน of สมรรถนะในการทำงานและความพึงพอใจในการทำงาน และใช้ระบบอนุमानแบบฟัซซี่ (FIS) ในการวิเคราะห์การประเมินการทำงานตามเกณฑ์ที่กำหนดขึ้นและนำผลที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการหาคำตอบของการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานด้วยตัวแบบที่นำเสนอ

ในส่วนของการมอบหมายงานด้วยตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายที่มีหลายวัตถุประสงค์ที่ได้นำเสนอนั้น จะเห็นได้ว่าวิธีที่ได้นำเสนอมีการพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทั้งในส่วน of พนักงานกับงาน หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานกับงาน และพนักงานกับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานเพื่อทำการหาคำตอบของการมอบหมายงานที่ทำให้ทั้งค่าสมรรถนะในการทำงานและค่าความพึงพอใจในการทำงานที่ค่าสูงที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยจากการหาคำตอบของปัญหาตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าคำตอบที่ได้จากวิธีที่ได้นำเสนอนั้นมีค่าสมรรถนะโดยรวมที่ดีกว่าวิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของ

หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานถึง 0.199 หรือร้อยละ 19.9 และมีค่าความพึงพอใจโดยรวมที่ดีกว่า 0.009 หรือร้อยละ 0.9

ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันว่าวิธีที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถให้คำตอบของปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานที่เหมาะสมทั้งในส่วน of ค่าสมรรถนะและความพึงพอใจในการทำงาน เนื่องจากมีการพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้อย่างครอบคลุมกว่าการพิจารณาเพียงมุมมองเดียว

แม้ว่าวิธีการและตัวแบบที่ได้นำเสนอนั้นจะไม่มีข้อจำกัดของจำนวนพนักงาน หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน และงาน แต่ในส่วน of การวิเคราะห์ผลจากการประเมินด้วยระบบอนุमानแบบฟัซซี่นั้นจะต้องใช้เวลาในการประมวลผลขึ้นอยู่กับขนาด of ปัญหา หากปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น โปรแกรม MATLAB จะใช้เวลาในการประมวลผลนานขึ้น รวมถึงในส่วน of การหาคำตอบของการมอบหมายงานด้วยตัวแบบที่ได้นำเสนอนั้น หากผู้ใช้งานทำการหาคำตอบด้วย Solver ในโปรแกรม Excel จะสามารถแก้ปัญหามาตรฐานได้ถึงปานกลางที่มีตัวแปรไม่เกิน 200 ตัวแปรได้ แต่สำหรับปัญหามาตรฐานใหญ่นั้นจำเป็นต้องใช้โปรแกรมที่มีความสามารถมากขึ้นในการแก้ปัญหา

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Nahavandi, "Industry 5.0—A Human-Centric Solution," *Sustainability*, vol. 11, p. 4371, 2019.
- [2] J. Pizon, M. Cioch, L. Kanski and E. Sánchez García, "Cobots Implementation in the Era of Industry 5.0 Using Modern Business and Management Solutions," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 16, no. 6, pp. 166-178, 2022.

- [3] J. E. Colgate, W. Wannasuphoprasit and M. A. Peshkin, "Cobots: robots for collaboration with human operators," in *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC*, vol. 58, pp. 433-439, 1996.
- [4] M. Kimaporn and W. Nunkaew, "A Fuzzy Inference System-Based Hybrid Assignment Method for Cobot Assignment Problem," in *Robotics, Automation, and Artificial Intelligence*, Singapore, December 14 - 16 2023.
- [5] A. Djuric, R. J. Urbanic and J. Rickli, "A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems," *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 9, 2016.
- [6] A. Zanella, A. Cisi, M. Costantino, M. Di Pardo, G. Pasquettaz and G. Vivo, "Criteria Definition for the Identification of HRC Use Cases in Automotive Manufacturing," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 372-379, 2017.
- [7] A. Bettoni, E. Montini, M. Righi, V. Villani, R. Tsvetanov, S. Borgia, C. Secchi and E. Carpanzano, "Mutualistic and Adaptive Human-Machine Collaboration Based on Machine Learning in an Injection Moulding Manufacturing Line," *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 395-400, 2020.
- [8] P. Tsarouchi, S. Makris and G. Chryssolouris, "Human-robot interaction review and challenges on task planning and programming," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 8, pp. 916-931, 2016.
- [9] A. A. Malik and A. Bilberg, "Complexity-based task allocation in human-robot collaborative assembly," *Industrial Robot*, 2019.
- [10] F. Ranz, V. Hummel, and W. Sihn, "Capability-based task allocation in human-robot collaboration," *Procedia manufacturing*, vol.9, pp.182-189, 2017.
- [11] M. Faccio, I. Granata and R. Minto, "Task allocation model for human-robot collaboration with variable cobot speed," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol.15, pp.793-806, 2024.
- [12] A. Raatz, S. Blankemeyer, T. Recker, D. Pischke and P. Nyhuis, "Task scheduling method for HRC workplaces based on capabilities and execution time assumptions for robots," *CIRP Annals*, vol. 69, no. 1, pp. 13-16, 2020.
- [13] S. Blankemeyer, T. Recker, T. Stuke, J. Brokmann, M. Geese, M. Reiniger, D. Pischke, A. Oubari and A. Raatz, "A Method to Distinguish Potential Workplaces for Human-Robot Collaboration," *Procedia CIRP*, vol. 76, pp. 171-176, 2018.
- [14] P. Tsarouchi, S. Makris and G. Chryssolouris, "Human – robot interaction review and challenges on task planning and programming," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 29, pp. 1-16, 2016.
- [15] P. Tsarouchi, J. Spiliotopoulos, G. Michalos, S. Koukas, A. Athanasatos, S. Makris and G. Chryssolouris, "A Decision Making Framework for Human Robot Collaborative Workplace Generation," *Procedia CIRP*, vol. 44, pp. 228-232, 2016.

- [16] M. Faber, A. Mertens and C. Schlick, "Cognition-enhanced assembly sequence planning for ergonomic and productive human-robot collaboration in self-optimizing assembly cells," *Production Engineering*, vol. 11, 2017.
- [17] A. Kinast, K. F. Doerner, and S. Rinderle-Ma, "Biased random-key genetic algorithm for cobot assignment in an assembly/disassembly job shop scheduling problem," *Procedia Computer Science*, vol. 180, pp. 328-337, 2021.
- [18] A. Kinast, K. F. Doerner and S. Rinderle-Ma, "Combining metaheuristics and process mining: Improving cobot placement in a combined cobot assignment and job shop scheduling problem," *Procedia Computer Science*, vol. 200, pp. 1836-1845, 2022.
- [19] A. Kinast, R. Braune, K. F. Doerner, S. Rinderle-Ma and C. Weckenborg, "A hybrid metaheuristic solution approach for the cobot assignment and job shop scheduling problem," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 28, p. 100350, 2022.
- [20] M. C. Gombolay, R. A. Gutierrez, S. G. Clarke, G. F. Sturla and J. A. Shah, "Decision-making authority, team efficiency and human worker satisfaction in mixed human-robot teams," *Autonomous Robots*, vol. 39, no. 3, pp. 293-312, 2015.
- [21] C. Schmidbauer, S. Zafari, B. Hader and S. Schlund, "An Empirical Study on Workers' Preferences in Human-Robot Task Assignment in Industrial Assembly Systems," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Article vol. 53, no. 2, pp. 293-302, 2023.
- [22] A. Tausch, A. Kluge, and L. Adolph, "Psychological Effects of the Allocation Process in Human-Robot Interaction - A Model for Research on ad hoc Task Allocation," *Frontiers in Psychology*, vol. 11, 2020.
- [23] D. M. D'Addona, F. Bracco, A. Bettoni, N. Nishino, E. Carpanzano and A. A. Bruzzone, "Adaptive automation and human factors in manufacturing: An experimental assessment for a cognitive approach," *CIRP Annals*, vol. 67, no. 1, pp. 455-458, 2018.
- [24] T. Koltai, I. Dimény, V. Gallina, A. Gaal and C. Sepe, "An analysis of task assignment and cycle times when robots are added to human-operated assembly lines, using mathematical programming models," *International Journal of Production Economics*, vol. 242, p. 108292, 2021.
- [25] G. Boschetti, M. Faccio, M. Milanese, R. Minto, "C-ALB (Collaborative Assembly Line Balancing): a new approach in cobot solutions," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, no. 9, pp. 3027-3042, 2021.
- [26] G. Michalos, J. Spiliotopoulos, S. Makris and G. Chrysosolouris, "A method for planning human robot shared tasks," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 22, pp. 76-90, 2018.
- [27] L. Gualtieri, E. Rauch, R. Vidoni, and D. T. Matt, "Safety, Ergonomics and Efficiency in Human-Robot Collaborative Assembly: Design

- Guidelines and Requirements," *Procedia CIRP*, vol. 91, pp. 367-372, 2020.
- [28] Y. Y. Liao and K. Ryu, "Task Allocation in Human-Robot Collaboration (HRC) Based on Task Characteristics and Agent Capability for Mold Assembly," *Procedia Manufacturing*, vol. 51, pp. 179-186, 2020.
- [29] Y. Y. Liao and K. Ryu, "Genetic algorithm-based task allocation in multiple modes of human-robot collaboration systems with two cobots," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 11, pp. 7291-7309, 2022.
- [30] D. Guo, "Fast scheduling of human-robot teams collaboration on synchronised production-logistics tasks in aircraft assembly," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 85, p. 102620, 2024.
- [31] M. IJtsma, L. M. Ma, A. R. Pritchett and K. M. Feigh, "Computational Methodology for the Allocation of Work and Interaction in Human-Robot Teams," *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, vol. 13, no. 4, pp. 221-241, 2019.
- [32] A. Bilberg and A. A. Malik, "Digital twin driven human-robot collaborative assembly," *CIRP Annals*, vol. 68, no. 1, pp. 499-502, 2019.
- [33] M. Dalle Mura and G. Dini, "Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach," *CIRP Annals*, vol. 68, no. 1, pp. 1-4, 2019.
- [34] M. Dalle Mura and G. Dini, "Optimizing ergonomics in assembly lines: A multi objective genetic algorithm," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 27, pp. 31-45, 2019.
- [35] V. V. Unhelkar et al., "Human-Aware Robotic Assistant for Collaborative Assembly: Integrating Human Motion Prediction With Planning in Time," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 2394-2401, 2018.
- [36] G. Evangelou, N. Dimitropoulos, G. Michalos and S. Makris, "An approach for task and action planning in Human-Robot Collaborative cells using AI," *Procedia CIRP*, vol. 97, pp. 476-481, 2021.
- [37] S. Takata and T. Hirano, "Human and robot allocation method for hybrid assembly systems," *CIRP Annals*, vol. 60, no. 1, pp. 9-12, 2011.
- [38] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.
- [39] D. S. Hooda, V. Raich, and C. St, *Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control. An Introduction*. 2022.
- [40] G. Feng, "Analysis and Synthesis of Fuzzy Control Systems: A Model-Based Approach," 2010.
- [41] Z. Kovacic and S. Bogdan, *Fuzzy Controller Design: Theory and Applications*. 2010.
- [42] İ. Altas, *Fuzzy Logic Control in Energy Systems with design applications in MATLAB®/Simulink®*. 2017.
- [43] M. H. Eghbal Ahmadi, S. J. Royaei, S. Tayyebi, and R. Bozorgmehry Boozarjomehry, "A new insight into implementing Mamdani fuzzy inference system for dynamic process modeling: Application on flash separator fuzzy dynamic modeling," *Engineering*

Applications of Artificial Intelligence, vol. 90, p. 103485, 2020.

8. ภาคผนวก

คำอธิบายเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา

P₁: ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน

P₁₋₁: สมรรถนะโดยรวมในการทำงานของพนักงาน

C₁: ความสามารถในการผลิต หมายถึงจำนวนชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่พนักงานสามารถผลิตได้ในเวลาที่กำหนด โดยเก็บข้อมูลเป็นจำนวนชิ้นงานที่พนักงานผลิต (หน่วย)

C₂: คุณภาพของชิ้นงาน หมายถึงความถูกต้องของชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่พนักงานทำการผลิตได้ตามมาตรฐานและข้อกำหนด โดยเก็บข้อมูลเป็นร้อยละของชิ้นงานดีที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ (ร้อยละ)

C₃: ความต่อเนื่องในการปฏิบัติงาน หมายถึงความสามารถในการทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดพัก โดยเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาที่พนักงานสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง (ชั่วโมง)

C₄: ทักษะการปฏิบัติงาน หมายถึงความสามารถและความเชี่ยวชาญของพนักงานในการทำงานที่ได้รับมอบหมาย โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนจากการประเมินโดยหัวหน้างานภายใต้การวัดทักษะและความเชี่ยวชาญของพนักงานในการทำงาน (คะแนน)

P₁₋₂: ความพึงพอใจของพนักงานต่องาน

C₅: การเคลื่อนไหวและการยศาสตร์ หมายถึงความเหมาะสมของการเคลื่อนไหวร่างกายของพนักงานและความเหมาะสมของสถานงาน โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนจากการประเมินการทำงานของพนักงานในแต่ละสถานงาน (คะแนน)

C₆: ความยืดหยุ่นในการปฏิบัติงาน หมายถึงพนักงานมีเวลาพักและเวลาทำงานได้อย่างสมดุล โดยเก็บข้อมูลเป็นการประเมินความยืดหยุ่นในการทำงานโดยพนักงาน (คะแนน)

C₇: ความเครียดจากการปฏิบัติงาน หมายถึงภาวะทางจิตที่เกิดขึ้นจากการทำงานในสถานงานที่ก่อให้เกิดความกังวล ความเครียด หรือภาวะกดดัน โดยเก็บข้อมูลจากการให้

พนักงานประเมินระดับความเครียดที่รู้สึกในระหว่างการทำงาน (คะแนน)

C₈: การเปลี่ยนแปลงของงาน หมายถึงระดับของความหลากหลายและการปรับเปลี่ยนลักษณะการทำงานที่ไม่คงที่ โดยเก็บข้อมูลเป็นการประเมินการเปลี่ยนแปลงลักษณะของงานในการทำงาน (คะแนน)

P₂: ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงาน

P₂₋₁: สมรรถนะโดยรวมในการทำงานของหุ่นยนต์

C₉: ความสามารถในการผลิต หมายถึงจำนวนชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่หุ่นยนต์สามารถผลิตได้ในเวลาที่กำหนด โดยเก็บข้อมูลเป็นจำนวนชิ้นงานที่หุ่นยนต์ผลิต (หน่วย)

C₁₀: คุณภาพของชิ้นงาน หมายถึงความถูกต้องของชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่หุ่นยนต์ทำการผลิตได้ตามมาตรฐานและข้อกำหนด โดยเก็บข้อมูลเป็นร้อยละของชิ้นงานดีที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ (ร้อยละ)

C₁₁: รอบเวลาการผลิตที่เหมาะสม หมายถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงาน โดยเก็บข้อมูลเป็นเวลาที่ใช้ในการผลิตตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนเสร็จสิ้น (ชั่วโมง)

C₁₂: ฟังก์ชันการทำงานของหุ่นยนต์ หมายถึงรูปแบบในการทำงานที่เข้ากันได้ระหว่างหุ่นยนต์กับงานที่ได้รับมอบหมาย โดยเก็บข้อมูลจากการสังเกตและประเมินการทำงานของหุ่นยนต์จากผู้ควบคุมหรือผู้ดูแลหุ่นยนต์ (คะแนน)

P₂₋₂: ข้อจำกัดในการทำงานของหุ่นยนต์

C₁₃: แรงและกำลังสูงสุด หมายถึงความสามารถของหุ่นยนต์ในการสร้างแรงและกำลังสูงสุดในการทำงาน เช่น การยกของหนัก การกด หรือการบีบ เป็นต้น โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนตามความสามารถของหุ่นยนต์ในการสร้างแรงและกำลังที่เหมาะสมกับงานที่ได้รับมอบหมาย (คะแนน)

C₁₄: พื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ หมายถึงขอบเขตหรือพื้นที่ที่หุ่นยนต์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนตามความสามารถของหุ่นยนต์ในการเข้าถึงงานและทำงานได้อย่างเหมาะสม (คะแนน)

C₁₅: ความเหมาะสมของวัสดุ หมายถึงส่วนประกอบของโครงสร้างหุ่นยนต์ที่เหมาะสมกับการทำงาน วัสดุบางประเภทอาจจะไม่เหมาะกับงานที่ใช้ความร้อนสูง โดยเก็บ

ข้อมูลเป็นคะแนนตามความเหมาะสมของวัสดุที่เป็น
ส่วนประกอบของหุ่นยนต์กับงาน (คะแนน)

C₁₆: ความซับซ้อนของระบบ หมายถึงความสามารถของ
เทคโนโลยีของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทำงานที่หลากหลาย โดย
เก็บข้อมูลเป็นคะแนนตามความเข้ากันได้ระหว่างระบบของ
หุ่นยนต์ในการทำงาน (คะแนน)

P₃: ความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์

P₃₋₁: สมรรถนะโดยรวมในการทำงานร่วมกันของ พนักงานกับหุ่นยนต์

C₁₇: ความสามารถในการผลิตร่วมกัน หมายถึงจำนวน
ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตได้จากการทำงาน
ร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์และพนักงานในช่วงเวลาที่กำหนด
โดยเก็บข้อมูลเป็นจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ในเวลาที่
กำหนด (หน่วย)

C₁₈: คุณภาพของชิ้นงาน หมายถึงความถูกต้องของชิ้นงาน
หรือผลิตภัณฑ์ที่พนักงานทำการผลิตร่วมกับหุ่นยนต์ได้ตาม
มาตรฐานและข้อกำหนด โดยเก็บข้อมูลเป็นร้อยละของ
ชิ้นงานดีที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ (ร้อยละ)

C₁₉: ความต่อเนื่องในการปฏิบัติงานร่วมกัน หมายถึง
ระยะเวลาที่พนักงานและหุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกันได้
อย่างต่อเนื่องและไม่มีการหยุดชะงัก โดยเก็บข้อมูลเป็น
ระยะเวลาที่พนักงานและหุ่นยนต์ทำงานร่วมกันอย่าง
ต่อเนื่อง (ชั่วโมง)

C₂₀: ทักษะการควบคุมหุ่นยนต์ หมายถึงความสามารถของ
พนักงานในการควบคุมและจัดการหุ่นยนต์อย่างมี
ประสิทธิภาพ โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนตามระดับทักษะ
การควบคุมหุ่นยนต์ของพนักงาน (คะแนน)

P₃₋₂: ความพึงพอใจของพนักงานต่อหุ่นยนต์

C₂₁: การเคลื่อนไหวและการยศาสตร์ หมายถึงความ
เหมาะสมของการเคลื่อนไหวของพนักงานในการทำงาน
ร่วมกับหุ่นยนต์และการออกแบบตามหลักการยศาสตร์ โดย
เก็บข้อมูลเป็นคะแนนจากการประเมินความเหมาะสมของ
การเคลื่อนไหวของพนักงาน (คะแนน)

C₂₂: ความยืดหยุ่นในการควบคุมหุ่นยนต์ หมายถึง
ความสามารถของพนักงานในการปรับคำสั่งหรือการควบคุม

ที่เปลี่ยนแปลงได้ โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนจากการประเมิน
ความยืดหยุ่นในกระบวนการทำงานจากพนักงาน (คะแนน)

C₂₃: ความกังวลจากการควบคุมหุ่นยนต์ หมายถึงภาวะทาง
จิตที่เกิดขึ้นจากการทำงานของพนักงานในการควบคุมและ
ทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนตามระดับ
ความกังวลและความเครียดที่พนักงานรู้สึกระหว่างการ
ควบคุมหุ่นยนต์ (คะแนน)

C₂₄: ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน หมายถึงการทำงาน
ร่วมกับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานโดยปราศจากความเสี่ยงที่จะ
เกิดเหตุร้ายแรงหรืออุบัติเหตุระหว่างการทำงาน โดยเก็บ
ข้อมูลเป็นคะแนนตามระดับความปลอดภัยที่พนักงานรู้สึก
จากการทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ (คะแนน)