

การจัดสรรภาระงานยกอย่างเหมาะสม โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MILP ภายใต้ข้อจำกัดทางเวลาและการยศาสตร์

กิตติพงศ์ ศรีสวาท^{1*} ประจวบ กล่อมจิตร¹ และ ธนิตา หนูทวี²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย

¹เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน ตำบลพระปฐมเจดีย์ อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย 73000

²เลขที่ 225 ถนน พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10330

รับบทความ 9 พฤศจิกายน 2568 แก้ไขบทความ 12 มิถุนายน 2569 ตอรับบทความ 24 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแบบจำลองการจัดสรรภาระงานยกอย่างเหมาะสม โดยประยุกต์ใช้ แบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Linear Programming: MILP) ภายใต้ภายใต้แนวคิดการจัดสรรเชิงกำหนด (Deterministic Allocation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดความเสี่ยงทางการยศาสตร์ในงานยกซ้ำซ้อน ข้อมูลเชิงทดลองถูกรวบรวมจากอาสาสมัครจำนวน 10 คน ในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมสภาพแวดล้อม โดยแต่ละคนปฏิบัติงานยกวัตถุหนัก 10 กิโลกรัม พร้อมบันทึกวิดีโอเพื่อวิเคราะห์เวลาและท่าทางการยกในแต่ละช่วง และประเมินความเสี่ยงด้วยคะแนน RULA (Rapid Upper Limb Assessment) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวลารวมต่อรอบการยกเท่ากับ 7.17 วินาที และคะแนน RULA อยู่ในระดับความเสี่ยงปานกลาง แบบจำลอง MILP ถูกนำมาจัดสรรภาระงานในสามกรณี ได้แก่ (A) ลดภาระรวมสูงสุด, (B) การจัดสรรยุติธรรม และ (C) การกระจายภาระเท่ากัน ผลการหาค่าเหมาะที่สุดพบว่า กรณี A ให้ค่าภาระรวมต่ำที่สุดแต่ไม่ยุติธรรม ขณะที่กรณี B ให้การจัดสรรสมดุลทั้งด้านประสิทธิภาพและความเป็นธรรม ส่วนกรณี C เหมาะกับการประยุกต์ใช้จริงในงานที่ต้องการการบริหารจัดการง่าย ผลการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) โดยปรับค่าพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นและลดลงร้อยละ 10 ยืนยันว่าแบบจำลองมีความเสถียรสูงและไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า MILP สามารถใช้เป็นกรอบการตัดสินใจเชิงปริมาณในการออกแบบนโยบายการจัดสรรงานยกที่ปลอดภัย ลดภาระทางกายภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : การจัดสรรภาระงานยก; แบบจำลอง MILP; การยศาสตร์; การประเมิน RULA; การจัดสรรเชิงกำหนด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 1731 4559, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: srisawat_k4@silpakorn.edu

Optimal Allocation of Lifting Workload Using MILP Model under Time and Ergonomic Constraints

Kittipong Srisawat^{1*} Prachuab Klomjit¹ and Tanisa Nootawee²

¹Faculty of Engineering and Industrial technology, Silpakorn University

²Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

¹6, Rajamankha Nai Rd, Phra Prathom Chedi Sub-district, Mueang Nakhon Pathom District, Nakhon Pathom, 73000

²225 Phayathai Road, Pathum Wan Subdistrict, Pathum Wan District, Bangkok, 10330

Received 9 November 2025; Revised 12 June 2026; Accepted 24 June 2026

Abstract

This study aims to develop an optimal workload allocation model for manual lifting tasks by applying a Mixed Integer Linear Programming (MILP) framework under the Deterministic Allocation concept. The objective is to enhance operational efficiency while minimizing ergonomic risks in repetitive lifting activities. Experimental data were collected from ten volunteers in a controlled laboratory environment. Each participant performed repetitive lifting tasks of 10 kg objects, while video recordings were used to analyze time duration and postural behavior in each lifting phase. The ergonomic risk level was assessed using the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) method. The results showed that the average lifting cycle time was 7.17 seconds, and the overall RULA scores indicated a moderate risk level. The MILP model was then applied to determine optimal workload allocation under three scenarios: (A) minimum total ergonomic load, (B) fair distribution, and (C) equal distribution. The findings revealed that scenario A achieved the lowest total risk but lacked fairness, while scenario B provided a balanced allocation between efficiency and equity. Scenario C demonstrated practicality for real applications requiring ease of management. Sensitivity analysis $\pm 10\%$ confirmed the model's robustness and low sensitivity to parameter variations. Overall, the study highlights that MILP can serve as a quantitative decision-making framework for designing safe, ergonomic, and efficient lifting workload allocation policies.

Keywords : Lifting workload allocation; MILP model; Ergonomics; RULA assessment; Deterministic allocation

** Corresponding Author. Tel.: +669 1731 4559, E-mail Address: srisawat_k4@silpakorn.edu*

1. บทนำ

ภาระทางกายจากงานยกซ้ำซ้อน (repetitive lifting) เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดกลุ่มอาการบาดเจ็บของระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อที่เกี่ยวข้องเนื่องจากการทำงาน (Work-related Musculoskeletal Disorders: WMSDs) โดยเฉพาะบริเวณหลังส่วนล่าง ไหล่ และข้อมือ ซึ่งกระทบทั้งประสิทธิภาพการทำงานและต้นทุนด้านสุขภาพขององค์กร [1] ในอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานมนุษย์ การยกของซ้ำ ๆ ระยะเวลาสัมพันธ์กับอาการปวดเรื้อรังและสมรรถภาพการทำงานที่ลดลง ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของผู้ปฏิบัติงานและประสิทธิภาพระบบการผลิต งานวิจัยภาคสนามในประเทศไทยพบว่า กลุ่มที่มีการยกซ้ำและท่าทางไม่เหมาะสมมีคะแนนเสี่ยงการยศาสตร์สูงและอาการกล้ามเนื้อ/ปวดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [2], [3] ขณะเดียวกัน การปรับสถานงาน เช่น ปรับรูปแบบการทำงาน ตำแหน่งวัตถุ หรือใช้อุปกรณ์ช่วยยกสามารถลดคะแนน RULA/REBA และลดอาการไม่สบายได้ [4], [5] รวมถึงการยศาสตร์แบบมีส่วนร่วมและการให้ความรู้เรื่องท่าทางที่ถูกต้องก็ช่วยลดความเสี่ยงได้ต่อเนื่องในระยะยาว

การออกแบบมาตรการเชิงปฏิบัติการเพื่อลดความเสี่ยงของกระบวนการที่มีการยกซ้ำยังท้าทายเพราะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายมิติ เช่น ความถี่การยก น้ำหนัก ท่าทาง ลักษณะการเคลื่อนไหวซ้ำ และการสะสมความเมื่อยล้า จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเชิงปริมาณในการค้นหาทางเลือกที่ลดภาระกล้ามเนื้อโดยไม่กระทบประสิทธิภาพสายการผลิต ในบริบทนี้ งานวิจัยเชิงปริมาณโดยเฉพาะแบบจำลองเชิงเพิ่มประสิทธิภาพ (optimization) และโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) ถูกนำมาใช้เชื่อมโยงผลประโยชน์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์เข้ากับข้อจำกัดของระบบ เพื่อกำหนดนโยบายจัดตารางหรืองานยกที่ลดความเสี่ยงรวม [6],[7] ทั้งนี้ มีหลักฐานว่ารูปแบบเชิงเพิ่มประสิทธิภาพสามารถจำลองพฤติกรรมกรยกและคาดการณ์ภาระ

ทางชีวกลศาสตร์ได้ดี และเมื่อผสานกับข้อมูลประเมินการยศาสตร์ จะช่วยเสนอรูปแบบการปรับเปลี่ยนงานที่เหมาะสมทั้งด้านสุขภาพและประสิทธิภาพ [7] ขณะเดียวกัน เทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น การประมวลผลข้อมูล machine learning และระบบตรวจจับท่าทางแบบเรียลไทม์ ยังช่วยติดตามและวิเคราะห์ความเสี่ยงอย่างต่อเนื่องเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารและวิศวกร [1]

งานวิจัยนี้จึงเสนอกรอบการทำงานโดยใช้โปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) ในรูปแบบโมเดล MILP ด้วยวิธี Deterministic allocation เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงลดความเสี่ยงทางการยศาสตร์ในงานยกซ้ำซ้อน โดยใช้ข้อมูลการทดลองจากห้องปฏิบัติการจริงเพื่อศึกษาการจัดสรรงานที่เหมาะสมระหว่างความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและประสิทธิภาพการทำงาน อีกทั้งผลลัพธ์ยังคาดว่าจะเป็นแนวทางบริหารจัดการภาระงานเชิงระบบที่สามารถประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่นที่มีลักษณะงานยกซ้ำซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ขั้นตอนการวิจัย

2.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีความสำคัญเพื่อใช้เป็นแนวทางและกรอบในการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้

2.1.1 งานยกซ้ำซ้อน (repetitive lifting)

งานยกซ้ำซ้อน หรือการยกเคลื่อนย้ายวัสดุด้วยมืออย่างต่อเนื่อง เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดความผิดปกติของระบบกระดูกและกล้ามเนื้อจากการทำงาน WMSDs โดยเฉพาะบริเวณหลังส่วนล่าง ไหล่ และข้อมือ ซึ่งส่งผลต่อสมรรถภาพและคุณภาพชีวิตของผู้ปฏิบัติงาน [8] งานวิจัยในประเทศไทยพบว่า แรงงานหัตถกรรมไม้ไผ่ที่ยกหรือถือวัสดุบ่อยมีอาการผิดปกติทางโครงร่าง

กล้ามเนื้อสัมพันธ์กับลักษณะงานยก [9] การยกซ้ำซ้อน ครอบคลุมทั้งน้ำหนัก ความถี่ ท่าทาง ระยะเวลาทำงาน และความเมื่อยล้าสะสม ซึ่งร่วมกันเพิ่มภาระทางชีวกลศาสตร์จนร่างกายฟื้นตัวไม่ทัน [10]

การประเมินภาระงานดังกล่าวสามารถทำได้ด้วย NIOSH Lifting Equation เพื่อคำนวณดัชนียก (Lifting Index) โดย NIOSH แนะนำว่า $LI > 1.0$ แสดงถึงภาระที่มีความเสี่ยง [11] งานภาคสนามในพนักงานบรรจุแก๊ส จังหวัดสมุทรสาคร พบความชุกของ WMSDs สูงจากการยก เคลื่อนย้าย และท่าทางที่ไม่เหมาะสม [12] ดังนั้น การพิจารณาความถี่ น้ำหนัก ท่าทาง และเวลาพักจึงมีความจำเป็น เพื่อออกแบบมาตรการเชิงระบบด้วยแบบจำลองเชิงเส้น เพื่อลดภาระกล้ามเนื้อและความเสี่ยง WMSDs โดยไม่กระทบประสิทธิภาพการผลิต

2.1.2 การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ (Ergonomic Risk Assessment)

การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์เป็นขั้นตอนสำคัญในการจัดการภาระงานยกซ้ำ เครื่องมือที่ใช้บ่อยได้แก่ RULA, REBA และดัชนียก (Lifting Index) ของ NIOSH ซึ่งช่วยประเมินท่าทาง น้ำหนัก ความถี่ และระยะเวลาการยก [13], [14], [15] การรวมเครื่องมือเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองเชิงเส้นเพื่อลดความเสี่ยง สำหรับ RULA จะประเมินร่างกายส่วนบนและลำตัวโดยคำนวณคะแนนความเสี่ยงเชิงท่าทาง (Postural Load Score) เพื่อระบุระดับความเสี่ยงและความจำเป็นในการปรับปรุงสภาพการทำงาน โดยมีขั้นตอนและเกณฑ์ประเมินดังแสดงในรูปที่ 1

จากนั้นนำคะแนนทั้งสองส่วนมารวมเพื่อประเมินระดับความเสี่ยง RULA ตามตารางที่ 1

The image shows the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) form. It includes diagrams of the head/neck, shoulder, elbow, wrist, and hand, each with a scale from 1 to 6. There are also diagrams for the trunk and legs. The form includes a table for calculating the RULA score, with columns for 'RULA A' and 'RULA B'. The final RULA score is calculated as the average of RULA A and RULA B. The form also includes a section for 'Overall RULA Score' and a table for 'RULA Score Interpretation'.

รูปที่ 1 ขั้นตอนในการประเมินร่างกายส่วนบน
Rapid Upper Limb Assessment: RULA [16]

ตารางที่ 1 การแปลผลคะแนนความเสี่ยงรวม RULA

คะแนน	การแปลผล
1-2	ยอมรับได้ แต่อาจจะมีปัญหาทางการยศาสตร์ ถ้าถ้ามีการทำงานดังกล่าวซ้ำๆต่อเนื่องเป็นเวลานานกว่าเดิม
3-4	ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมและติดตามวัดผลอย่างต่อเนื่องอาจจะจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบงานใหม่
5-6	งานนั้นเริ่มเป็นปัญหา ควรทำการศึกษาเพิ่มเติม และควรปรับปรุง
7	งานนั้นมีปัญหาทางการยศาสตร์ และต้องมีการปรับปรุงทันที

2.1.3 การออกแบบสถานีงานในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Workstation Design)

การออกแบบสถานีทำงานในห้องปฏิบัติการมีความสำคัญต่อการลดความเสี่ยงด้านการยศาสตร์และเพิ่มประสิทธิภาพ โดยเฉพาะงานที่ทำซ้ำหรือยกอุปกรณ์บ่อย การจัดวางเครื่องมือให้เหมาะกับสรีระช่วยลดแรงกดดันทางกายและอาการเมื่อยล้า การใช้เครื่องมือประเมิน เช่น RULA และ REBA รวมถึงเทคโนโลยีตรวจจับท่าทางหรือการวิเคราะห์ภาพสามมิติ ช่วยปรับการจัดวางให้ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงต่อสุขภาพและยกระดับคุณภาพงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ [17]

2.1.4 การหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Theory)

การหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มหรือลดค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เช่น การเพิ่มผลผลิต การลดต้นทุน หรือการลดเวลา ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการตัดสินใจเชิงปริมาณในงานวิศวกรรมอุตสาหการ [18] สำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ นิยมใช้การหาค่าเหมาะที่สุดหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization: MOO) เพื่อค้นหาชุดคำตอบที่เหมาะสมภายใต้ความขัดแย้งของวัตถุประสงค์ต่าง ๆ โดยผลลัพธ์มักแสดงในรูปของ Pareto Front [19], [20]

2.1.5 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Linear Programming: LP) and (Mixed-Integer Linear Programming: MIP)

โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP) เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่สำคัญในการตัดสินใจเชิงปริมาณ เนื่องจากสามารถสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์และจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ในงานอุตสาหกรรมและการออกแบบงาน ฟังก์ชัน

วัตถุประสงค์และข้อจำกัดของ LP ถูกนิยามให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ดังสมการที่ (1) ส่วนข้อจำกัดเชิงเส้นเขียนได้ในสมการที่ (2)

$$\max/\min Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (1)$$

โดยที่

Z = ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

c_j = ค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าน้ำหนักของตัวแปรตัดสินใจ x_j ที่มีผลต่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เมื่อ $j = 1, 2, \dots, n$

x_j = ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variable)

j = ดัชนีของตัวแปรการตัดสินใจ

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \leq b_i \quad (2)$$

โดยที่

a_{ij} = สัมประสิทธิ์ของตัวแปร x_j ในข้อจำกัดที่ i

x_j = ตัวแปรการตัดสินใจ

b_i = ค่าด้านขวาของข้อจำกัด (Right-Hand Side)

i = ดัชนีของข้อจำกัด

j = ดัชนีของตัวแปรการตัดสินใจ

จากข้อจำกัดสามารถสะท้อนถึงข้อจำกัดในงานยศาสตร์ที่ทำในส่วนของ เวลา, จำนวนคนงาน, หรือทรัพยากรที่มีอยู่ จึงใช้วิธีแก้ปัญหาอย่าง Simplex Method และ Interior Point Method ที่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ขอบเขตที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ [18]

การขยาย LP เป็น MIP ใช้เมื่อบางตัวแปรต้องเป็นจำนวนเต็ม เช่น รอบการยกหรือจำนวนพนักงาน เพื่อจำลองสถานการณ์จริง โดยผสมตัวแปรจำนวนเต็มและตัวแปรจริงเข้าด้วยกัน ตัวอย่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ MIP แสดงดังสมการที่ (3)

$$Z = \sum_{j=1}^n c_jx_j \quad (3)$$

โดยที่

Z = ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$\sum_{j=1}^n c_j x_j$ = ผลรวมเชิงเส้น (Linear Sum)

x_j = ตัวแปรการตัดสินใจ

c_j = ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร

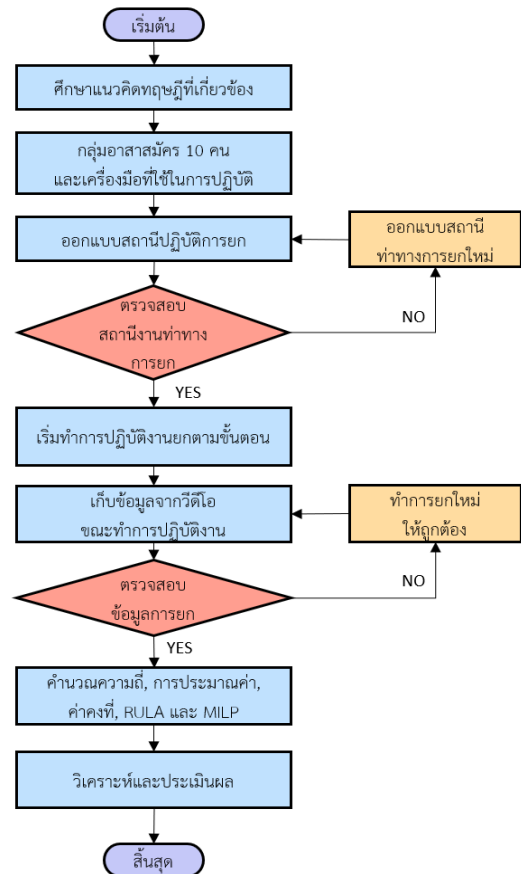
สำหรับแบบจำลอง MIP มีข้อกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจบางส่วนหรือทั้งหมดเป็นจำนวนเต็ม ซึ่งเป็นลักษณะที่แตกต่างจากแบบจำลอง LP ที่อนุญาตให้ตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนจริง

2.1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้โปรแกรมเชิงเส้นในงานการยศาสตร์

งานวิจัยช่วง 5 ปีที่ผ่านมาแสดงการบูรณาการ Optimization กับ Ergonomics ในอุตสาหกรรม โดยใช้ LP, MIP และ MILP เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดเวลา และลดความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ร่วมกับการใช้ Computer Vision และ biomechanical models เพื่อวิเคราะห์ท่าทางและลด WMSDs [21],[22] รวมถึงการประเมินการแทรกแซงทางการยศาสตร์ในงานจัดการวัสดุที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ [23] สะท้อนการบูรณาการเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพเพื่อออกแบบงานที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2 แนวคิดและกรอบการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ใช้แบบจำลอง MILP วิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพท่าทางการยกของผู้ปฏิบัติงาน โดยประเมินความเสี่ยงด้วยคะแนน RULA และจัดสรรภาระงานภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลาและความปลอดภัย กำหนดท่าทางและน้ำหนักตามมาตรฐาน [24] พร้อมแบ่งช่วงการยกเพื่อติดตามเวลาและประเมินความเสี่ยงอย่างละเอียด โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การทดลองนี้ดำเนินการกับผู้ทดลองจำนวน 10 คน ซึ่งคัดเลือกอาสาสมัครแบบสุ่ม โดยกลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้ทดลองแต่ละคนได้รับมอบหมายให้ทำการยกวัตถุที่มีน้ำหนัก 10 กิโลกรัม เพื่อแทนภาระงานยกในระดับมาตรฐานการยกที่พบได้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป โดยสถานียานยกถูกออกแบบให้อยู่ในห้องปฏิบัติการ ให้เกิดความปลอดภัยตามหลักเกณฑ์ด้านการยศาสตร์ [24] และมีการกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของการปฏิบัติงานจากท่ายืนยกอย่างชัดเจน อีกทั้งขนาดของวัตถุถูกควบคุมให้คงที่

ตลอดการทดลอง เพื่อให้ไม่ส่งผลต่อท่าทางการยกและผลการประเมิน RULA โดยแต่ละคนทำการยกทั้งหมด 3 รอบต่อคน โดยในการเคลื่อนไหวแต่ละรอบถูกแบ่งออกเป็นสี่ช่วงหลัก ช่วงแรกเป็นช่วงเตรียมตัว ผู้ทดลองยืนในตำแหน่งที่กำหนดเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการยกวัตถุ ช่วงต่อมาคือช่วงเริ่มยกจากพื้นถึงเข่า ผู้ทดลองย่อตัวลงโดยให้เข่าและหลังอยู่ในแนวตรงเพื่อยกวัตถุจากพื้นขึ้นไปถึงระดับเข่า หลังจากนั้นเป็นช่วงยกจากเข่าสูงขึ้นไปจนถึงระดับเอว ส่วนช่วงสุดท้ายคือการยกวัตถุจากระดับเอวไปยังจุดวางสุดท้าย พร้อมเก็บข้อมูลการเคลื่อนไหวและเวลา แล้วนำไปพิจารณาความเสี่ยง

ทางการยศาสตร์ด้วยคะแนน RULA เพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์หาการจัดสรรภาระงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีขั้นตอนในการยก แสดงดังรูปที่ 3

การยกเป็นแบบ full load ผู้ปฏิบัติงานทำทั้งหมด 3 รอบต่อคน โดยเก็บข้อมูลวิดีโอทุกครั้ง หลังเสร็จสิ้นงานวิจัยคัดเลือกเฟรมภาพสำคัญ 3 เฟรมต่อรอบ ได้แก่ ช่วงเริ่มยก ขณะยก และวางวัตถุ เพื่อนำมาวิเคราะห์ท่าทาง เวลาในการยก และประเมิน RULA ช่วยให้วิเคราะห์ภาระทางร่างกายและเปรียบเทียบท่าทางระหว่างรอบและผู้ปฏิบัติงานได้อย่างแม่นยำ โดยจะทำการคัดเลือกเฟรมภาพดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ขั้นตอนการยกงานเข้าซ้อนแบบ full load (ก) ยืนในจุดเริ่มท่าทางปฏิบัติงานยก (ข) ย่อเข่าลงหลังตรงเริ่มยกที่ระดับพื้นถึงระดับเข่า (ค) การยกจากระดับเข่าถึงระดับเอว และ (ง) การยกจากระดับเอวไปยังจุดวางสุดท้าย



รูปที่ 4 การคัดเลือกเฟรมภาพสำหรับการวิเคราะห์ผล (ก) ท่าทางขณะยกที่ระดับเข่า (ข) ท่าทางการยกที่ระดับเอว และ (ค) ท่าทางการยกขณะเสร็จสิ้น

2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บข้อมูลดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมสภาพแวดล้อมให้คงที่ โดยผู้ทดลองทำการยกวัตถุตามลำดับที่กำหนด และมีการบันทึกวิดีโอเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เวลาและท่าทางการปฏิบัติงาน ภายหลังการทดลอง จะดำเนินการวิเคราะห์วิดีโอโดยระบุจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแต่ละรอบการยก พร้อมบันทึกเวลาที่ใช้ในแต่ละรอบเป็นวินาที สำหรับการประเมินคะแนน RULA และจะพิจารณาท่าทางการทำงานจากวิดีโอและประเมินมุมของอวัยวะส่วนต่าง ๆ โดยอ้างอิงช่วงมุมตามเกณฑ์ที่กำหนดในแบบประเมิน RULA [16] จากนั้นจึงคำนวณคะแนนความเสี่ยงของแต่ละรอบด้วยวิธีการคำนวณมือ และหาค่าเฉลี่ยเวลา และคะแนน RULA ต่อรอบการยกของผู้ทดลองแต่ละคน เพื่อนำไปใช้เป็นพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง MILP

2.4 การกำหนดพารามิเตอร์ทางคณิตศาสตร์

กำหนดเวลารวมของผู้ทดลองแต่ละคนจากผลรวมของเวลาที่ใช้ในแต่ละช่วง และคำนวณภาระงานสะสมต่อรอบการยก แสดงสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$T_s = T_{s,1} + T_{s,2} + \dots + T_{s,i} \quad (4)$$

$$\rho_s = \frac{R_{s,1} \cdot T_{s,1} + R_{s,2} \cdot T_{s,2} + \dots + R_{s,i} \cdot T_{s,i}}{T_s} \quad (5)$$

โดยที่

ρ_s = ภาระงานเฉลี่ยต่อรอบของผู้ทดลอง

T_s = เวลารวมต่อรอบของผู้ทดลอง (วินาที)

$T_{s,i}$ = เวลาที่ใช้แต่ละช่วงการยกของผู้ทดลอง (วินาที)

R_s = คะแนน RULA รวมต่อรอบของผู้ทดลองลำดับ s

$R_{s,i}$ = คะแนน RULA ของผู้ทดลองลำดับที่ s ใน

ท่าทางที่ i

s = ลำดับผู้ทดลอง

i = ลำดับท่าทางของผู้ทดลอง

2.5 การประมาณภาระงาน

การทดลองมีจำนวนรอบจำกัด จึงประมาณสถานการณ์ทำงานต่อเนื่อง 10, 20 และ 30 นาที โดยไม่มีการหยุดพัก และใช้เวลารวมต่อรอบคำนวณจำนวนรอบสูงสุดของผู้ทดลองในแต่ละช่วง เพื่อวิเคราะห์การจัดสรรภาระงานตามสมการที่ 6

$$L_s = \left\lceil \frac{D}{T_s} \right\rceil, D = 600, 1200, 1800 \quad (6)$$

โดยที่

L_s = จำนวนการประมาณรอบที่ได้ในแต่ละช่วงเวลา

D = เวลารวมของช่วงทดลองเป็นวินาที คือ 600

วินาทีสำหรับ 10 นาที, 1200 วินาทีสำหรับ 20 นาที

และ 1800 วินาทีสำหรับ 30 นาที

T_s = เวลารวมต่อรอบของผู้ทดลอง (วินาที)

2.6 การสร้างแบบจำลอง Mixed-Integer Linear Programming (MILP)

ในการสร้างตัวแปรตัดสินใจในแบบจำลอง MILP ใช้วิธีแมนตรง เช่น Branch-and-Bound หรือฮิวริสติก แต่การศึกษานี้ใช้ตัวแก้ MILP มาตรฐาน โดยกำหนดตัวแปรแทนจำนวนครั้งการยกใน 10, 20 และ 30 นาที และกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดภาระงานทางการยศาสตร์รวมของกลุ่มผู้ปฏิบัติงาน ดังสมการที่ 7

และมีข้อจำกัดของแบบจำลอง MILP ที่ประกอบไปด้วย ข้อจำกัดเวลา ดังสมการที่ 8-11 โดยสมการที่ 8 ใช้สำหรับช่วงเวลายก 10 นาที, สมการที่ 9 ใช้สำหรับช่วงเวลายก 20 นาที และ สมการที่ 10 ใช้สำหรับช่วงเวลายก 30 นาที

$$\text{Minimize } Z = \sum_{s=1}^{10} \rho_s \cdot L_s \quad (7)$$

$$T_s \cdot L_s \leq 600, \forall s \text{ (10 min)} \quad (8)$$

$$T_s \cdot L_s \leq 1200, \forall s \text{ (20 min)} \quad (9)$$

$$T_s \cdot L_s \leq 1800, \forall s \text{ (30 min)} \quad (10)$$

$$1 \leq L_s \leq L_s \text{ max}, \forall s \quad (11)$$

โดยที่

Minimize Z = ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$\sum_{s=1}^{10} \rho_s \cdot L_s = \text{ผลรวมเชิงเส้น (Linear Sum)}$$

ρ_s = ภาระงานเฉลี่ยต่อรอบของผู้ทดลอง

L_s = จำนวนการประมานครอบที่ได้ในแต่ละช่วงเวลา

$\forall s$ = ทุกสถานีงานต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขที่กำหนด

$L_s \text{ max}$ = จำนวนรอบการยกสูงสุด (Maximum number of lifting cycles)

L_s^* = จำนวนรอบการยกที่เหมาะสมที่สุด (Optimal number of lifting cycles)

Z_{opt} = ค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Optimal objective function value)

อีกทั้งยังกำหนด $L_s \geq 1$ เพื่อให้ผู้เข้าร่วมทุกคนมีภาระงานอย่างน้อย 1 รอบ นอกจากนี้ ได้พิจารณา 3 กรณีศึกษา ได้แก่ การลดภาระงานสะสมรวม (A) การกระจายภาระงานอย่างเป็นธรรม (B) และการกระจายภาระงานให้ใกล้เคียงกัน (C)

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ทำโดยกำหนดพารามิเตอร์ T_s , ρ_s สร้างตัวแปร L_s และคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์พร้อมข้อจำกัด การใช้ deterministic allocation ให้รอบการยกที่เหมาะสม L_s^* และค่า Z_{opt} ข้อมูล Manual RULA ถูกตรวจสอบข้อมูล Manual RULA เพื่อลดความคลาดเคลื่อน พร้อมวิเคราะห์ความไวของรอบการยกต่อ L_s^* และค่า Z_{opt} เพื่อประเมินความเสถียรของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลทดลองจริง

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การศึกษานี้ใช้ MILP ร่วมกับ deterministic allocation เพื่อกำหนดจำนวนรอบการยกที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดเวลาและการยศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลจากผู้เข้าร่วม 10 คน ผลแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของผู้ทดลอง

ผู้ทดลอง	T_s (วินาที/รอบ)	ρ_s
คนที่ 1	7.00	3.48
คนที่ 2	7.67	3.97
คนที่ 3	8.33	3.53
คนที่ 4	8.00	3.76
คนที่ 5	7.67	3.54
คนที่ 6	7.67	4.09
คนที่ 7	7.33	4.27
คนที่ 8	6.67	3.35
คนที่ 9	6.67	3.63
คนที่ 10	5.67	3.72

หลังจากได้ค่า T_s และ ρ_s ของผู้เข้าร่วมทั้งหมดแล้ว จึงคำนวณจำนวนรอบสูงสุดในแต่ละช่วงเวลาเพื่อจำกัดตัวแปร L_s ตามข้อจำกัดด้านเวลาแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จำนวนรอบสูงสุดที่ทำได้ของผู้ทดลอง

ผู้ทดลอง	10 นาที	20 นาที	30 นาที
คนที่ 1	85	171	257
คนที่ 2	78	156	234
คนที่ 3	72	144	216
คนที่ 4	75	150	225
คนที่ 5	78	156	234
คนที่ 6	78	156	234
คนที่ 7	81	162	245
คนที่ 8	90	180	270
คนที่ 9	90	180	270
คนที่ 10	105	210	317

จากตารางพบว่าจำนวนรอบสูงสุดเพิ่มขึ้นตามเวลา ผู้ที่มีค่า T_s ต่ำสามารถทำรอบได้มากกว่าผู้ที่มี T_s สูง การกระจายตัวสะท้อนความแตกต่างทางสมรรถนะ ทำให้ MILP จัดสรรภาระงานได้เหมาะสมและเป็นธรรม ต่อมาคำนวณด้วย deterministic

allocation ใน 3 กรณี ได้แก่ A ลดความเสี่ยงรวมสูงสุด , B กระจายงานแบบ Fairness ใกล้เคียงไม่เกิน L_s max, และ C กระจายเท่ากันตามค่าต่ำสุด ผลการคำนวณแบบจำลอง MILP ด้วยวิธี Deterministic allocation ทั้ง 3 กรณีแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงผลการจัดสรรภาระงานภายใต้ 3 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณี A (การลดภาระงานสะสมรวม) กรณี B (การจัดสรรภาระงานอย่างเป็นธรรม) และกรณี C (การจัดสรรภาระงานให้ใกล้เคียงกันระหว่างผู้ปฏิบัติงาน)

ผู้ทดลอง คนที่	ρ_s	ที่ 10 นาที (600 วินาที)			ที่ 20 นาที (1200 วินาที)			ที่ 30 นาที (1800 วินาที)		
		$L_s^*(A)$	$L_s^*(B)$	$L_s^*(C)$	$L_s^*(A)$	$L_s^*(B)$	$L_s^*(C)$	$L_s^*(A)$	$L_s^*(B)$	$L_s^*(C)$
คนที่ 1	3.48	1	83	72	1	166	144	1	250	216
คนที่ 2	3.97	1	78	72	1	156	144	1	234	216
คนที่ 3	3.53	1	72	72	1	144	144	1	216	216
คนที่ 4	3.76	1	75	72	1	150	144	1	225	216
คนที่ 5	3.54	1	78	72	1	156	144	1	234	216
คนที่ 6	4.09	1	78	72	1	156	144	1	234	216
คนที่ 7	4.27	1	81	72	1	162	144	1	245	216
คนที่ 8	3.35	90	83	72	180	166	144	270	250	216
คนที่ 9	3.63	1	83	72	1	166	144	1	250	216
คนที่ 10	3.72	1	83	72	1	166	144	1	250	216
$\Sigma \rho L$ (Zopt)		335.49	2963.77	2688.48	636.99	5927.54	5376.96	938.49	8914.03	8065.44

จากตารางที่ 4 การคำนวณแบบจำลอง MILP ด้วยวิธี Deterministic Allocation พบว่า กรณี A ลดความเสี่ยงรวมต่ำสุดแต่ไม่ยุติธรรม, กรณี B กระจายภาระอย่างยุติธรรมแต่ภาระรวมสูงขึ้น และกรณี C กระจายเท่ากันทุกคน มีความสมดุลและนำไปใช้ได้จริง

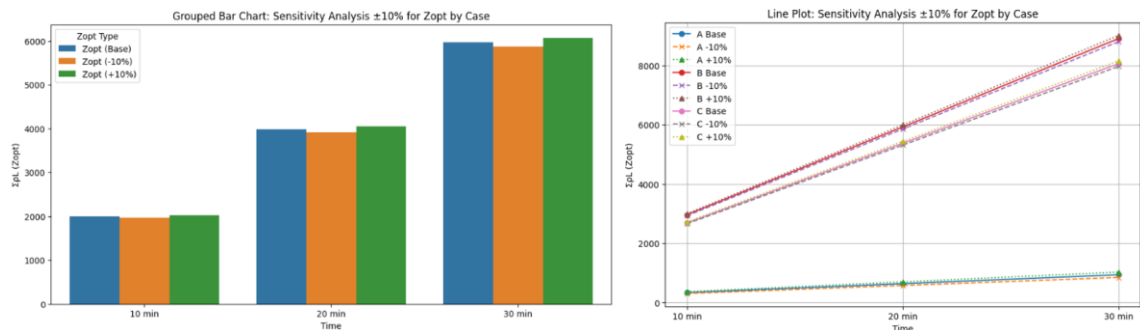
โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จำนวนรอบและค่าความเสี่ยงรวมเพิ่มตามลำดับ และเพื่อทดสอบความเสถียรของแบบจำลองต่อความคลาดเคลื่อน การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ถูกดำเนินการโดยปรับค่ารอบการยก $\pm 10\%$ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางสรุปการวิเคราะห์ความไวของโมเดล MILP (Sensitivity analysis $\pm 10\%$)

กรณี	ที่ 10 นาที			ที่ 20 นาที			ที่ 30 นาที		
	Zopt -10%	Zopt เดิม	Zopt +10%	Zopt -10%	Zopt เดิม	Zopt +10%	Zopt -10%	Zopt เดิม	Zopt +10%
A	305.34	335.49	365.64	576.69	636.99	697.29	848.04	938.49	1028.94
B	2929.18	2963.77	2998.36	5858.37	5927.54	5996.71	8809.42	8914.03	9018.65
C	2657.74	2688.48	2719.22	5315.47	5376.96	5438.45	7973.21	8065.44	8157.67

ผลการวิเคราะห์ความไวแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในช่วง $\pm 10\%$ ส่งผลให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันแต่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของผลการจัดสรรภาระงาน สะท้อนให้เห็นถึงความคงทนของแบบจำลองต่อความไม่แน่นอนของข้อมูลนำเข้า ในมุมมองของการวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพ ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถตีความได้ว่าแบบจำลองมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ในระดับต่ำภายใต้ช่วง

ที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ช่วงความคงตัวของสัมประสิทธิ์ (Objective Coefficient Range) การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ในข้อจำกัด (RHS Sensitivity) และค่า Shadow Price สำหรับข้อจำกัดต่าง ๆ ยังเป็นประเด็นที่สามารถศึกษาต่อยอดได้ในอนาคต โดยเฉพาะเมื่อใช้ตัวแก้ปัญหาที่รองรับการวิเคราะห์หลังการหาคำตอบ (Post-optimal Analysis) ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ความไวของโมเดล MILP สำหรับ Zopt ทุกกรณี

4. สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลอง MILP ภายใต้แนวคิด Deterministic Allocation เพื่อจัดสรรภาระงานยกให้เหมาะสมกับสภาพการทำงานจริง จากการทดลองกับผู้เข้าร่วม 10 คน พบว่าเวลารวมรอบ 7.17 วินาที และคะแนน RULA อยู่ระดับปานกลาง ข้อมูลนี้ใช้คำนวณการจัดสรรงานในสามกรณี: ลดภาระรวมสูงสุด (A), จัดสรรยุติธรรม (B) และกระจายภาระเท่ากัน (C) การศึกษาแสดงให้เห็นว่า MILP จัดสรรงานได้เป็นระบบ โดยกรณี A ลดภาระรวมสูงสุดแต่ไม่สมดุล กรณี C กระจายงานเท่า ๆ กันบริหารง่าย ส่วนกรณี B สมดุลทั้งประสิทธิภาพและความยุติธรรม ลดความเสี่ยงความล่าช้าและเพิ่มความพึงพอใจของผู้ปฏิบัติงาน แบบจำลองมีความเสถียรสูงจาก Sensitivity Analysis $\pm 10\%$ หากต้องการลดค่าภาระรวมทางการยศาสตร์ให้ต่ำที่สุดควรเลือกใช้กรณี A รองลงมาคือกรณี C และกรณี B ($A > C > B$)

> B) แต่หากต้องการให้การจัดสรรภาระงานเป็นไปอย่างเหมาะสมและยุติธรรมที่สุด ควรเลือกใช้กรณี B รองลงมาคือกรณี C และกรณี A ($B > C > A$) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในประเทศไทย มีการประเมินความเสี่ยงทางร่างกายของคนงานอุตสาหกรรมรีดขึ้นรูปพลาสติกหลักโดยใช้ RULA และ REBA และพบว่าหลายตำแหน่งงานอยู่ในระดับเสี่ยงที่ควรได้รับการปรับปรุงทันที [25] อีกทั้งยังมีการปรับปรุงวิธีการทำงานในขั้นตอนการกรอด้ายโดยใช้แบบประเมิน RULA เพื่อออกแบบเครื่องกรอด้ายแบบมอเตอร์ ผลลัพธ์หลังปรับแล้วคะแนน RULA ลดลงจนอยู่ในระดับที่ “ยอมรับได้” [26] การศึกษาในครั้งนี้จึงเติมเต็มช่องว่างและเป็นแนวทางด้านการจัดสรรงานเชิงตัวเลข (allocation) แทนการประเมินหรือปรับท่าทางเพียงอย่างเดียวในงานด้านการยศาสตร์ไทย

อีกทั้งงานวิจัยในต่างประเทศชาติ มีการเสนอโมเดล scheduling แบบหลายวัตถุประสงค์ (multi

objective) โดยรวมภาระทางยศาสตร์ (ergonomic risk) เข้ากับการจัดตารางบุคลากร [27] เกิดความสอดคล้องกับแนวคิดที่พัฒนาขึ้น การรวมปัจจัย ergonomics ในการกำหนดตารางงานช่วยลดความเสี่ยงของโรคกล้ามเนื้อโครงร่างในขณะที่รักษาประสิทธิภาพการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [27]

ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กรณี A มีแนวโน้มเกิดการกระจุกตัวของภาระงาน ขณะที่กรณี B และ C ช่วยให้การกระจายภาระงานมีความสมดุลมากขึ้น หากต้องประยุกต์ใช้จริง อาจพิจารณาเพิ่มข้อจำกัดด้านความสมดุลของภาระงาน เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการทำงานมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นงานที่ได้ศึกษาและพัฒนาขึ้นในครั้งนี้สามารถเสนอแนวทางปฏิบัติ ในการจัดสรรงานยกแบบซ้ำ โดยไม่เพียงแต่ประเมินความเสี่ยงแต่ยังคำนึงถึงความเที่ยงธรรมและประสิทธิภาพการยก ซึ่งเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยไทยที่มุ่งการประเมินเพียงอย่างเดียว และสอดคล้องกับแนวโน้มสากลในการรวมปัจจัยทางกายศาสตร์กับแผนการดำเนินงานผ่านโมเดลคณิตศาสตร์

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. C. H. Chan, G. B. Ross, A. L. Clouthier, S. L. Fischer, and R. B. Graham, "The role of machine learning in the primary prevention of work-related musculoskeletal disorders: A scoping review," *Applied Ergonomics*, vol. 98, 2022.
- [2] K. Wachirasiri and S. Taptagaporn, "Work Improvement to Reduce Fatigue and Postural Risk: A Case Study of Workers in a Joint Assembly Process," *Thai Journal of Ergonomics*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [3] K. Sahunlu and P. Sakunkoo, "Ergonomic Risk Assessment by RULA in Drinking Water Plants Staffs in Chalomephakiat District, Buriram Province," *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, vol. 20, no. 3, pp. 137–144, 2020.
- [4] N. Laowanich, P. Meepradit, and T. Yingratanasuk, "Applying Participatory Ergonomics to Improve Working Condition for Reducing Shoulder Risk among Supporting Personnel in a Hospital, Chonburi Province," *Journal of Safety and Health*, vol. 15, no. 2, 2022.
- [5] N. Singchai, "The effectiveness of ergonomic workstation improvements on stone setters in one jewelry manufacture," M.S. thesis, Dept. Public Health, Thammasat Univ., Pathum Thani, Thailand, 2022.
- [6] R. Zaman, A. Arefeen, J. Quarnstrom, S. Barman, J. Yang, and Y. Xiang, "Optimization-based biomechanical lifting models for manual material handling: A comprehensive review," *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part H Journal of Engineering in Medicine*, vol. 236, no. 9, pp. 1273–1287, 2022.
- [7] T. Prunet, N. Absi, V. Borodin, and D. Cattaruzza "Optimization of human-aware logistics and manufacturing systems: A survey on Human-Aware Models," *Euro Journal on Transportation and Logistics*, vol. 13, 2024.

- [8] C. Gregg, V. V. Visconti, M. Albanese, B. Gasperini, A. C. C. Prezioso, B. Persechino, S. Iavicoli, E. Gasbarra, R. Iundusi, and U. Tarantino, "Work-Related Musculoskeletal Disorders: A systematic review," *Journal of Clinical Medicine*, vol. 13, no. 13, 2024.
- [9] A. Vuttikun, C. Chanprasit, and T. Kaewthummanukul, "Ergonomic Factors and Musculoskeletal Disorders Among Bamboo Handicraft Workers," *Nursing Journal CMU*, vol. 47, no. 2, pp. 37–49, 2020.
- [10] F. Liu, Y. Duan, Z. Wang, R. Ling, Q. Xu, J. Sun, Y. Liu, Y. Yang, G. Li, H. Zhang, D. Li, R. Wang, J. Liu, X. Geng, W. Xiong, Z. Li, N. Jia, and C. Wu, "Mixed adverse ergonomic factors exposure in relation to work-related musculoskeletal disorders: A multicenter cross-sectional study of Chinese medical personnel," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025.
- [11] National Institute for Occupational Safety and Health, "Revised NIOSH lifting equation," [Online]. <https://www.cdc.gov/niosh/ergonomics/about/RNLE.html> [Accessed: Mar. 1, 2024].
- [12] N. Yodyingnakchaiyakron, "Prevalence and Work-Related Musculoskeletal Discomfort Related Factors Among Thai Gas Employees in Samut Sakhon Province," *EAU Heritage Journal Science and Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 213–225, 2020.
- [13] L. McAtamney and E. N. Corlett, "RULA: a survey method for the investigation of work related upper limb disorders," *Applied Ergonomics*, vol. 24, no. 2, pp. 91–99, 1993.
- [14] S. Kulwong, "Occupational Back Pain: NIOSH Assessment Tool for Prevention," *The Public Health Journal of Burapha University*, vol. 3, no. 2, pp. 32–45, 2008.
- [15] T. R. Waters, V. Putz-Anderson, and A. Garg, *Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation*. Cincinnati, OH, USA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 94-110, 1994, rev. Sep. 2021, doi: 10.26616/NIOSH PUB94110 revised 092021.
- [16] EST Thailand, "Rapid Upper Body Assessment (RULA) [Assessment of Sitting Posture at Work]," [Online]. Available: <https://sites.google.com/est.or.th/est/home> [Accessed: Sep. 5, 2025].
- [17] A. K. Saha, M. A. Jahin, M. Rafiquzzaman, and M. F. Mridha, "Ergonomic design of computer laboratory furniture: Mismatch analysis utilizing anthropometric data of university students," *Heliyon*, vol. 10, no. 14, 2024.
- [18] H. V. Mahmoodian, H. Charkhgard, and Y. Zhang, "Multi-objective optimization based algorithms for solving mixed integer linear minimum multiplicative programming problems," *Computers & Operations Research*, vol. 128, 2021.

- [19] A. Jaber, R. Younes, P. Lafon, and J. Khoder, "A review on multi-objective mixed-integer non-linear optimization programming methods," *Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 1961–1979, 2024.
- [20] I. Pappas, S. Avraamidou, J. Katz, B. Burnak, B. Beykal, M. Türkay, and E. N. Pistikopoulos, "Multiobjective Optimization of Mixed-Integer Linear Programming Problems: A Multiparametric Optimization Approach," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 23, no. 60, 2021.
- [21] M. Rinaldi, M. Fera, E. Bottani, and E. H. Grosse, "Workforce scheduling incorporating worker skills and ergonomic constraints," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 168, 2022.
- [22] R. A. Pozo and J. B. Valhondo, "Impact of limiting the ergonomic risk on the economic and productive efficiency of an assembly line," *International Journal of Production Research*, vol. 62, no. 1–2, pp. 122–140, 2023.
- [23] S. J. Wurzelbacher, M. P. Lampl, S. J. Bertke, and C. Y. Tseng, "The effectiveness of ergonomic interventions in material handling operations," *Applied Ergonomics*, vol. 87, 2020.
- [24] Thailand Institute of Occupational Safety and Health (Public Organization), Ergonomics Standard on Manual Materials Handling (SHS 302:2018), [Online]. Available: <https://www.tosh.or.th/>. [Accessed: Sep. 5, 2025].
- [25] S. Huaychan and S. Chaiklieng, "Ergonomic Risk Assessment of Work-Related Musculoskeletal Disorders among Employees in the Steel Roll Roof Forming Industry, Thailand," *KKU Journal for Public Health Research*, vol. 12, no. 2, pp. 85–90, 2019.
- [26] S. Klomsae and R. Roonreangjai, "Ergonomics Assessment in Improving the Work for the Winding Process," *Journal of Technology and Innovation Uttaradit Rajabhat University*, vol. 2, no. 2, pp. 11–22, 2019.
- [27] E. H. Özder, "A Holistic Model for Ergonomic and Sustainable Personnel Scheduling in Urban Transportation," *Processes*, vol. 13, no. 3, 2025.