



การออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์ของแขนกลช่วยยก

อภิชาติ มณีงาม^{1*} กัลยา อุบลทิพย์¹ รติ มณีงาม² กัณฑ์ธร เก่งพล¹ ฐิติพงษ์ มาคุ้ม¹
ธิดาวลัยย์ อ่ำแจ่ม¹ รัชกรรินทร์ ไร่ไว¹ และ พงษ์ธร จังพานิช¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²ภาควิชามนุษยศาสตร์, คณะศิลปศาสตร์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: apichit.m@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 13 สิงหาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 15 ตุลาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 30 ตุลาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 15 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ: การแข่งขันทางธุรกิจในระดับโลกทำให้บริษัทกรณีศึกษาต้องมีการปรับปรุงแขนกลช่วยยกที่มีให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นและมีต้นทุนน้อยลงเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทั้งในประเทศและต่างประเทศผู้เขียนได้ศึกษาปัญหาการออกแบบแขนกลช่วยยกที่รับภาระโหลดเท่ากับ 75 กิโลกรัม โดยที่มีตุ้มน้ำหนัก 15 กิโลกรัมติดตั้งไว้ที่ด้านหลังเพื่อถ่วงดุลน้ำหนัก โดยที่ผู้ออกแบบสามารถปรับขนาดของแต่ละชิ้นส่วนโดยที่ต้องรักษารูปร่างโดยรวมเดิมของแขนกลช่วยยกไว้ และ บริษัทกรณีศึกษาเป็นผู้กำหนดปัจจัยและระดับการปรับปรุงขนาดที่เป็นไปได้เพื่อให้บริษัทกรณีศึกษาสามารถเลือกซื้อหรือผลิตชิ้นส่วนนั้นในประเทศไทยได้ง่าย ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์สำหรับแขนกลช่วยยกโดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ร่วมกับการออกแบบทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) และการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อลดต้นทุนการผลิตรวมให้น้อยที่สุดและมีค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) มากที่สุด ผลการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถลดต้นทุนการผลิตลดลงจากเดิม 34,117.64 บาท เหลือ 25,698.40 บาท และมีค่าความปลอดภัยเพิ่มขึ้นจาก 3.00 เป็น 9.13 เมื่อเทียบกับแขนกลช่วยยกแบบเดิม

คำสำคัญ: การออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์; แขนกลช่วยยก; การออกแบบการทดลอง



Bi-objective Design Optimization of a Manipulator Arm

Apichit Maneengam^{1*}, Kanlaya Ubontip¹, Rati Maneengam², Kantorn Kengpol¹,
Thitipong Markum¹, Thidawan Amjang¹, Ruksarin Warawai¹ and Pongtorn Jungpanich¹

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

² Department of Humanities, Faculty of Applied Arts, King Mongkut's University of Technology
North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: apichit.m@cit.kmutnb.ac.th

Received: 13 August 2021; Revised 15 October January 2021; Accepted: 30 October 2021

Online Published: 15 December 2021

Abstract: Global business competition forces case study companies to improve their manipulator arms by providing better quality and lower costs to increase their domestic and international competitiveness. The authors investigated a manipulator arm design case study problem for loading 75 kilograms, with 15 kilograms mounted on the back as a counterbalance. The designer can adjust the size of each part while maintaining the original overall shape of the manipulator arm. The case study company determines the factors and the possible level of improvements in size, allowing it to either purchase or manufacture the part in Thailand. This paper proposes a bi-objective design optimization method for a manipulator arm by applying the finite element method with a full factorial design of experiment and optimization to minimize the total production cost and maximize safety factors. Results showed that the proposed method can reduce the total production cost from THB 34,117.64 to THB 25,698.40, while the factor of safety value increases from 3.08 to 9.13, compared to the traditional mechanical arm design.

Keywords: Bi-objective design optimization; Manipulator Arm; Design of experiments



1. บทนำ

แขนกลช่วยยก (Manipulator Arm) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับช่วยยกชิ้นงานที่มีน้ำหนักมากตั้งแต่ 5-150 กิโลกรัม อุปกรณ์นี้ทำให้ชิ้นงานอยู่ในสภาพไร้น้ำหนัก พนักงานไม่ต้องออกแรงยกชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยให้ลดอาการเมื่อยล้าจากการยกของหนักและลดอุบัติเหตุในระหว่างการทำงาน แขนกลช่วยยกที่ขายในท้องตลาดทำงานด้วยระบบลม นอกจากนี้สามารถหมุนได้ 360 องศา ครอบคลุมรัศมีกว้าง 2.50 เมตร มีระบบเบรกเพื่อล็อกแขนให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการและล็อกการเคลื่อนตัวของหัวจับ ด้วยเหตุนี้ทำให้แขนกลช่วยยกถูกใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ในประเทศไทยมีบริษัทที่ผลิตและจำหน่ายแขนกลช่วยยกหลายราย ซึ่งแต่ละรายมีการออกแบบแขนกลช่วยยกที่แตกต่างกันเล็กน้อย ในปัจจุบันนี้มีการแข่งขันทางธุรกิจอย่างมากในธุรกิจนี้ โรงงานที่งานวิจัยนี้ได้ใช้เป็นกรณีศึกษาจำเป็นต้องออกแบบแขนกลช่วยยกใหม่ให้มีต้นทุนที่ถูกลงและมีค่าความปลอดภัยที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน



รูปที่ 1 แขนกลช่วยยกของกรณีศึกษา [1]

หลายปีมานี้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับแขนกลช่วยยกหลายบทความโดยเริ่มจาก Mahalingam and Sharan [2] ได้วิเคราะห์ความสมดุลคงที่ของแขนกลของหุ่นยนต์ โดยกล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของการใช้มวลหรือสปริงสำหรับการทรงตัว และผลกระทบต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ ต่อมา Newman and Hogan [3] ได้นำเสนออัลกอริทึมที่สำหรับการแก้ปัญหาการควบคุมเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแขนกล Coello *et. al.* [4] ได้นำเสนอวิธีการแบบไฮบริดเพื่อปรับสมดุลถ่วงน้ำหนักของแขนหุ่นยนต์ โดยใช้การผสมผสานของอัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) กับวิธีน้อยที่สุด-มากที่สุด แบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ชุดพาเรโตโซลูชันของปัญหาดังกล่าว Baradat *et. al.* [5] ได้เสนอแนวทางใหม่ในการแก้ไขปัญหาการลดแรงบิดของแขนกลช่วยยกแบบขนาน Nikoobin and Moradi [6] ได้เสนอวิธีการสร้างสมดุลของแขนกลช่วยยกใหม่สำหรับหุ่นยนต์แขนกลแบบห่วงโซ่เปิด (Open-chain Robot Manipulators) บนพื้นฐานของการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดแบบรูปเปิด Xu *et. al.* [7] ได้นำเสนอวิธีการวางแผนแบบซิงกูลาริตีฟรี ทราเจคทอรี (Singularity-free Trajectory Planning Method) เพื่อให้แขนกลมีความสมดุลและรักษาตำแหน่งศูนย์กลางเรขาคณิตของฐานให้คงที่ Wang and Kong [8] ได้นำเสนอวิธีการหาค่าตอบที่ดีที่สุดใหม่สำหรับการออกแบบแขนกลแบบสถิตโดยใช้เครื่องมือเพิ่มประสิทธิภาพของ MATLAB เพื่อกำหนดจุดยึดสปริงเพื่อปรับสมดุลแขนกลแบบสถิตที่ประกอบด้วยข้อต่อแบบหมุน (Revolute Joint) ในเร็ว ๆ นี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับแขนกลในมุมมองที่กว้างขวางมากขึ้นดังนี้ Ali *et. al.* [9] ได้นำเสนอแขนกล 2 รูปแบบเพื่อใช้ใน



การขนถ่ายวัสดุและช่วยในการสร้างสิ่งก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยจำลองผลและประยุกต์ใช้ทฤษฎีพื้นฐานของวิทยาการหุ่นยนต์ผ่านซอฟต์แวร์ Roboanalyzer และในปีเดียวกัน Xu et al. [10] นำเสนอแนวทางในการกำหนดท่าทางการจับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแขนกลแบบสองแขนที่ทำงานร่วมมือกันเพื่อคว่ำดาวเทียมที่อยู่ในอวกาศ เทคนิคของพวกเขาที่นำเสนอได้สร้างพื้นที่ทำงานร่วมกันระหว่างแขนกลทั้งสองข้างด้วยระบบห่วงโซ่ปิด (Closed Chain System) เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันเองของแขนกลทั้งสองข้าง

นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่มีจุดประสงค์การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกลที่ดีที่สุด โดยปรับปรุงขนาดเช่นเดียวกับแนวคิดของงานวิจัยนี้โดยมีรายละเอียดดังนี้ Cholaseuk [11] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยใช้แนวทางการออกแบบการทดลอง และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติสูงขึ้นและค่าโก่งตัวสูงสุด งานวิจัยของเขามีจุดประสงค์เพื่อให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของทาคุชิ (Taguchi's Signal-to-noise Ratio) มีค่าสูงที่สุด ความถี่ธรรมชาติสูงขึ้นและมีค่าโก่งตัวสูงสุดน้อยลงวิธีนี้ทำให้ได้ชุดข้อมูลที่มีขนาดเล็กและสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องกลได้อย่างหลากหลาย Cholaseuk [12] นำเสนอวิธีการเชิงตัวเลขสำหรับการออกแบบรูปร่างของชิ้นส่วนทางกลที่มีน้ำหนักต่ำสุดภายใต้ข้อจำกัดด้านความเค้น ต่อมา Manee-ngam et al. [13] ได้ออกแบบตะขอยกสำหรับรับภาระ 2 ตัน ให้มีความแข็งแรงมากที่สุด ต้นทุนต่ำที่สุด พวกเขาเขียนตัวแบบทางคณิตศาสตร์

และแก้ปัญหาด้วยวิธีออกแบบที่เหมาะสมที่สุดในโปรแกรม SolidWorks และล่าสุด Kot et al. [14] นำเสนอวิธีการใหม่ในการค้นหาความยาวและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของข้อต่อที่สำคัญสองชิ้นของแขนกล โดยที่ความยาวเป้าหมายสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดมวล และเลือกรูปร่างในรูปแบบของเส้นโค้งเบซีเยร์ (Bézier Curve) เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกับสิ่งกีดขวาง โดยใช้เทคนิควิเคราะห์การชนเชิงลึก (In-depth Collision Analysis) เพื่อหาค่าตอบเริ่มต้นและใช้วิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Algorithm) เพื่อปรับปรุงคำตอบในขั้นตอนสุดท้าย

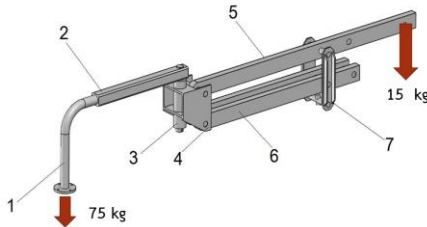
จากการทบทวนวรรณกรรมที่ศึกษาแขนกลและวิธีการออกแบบที่ดีที่สุดสำหรับชิ้นส่วนเครื่องกลพบว่าส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การออกแบบแขนกลให้สมดุลด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน และงานวิจัยน้อยมากที่ได้ประยุกต์ใช้วิธีที่ดีที่สุดแบบหลายจุดประสงค์เพื่อออกแบบแขนกลช่วยยกทำการปรับปรุงขนาดและเปลี่ยนรูปแบบหน้าตัดของชิ้นส่วนของแขนกลช่วยยกโดยพิจารณาความแข็งแรงและต้นทุนเลย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์ (Bi-objective Optimization Method) สำหรับแขนกลช่วยยกประเภทตั้งพื้นภาระโหลดสูงสุด 75 กิโลกรัม เพื่อให้แขนกลช่วยยกที่ออกแบบมีต้นทุนที่ต่ำที่สุด และมีค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) มากที่สุด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอกับแขนกลสมดุลน้ำหนักเดิม งานวิจัยนี้จะเปลี่ยนรูปแบบการออกแบบที่มีความเป็นไปได้ทั้งหมดตามที่โรงงานกรณีศึกษา กำหนดให้เท่านั้น



2. ลักษณะของปัญหา

ปัญหาการออกแบบแขนกลช่วยยกประเภทตั้งพื้น ที่รับภาระโหลดคือ 75 กิโลกรัม และมีตุ้มน้ำหนัก 15 กิโลกรัม ติดตั้งไว้ที่ด้านหลัง ปัญหานี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบแขนกลช่วยยกให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดและค่าความปลอดภัยมากที่สุด โดยมุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนรูปแบบหรือขนาดของส่วนประกอบแต่ละชิ้นของแขนกลช่วยยกจากแนวคิดการออกแบบที่เป็นไปได้ แขนกลช่วยยกประเภทตั้งพื้นที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้คือ รุ่นรหัสโมเดล BMS-75 ของ บริษัท ที.อาร์.โมเดิร์น อินดัสทรี จำกัด โดยที่บริษัทได้มีการยืนยันค่าความปลอดภัย (Factor of safety: FOS) มีค่าเท่ากับ 3.00 [15]



รูปที่ 2 ชิ้นส่วนที่พิจารณาของแขนกลช่วยยก

จากรูปที่ 2 แขนกลช่วยยกเดิมของกรณีศึกษาที่งานวิจัยนี้ได้พิจารณามีทั้งหมด 7 ชิ้น ซึ่งเป็นกลุ่มชิ้นส่วนที่บริษัทกรณีศึกษาผลิตเอง และสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ในขณะที่ส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ขาตั้ง เสารับน้ำหนัก และอื่นๆ งานวิจัยนี้จะใช้รูปแบบเดิมจึงไม่ได้พิจารณาส่วนประกอบเหล่านั้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดการจับยึดที่ตำแหน่งการเชื่อมต่อระหว่างส่วนประกอบที่จะออกแบบใหม่และส่วนประกอบที่ไม่ได้พิจารณาแทนเพื่อลดเวลาในการคำนวณและจะวิเคราะห์ความแข็งแรงเฉพาะสภาวะ

การรับน้ำหนักแบบคงที่เท่านั้น การปรับปรุงแขนกลช่วยยกนี้ต้องรักษารูปร่างโดยรวมของแขนกลช่วยยกเดิมไว้ ซึ่งจัดอยู่ในรูปแบบปัญหาการปรับมิติทั่วไปที่ดีที่สุด (Parametric Optimization) และ บริษัทกรณีศึกษาต้องสามารถเลือกซื้อหรือผลิตชิ้นส่วนนั้นในประเทศไทยได้ งานวิจัยนี้ต้องเลือกใช้เหล็กรูปพรรณเกรด SS400 เท่านั้น เนื่องจากหาซื้อง่ายในท้องตลาดและบริษัทกรณีใช้ในการผลิตแขนกลช่วยยกนี้อยู่แล้ว

3. วิธีที่นำเสนอ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการที่ดีที่สุดสำหรับออกแบบแขนกลช่วยยกสำหรับรับภาระโหลด 75 กิโลกรัม เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มค่าความปลอดภัย (Factor of safety: FOS) ให้มากขึ้น โดยวิธีการที่นำเสนอมีรายละเอียดต่อไปนี้

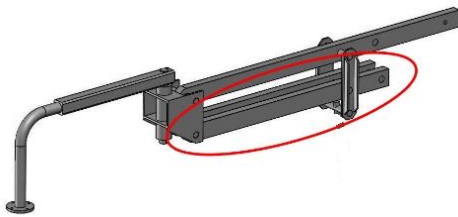
3.1 การกำหนดแนวทางการปรับปรุงแขนกลช่วยยก

งานวิจัยนี้วิศวกรของบริษัทกรณีศึกษาและผู้วิจัยร่วมกันเป็นผู้กำหนดแนวทางการปรับปรุงแขนกลช่วยยกที่สามารถแก้ไขได้เป็น 8 ปัจจัย (A-H) จากนั้นกำหนดขนาดของเหล็กและรูปแบบการออกแบบที่มีความเป็นไปได้ของแต่ละแนวทางการปรับปรุงให้เป็นระดับของแต่ละปัจจัย สำหรับแนวทางการออกแบบ (ปัจจัย) B D และ E เป็นการปรับเปลี่ยนขนาดหน้าตัดและความหนาชิ้นส่วนมาตรฐานซึ่งมีระดับที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ค่อนข้างมาก เช่น เหล็กแผ่นในท้องตลาดมีความหนาที่หลากหลายทำให้ยากที่จะนำมาพิจารณาทั้งหมด และ บริษัทกรณีศึกษาไม่สามารถตั้งเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมาตั้งแต่แรก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้วิศวกรของบริษัท



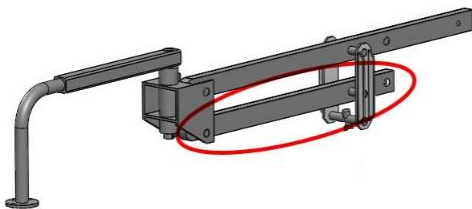
กรณีศึกษาคัดเลือกเฉพาะระดับของแต่ละปัจจัยที่มีความเป็นไปได้จากขนาดหน้าตัดของเหล็กรูปพรรณที่มีขายในท้องตลาด [16] มาใช้เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาสำหรับแต่ละปัจจัยดังกล่าวเพื่อลดขนาดปัญหาในการออกแบบให้น้อยลง ส่วนปัจจัยอื่นๆ วิศวกรของบริษัทกรณีศึกษาและผู้วิจัยร่วมกันเป็นผู้กำหนดระดับการปรับปรุงรูปแบบของชิ้นส่วนนั่นเอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ปัจจัย A คือ ปรับจำนวนชิ้นส่วนหมายเลข 6 มีทั้งหมด 2 ระดับ คือ ระดับที่ 1 ของปัจจัย A กำหนดจำนวนชิ้นส่วนหมายเลข 6 ให้มี 2 ท่อน ดังแสดงในรูปที่ 3



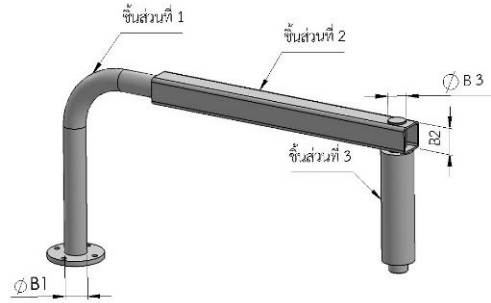
รูปที่ 3 ปัจจัย A ระดับที่ 1

ระดับที่ 2 ของปัจจัย A กำหนดจำนวนชิ้นส่วนหมายเลข 6 ให้มี 1 ท่อน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ปัจจัย A ระดับที่ 2

ปัจจัย B คือ ขนาดหน้าตัดของชิ้นงานที่ 1 ชิ้นงานที่ 2 และ ชิ้นงานที่ 3 โดยกำหนดขนาดของหน้าตัดชิ้นงานทั้งสามชิ้นดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ปัจจัย B

จากรูปที่ 5 งานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดขนาดที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ $\varnothing B1$ $B2$ $\varnothing B3$ เนื่องจากขนาดหน้าตัดทั้งสามเป็นตัวแปรไม่อิสระ ถ้าปรับขนาดตำแหน่งใดๆ จะทำให้ตำแหน่งอื่นๆ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ตารางที่ 1 ระดับขนาดหน้าตัดที่เปลี่ยนได้ของชิ้นส่วนทั้ง 3 ของปัจจัย B

ระดับ	ขนาดหน้าตัดที่เปลี่ยนได้ (มิลลิเมตร)		
	$\varnothing B1$ ($\varnothing \times t$)	$B2$ (ยาว \times สูง)	$\varnothing B3$ (\varnothing)
1	60.5, t=3.8	75 x 75	50
2	76.3, t=4	90 x 90	65
3	89.1, t=3.2	100 x 100	75
4	114.3, t=3.5	125 x 125	89

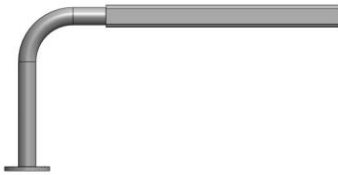
เมื่อ t คือ ความหนา และ \varnothing คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง



จากตารางที่ 1 งานวิจัยนี้ได้กำหนดระดับของปัจจัย B โดยอ้างอิงขนาดหน้าตัดของเหล็กรูปพรรณที่มีขายในท้องตลาด [16] และให้วิศวกรออกแบบของบริษัทกรณีศึกษาคัดเลือกเฉพาะระดับหน้าของเหล็กรูปพรรณที่เหมาะสมเพื่อให้ง่ายต่อการจัดซื้อและผลิต

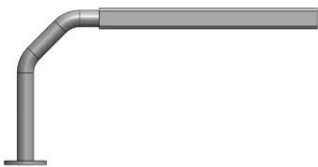
ปัจจัย C คือ แนวทางการปรับปรุงรูปแบบของชิ้นส่วนหมายเลข 1 งานวิจัยนี้ได้หารูปแบบการขึ้นรูปแบบสำหรับชิ้นส่วนหมายเลข 1 จากบริษัทที่ขายแขนกลช่วยยกในท้องตลาด ซึ่งได้รูปแบบของชิ้นส่วนหมายเลข 1 มาทั้งหมด 3 ระดับ มีดังต่อไปนี้

ระดับที่ 1 ของปัจจัย C โครงสร้างถูกตัดเป็นรูปตัวแอลทำมุม 90 องศา และมีรัศมีโค้งเท่ากับ 157.15 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ปัจจัย C ระดับที่ 1

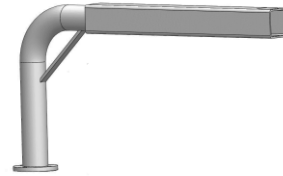
ระดับที่ 2 ของปัจจัย C ทำการตัดโครงสร้างสองจุด โดยมุมทั้งสองมีขนาด 135 องศา ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ปัจจัย C ระดับที่ 2

ระดับที่ 3 ของปัจจัย C มีโครงสร้างแบบเดียวกับระดับที่ 1 แต่ระดับที่ 3 นี้จะมีการเสริมเหล็กแผ่นหนา

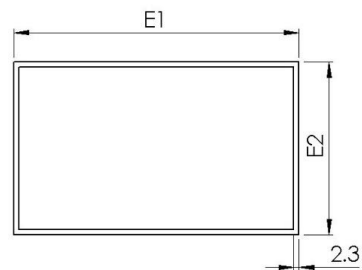
10 มิลลิเมตร ความยาว 262 มิลลิเมตร และมีความกว้าง 10 มิลลิเมตร เชื่อมติดที่มุมฉากของท่อที่เป็นชิ้นส่วนหมายเลข 1 ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ปัจจัย C ระดับที่ 3

ปัจจัย D คือ แนวทางการปรับปรุงความหนาเหล็กแผ่นของชุดประกอบเพลลา หรือความหนาชิ้นส่วนหมายเลข 4 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัย D ให้มี 2 ระดับ คือ ระดับที่ 1 ชิ้นส่วนหมายเลข 4 มีความหนา 12 มิลลิเมตร และระดับที่ 2 ชิ้นส่วนหมายเลข 4 มีความหนาเท่ากับ 4 มิลลิเมตร ซึ่งคัดมาจากความหนาของเหล็กรูปพรรณที่มีขายในท้องตลาด [16]

ปัจจัย E คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมของชิ้นส่วนหมายเลข 5 และ 6 โดยกำหนดขนาดที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้คือ E1 และ E2 ส่วนความหนาไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 พื้นที่หน้าตัดชิ้นส่วนหมายเลข 5 และ 6 และขนาดที่เปลี่ยนแปลงได้ของปัจจัย E

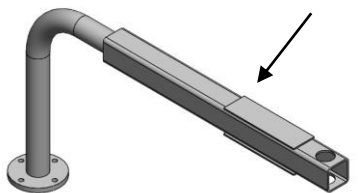


งานวิจัยนี้ได้คัดเลือกเฉพาะระดับที่มีความเป็นไปได้ของปัจจัย E มาทั้งหมด 3 ระดับ จากขนาดหน้าตัดของเหล็กรูปพรรณที่มีขายในท้องตลาด [16] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับของปัจจัย E (มิลลิเมตร)

ระดับของปัจจัย E	ความยาว E1	ความยาว E2
1	100	50
2	125	75
3	60	30

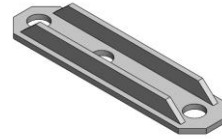
ปัจจัย F คือ การเสริมแผ่นเหล็กที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ที่ชิ้นส่วนหมายเลข 2 เพื่อให้ชิ้นส่วนหมายเลข 2 แข็งแรงขึ้น งานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัย F มา 2 ระดับ คือ ระดับที่ 1 ไม่มีการเสริมแผ่นเหล็กที่ชิ้นส่วนหมายเลข 2 และ ระดับที่ 2 มีการเสริมแผ่นเหล็กที่ชิ้นส่วนหมายเลข 2 ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ปัจจัย F ระดับที่ 2

ปัจจัย G คือ แนวทางเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วนหมายเลข 7 ซึ่งวิศวกรของบริษัทกรณีศึกษาได้กำหนดระดับของปัจจัย G 3 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 ของปัจจัย G คือใช้รูปแบบเดิมของชิ้นส่วนหมายเลข 7 ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ปัจจัย G ระดับที่ 1

ระดับที่ 2 ของปัจจัย G มีการตัดครีปที่ไม่จำเป็นของชิ้นงานหมายเลข 7 ออกไป ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ปัจจัย G ระดับที่ 2

ระดับที่ 3 ของปัจจัย G มีการตัดครีปที่ไม่จำเป็นของชิ้นงานหมายเลข 7 ออกไป และ ลดความกว้างของแผ่นเหล็กให้น้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ปัจจัย G ระดับที่ 3

ปัจจัย H คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาเหล็กแผ่นที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนหมายเลข 7 ซึ่งชิ้นส่วนนี้จะเหล็กแผ่นที่มีความหนาเท่ากันทั้งหมด ปัจจัย H มี 2 ระดับ คือ ระดับที่ 1 กำหนดความหนา 12 มิลลิเมตร และ ระดับที่ 2 กำหนดความหนา 4 มิลลิเมตร



3.2 การออกแบบการทดลอง

สร้างแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) โดยกำหนดปัจจัย A ถึง H และกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยตามหัวข้อ 3.1 โดยที่กำหนดไม่มีการทำการทดลองซ้ำ จากการสร้างแผนการทดลองนี้จะได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 1,728 ครั้ง

3.3 การหาหน้าหนักและค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยก

งานวิจัยนี้ทำการสร้างโมเดลสามมิติในโปรแกรม SolidWorks ด้วยขนาดจริงตามแผนการทดลองในหัวข้อ 3.2 เพื่อหาหน้าหนักของแต่ละชิ้นส่วนสำหรับนำไปใช้คำนวณต้นทุนของวัสดุ และ ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อหาค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) สำหรับแขนกลช่วยยกแบบต่าง ๆ การกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแขนกลช่วยยกมีรายละเอียดดังนี้ (1) ปัญหานี้เป็นการวิเคราะห์แบบสถิต (Static Analysis) (2) สมบัติวัสดุ SS400 ของแบบจำลองแสดงในตารางที่ 3 การกำหนดการจับยึดและแรงที่กระทำกับแขนกลช่วยยกได้กำหนดตามลักษณะของปัญหาที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2

ตารางที่ 3 สมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ [17]

สมบัติ	ค่า
Elastic Modulus (N/m ²)	2.10 x 10 ¹¹
Shear modulus (N/m ²)	7.93 x 10 ¹⁰
Yield stress (N/m ²)	245000000
Tensile strength (N/m ²)	510000000
Poisson ratio	0.26
Density (kg/m ³)	7860

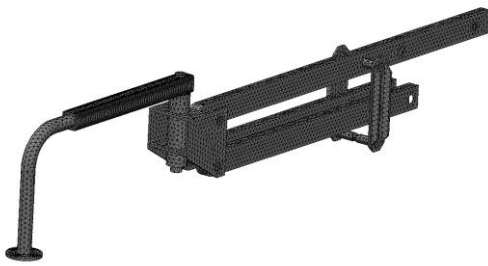
งานวิจัยนี้ได้สร้างเอลิเมนต์ (Element) เป็นรูปร่างเอลิเมนต์สามมิติที่มีโครงสร้างพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) และกำหนดขนาดเอลิเมนต์เท่ากันทุกแบบ และ กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerance) ของเอลิเมนต์มีค่าเป็นร้อยละ 5 ของขนาดเอลิเมนต์ที่กำหนด ก่อนดำเนินการหาค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยกตามแผนการทดลองต่อไป ผู้เขียนได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองก่อน โดยเริ่มจากกำหนดเกณฑ์การลู่เข้า (Convergence) ให้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 5 และประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยกแบบเดิมของกรณีศึกษา เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความปลอดภัยที่อ้างอิงจากแคตตาล็อกของ บริษัท ที.อาร์. โมเตอร์ อินดัสทรี จำกัด [15] โดยกำหนดขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ผลลัพธ์การตรวจสอบแสดงในตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 พบว่าการกำหนดขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 93,248 ดังแสดงในรูปที่ 14 และมีได้ค่าความปลอดภัยจากการจำลองเท่ากับ 3.08 มีความคลาด-เคลื่อนร้อยละ 2.67 จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำที่น่าพอใจตามเกณฑ์การลู่เข้าที่ร้อยละ 5

ตารางที่ 4 การตรวจสอบผลลัพธ์เชิงตัวเลข

ขนาดเอลิเมนต์	จำนวนเอลิเมนต์	FOS	%d
15 mm	93,248	3.08	2.67%

เมื่อ %d คือ ค่าคลาดเคลื่อนร้อยละระหว่างค่า FOS ที่อ้างอิงจากบริษัท ที.อาร์.โมเตอร์ อินดัสทรี จำกัด และ ค่า FOS ที่ได้จากการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม SolidWorks



รูปที่ 14 การสร้างเอลิเมนต์สำหรับแขนกลช่วยยก
แบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษา

3.4 โครงสร้างต้นทุนการผลิตแขนกลช่วยยก

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างของต้นทุนการผลิตแขนกลช่วยยกของบริษัทกรณีศึกษา จากนั้นงานวิจัยนี้ได้สร้างสมการต้นทุนการผลิตของแขนกลช่วย โดยมีพารามิเตอร์และตัวแปรดังต่อไปนี้

p	ดัชนีของชิ้นส่วนทั้ง 7 ชิ้น $p = 1, 2, 3, \dots, 7$
CS_p	ราคาเหล็กต่อกิโลกรัมของชิ้นส่วน p
CM_p	ราคาตัดเนื้อวัสดุโดยเครื่องจักรของชิ้นส่วน p
CF_p	ราคาการตัดเหล็กด้วยเครื่องตัดไฟเบอร์ของชิ้นส่วนส่วน p
CB_p	ราคาเหมาตัดท่อต่อองศาของชิ้นส่วน p
CW_p	ราคาเชื่อมต่อมิลลิเมตรของชิ้นส่วน p
WS_p	น้ำหนักเหล็กของชิ้นส่วน p
V_p	ปริมาตรที่ตัดเนื้อวัสดุออกไปของชิ้นส่วน p
LF_p	ความยาวในการตัดด้วยเครื่องตัดไฟเบอร์ของชิ้นส่วน p
α_p	องศาที่ตัดของชิ้นส่วน p
n_p	จำนวนที่ตัดสำหรับชิ้นส่วน p
LW_p	ความยาวแนวเชื่อมของชิ้นส่วน p
TS_p	ต้นทุนวัสดุ

TM_p ต้นทุนการตัดเนื้อวัสดุโดยเครื่องจักร

TF_p ต้นทุนการตัดเหล็กด้วยเครื่องตัดไฟเบอร์

TB_p ต้นทุนการกัดเหล็ก

TW_p ต้นทุนการเชื่อม

TMC_p ต้นทุนการผลิตโดยรวมของชิ้นส่วน p

ฟังก์ชันจุดประสงค์ของต้นทุนการผลิตโดยรวมของแขนกลช่วยยกดังสมการที่ 1

$$\sum_{p=1}^7 TMC_p \quad (1)$$

เมื่อ

$$TMC_p = TS_p + TM_p + TF_p + TB_p + TW_p \quad (2)$$

$$TS_p = CS_p WS_p \quad (3)$$

$$TM_p = CM_p V_p \quad (4)$$

$$TF_p = CF_p LF_p \quad (5)$$

$$TB_p = CB_p \alpha_p n_p \quad (6)$$

$$TW_p = CW_p LW_p \quad (7)$$

จากสมการที่ 2 อธิบายที่มาต้นทุนการผลิตของชิ้นส่วน p สำหรับแขนกลช่วยยก ซึ่งเกิดจากการรวมกันของต้นทุนวัสดุ ต้นทุนการตัดเนื้อวัสดุโดยเครื่องจักร ต้นทุนการตัดเหล็กด้วยเครื่องตัดไฟเบอร์ ต้นทุนการกัดเหล็ก และ ต้นทุนการเชื่อม งานวิจัยนี้ได้อธิบายต้นทุนดังกล่าวไว้ในสมการที่ 3 ถึง 7 หลังจากนั้นทำการคำนวณต้นทุนของแขนกลช่วยยกทุกรูปที่ได้จากแผนการทดลองในหัวข้อที่ 3.2



3.5 การออกแบบที่ดีที่สุด

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและหา รูปแบบของแขนกลช่วยยกที่ดีที่สุดด้วยเครื่องมือหา ผลตอบสนองค่าที่ดีที่สุด (Response Optimizer) ใน โปรแกรม Minitab โดยกำหนดให้ค่าตอบสนอง (Response) ของต้นทุนการผลิตรวมมีเป้าหมายคือน้อยที่สุด ส่วนค่าตอบสนองของค่าความปลอดภัยคือ มากที่สุด นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้วิศวกร และผู้มีอำนาจตัดสินใจของบริษัทกรณีศึกษาเป็นคน กำหนดระดับความสำคัญของจุดประสงค์ทั้งสอง เมื่อมีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในการออกแบบแขนกล ช่วยยกนี้จะทำให้ได้ตัวแบบถดถอยเชิงเส้นของต้นทุน การผลิตรวมและค่าความปลอดภัย แต่เนื่องจากปัจจัย และระดับในการออกแบบแขนกลช่วยยกมีจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถนำตัวแบบทั้งหมดลงในบทความได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแทนค่าตัวแบบถดถอยเชิงเส้นทั้งสองด้วย Z_1 คือ สมการตัวแบบถดถอยเชิงเส้นของ ต้นทุนการผลิตรวม และ Z_2 คือ สมการตัวแบบ ถดถอยเชิงเส้นของค่าความปลอดภัย ดัชนีและตัวแปร การออกแบบมีรายละเอียดดังนี้

ดัชนี

- a ดัชนีแทนระดับของปัจจัย A โดย $a = 1, 2$
- b ดัชนีแทนระดับของปัจจัย B โดย $b = 1, 2, 3, 4$
- c ดัชนีแทนระดับของปัจจัย C โดย $c = 1, 2$
- d ดัชนีแทนระดับของปัจจัย D โดย $d = 1, 2$
- e ดัชนีแทนระดับของปัจจัย E โดย $e = 1, 2, 3$
- f ดัชนีแทนระดับของปัจจัย F โดย $f = 1, 2$
- g ดัชนีแทนระดับของปัจจัย G โดย $g = 1, 2, 3$
- h ดัชนีแทนระดับของปัจจัย H โดย $h = 1, 2$

ตัวแปรการออกแบบ

- A_a ถ้า $A_a = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย A ระดับที่ a ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย A ระดับที่ a ไม่ถูกเลือก
- B_b ถ้า $B_b = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย B ระดับที่ b ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย B ระดับที่ b ไม่ถูกเลือก
- C_c ถ้า $C_c = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย C ระดับที่ c ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย C ระดับที่ c ไม่ถูกเลือก
- D_d ถ้า $D_d = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย D ระดับที่ d ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย D ระดับที่ d ไม่ถูกเลือก
- E_e ถ้า $E_e = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย E ระดับที่ e ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย E ระดับที่ e ไม่ถูกเลือก
- F_f ถ้า $F_f = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย F ระดับที่ f ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย F ระดับที่ f ไม่ถูกเลือก
- G_g ถ้า $G_g = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย G ระดับที่ g ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย G ระดับที่ g ไม่ถูกเลือก
- H_h ถ้า $H_h = 1$ คือแนวทางการออกแบบของปัจจัย H ระดับที่ h ถูกเลือก ถ้าในกรณีอื่นแนวทางการ ออกแบบของปัจจัย H ระดับที่ h ไม่ถูกเลือก

เมื่อนำตัวแบบถดถอยเชิงเส้นทั้งสองค่าตอบสนอง มาสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้ฟังก์ชันจุดประสงค์ ของต้นทุนการผลิตรวมให้มีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงใน สมการที่ (8) และ ฟังก์ชันจุดประสงค์ของค่าความ ปลอดภัยให้มีค่ามากที่สุด แสดงในสมการที่ (9)



$$\text{Min } Z_1 \quad (8)$$

$$\text{Max } Z_2 \quad (9)$$

ภายใต้เงื่อนไข

$$A_a, B_b, C_c, D_d, E_e, F_f, G_g, H_h \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$\forall a = 1, 2, b = 1, 2, 3, 4,$$

$$c = 1, 2, d = 1, 2,$$

$$e = 1, 2, 3, f = 1, 2,$$

$$g = 1, 2, 3, h = 1, 2$$

สมการที่ (10) กำหนดให้ตัวแปรออกแบบทั้งหมดมีค่าเป็นไบนารี (binary design variables) ผลลัพธ์ที่ได้จาก Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab เป็นค่าคาดการณ์ที่ได้จากสมการถดถอย (Z_1 และ Z_2) ทำให้ยังไม่สามารถนำต้นทุนและค่าความปลอดภัยที่คาดการณ์ได้มาใช้เป็นคำตอบที่แท้จริงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องประกอบชิ้นงานของแขนกลช่วยยกตามรูปแบบที่ดีที่สุดจากการคาดการณ์ แล้วจึงคำนวณต้นทุนและค่าความปลอดภัยอีกครั้ง เพื่อให้ต้นทุนและค่าความปลอดภัยจริง

4. ผลการวิจัย

วิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อออกแบบแขนกลช่วยยกที่มีต้นทุนต่ำที่สุดและมีค่าความปลอดภัยสูงที่สุด งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม SolidWorks 2017 ในการสร้างโมเดลสามมิติและวิเคราะห์ความแข็งแรงของแขนกลช่วยยก และใช้โปรแกรม Minitab เพื่อออกแบบการทดลองและหาค่าที่ดีที่สุด โดยกำหนดการตั้งค่าต่างๆใน Response Optimizer ของ

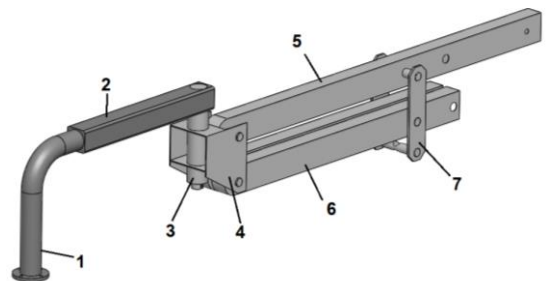
โปรแกรม Minitab โดยที่บริษัทกรณีศึกษากำหนดให้ค่ามีน้ำหนักและความสำคัญเท่ากัน ส่วนค่าอื่นๆใช้ค่าตั้งต้นที่โปรแกรมให้มา ซึ่งแขนกลช่วยยกนี้สามารถเปลี่ยนพารามิเตอร์ตามที่บริษัทกรณีศึกษากำหนดและไม่ทำให้รูปร่างโดยรวมของแขนกลช่วยยกเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจัดเป็นการปรับขนาดของชิ้นงานที่ดีที่สุด (Parametric Optimization)

4.1 การเปรียบเทียบแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับแขนกลช่วยยกแบบเดิม

ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับแขนกลช่วยยกแบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษา โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1 การเปรียบเทียบด้านรูปแบบที่เลือกใช้และผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแขนกลช่วยยก

วิธีที่นำเสนอได้ทำการเลือกระดับของแต่แนวทางการออกแบบแขนกลช่วยยกให้แตกต่างจากแขนกลช่วยยกเดิมสำหรับปัจจัย B, D, E, G และ H ส่วนปัจจัย A, C และ F ยังคงใช้รูปแบบเดิม ดังแสดงในตารางที่ 5 และแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 แขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ



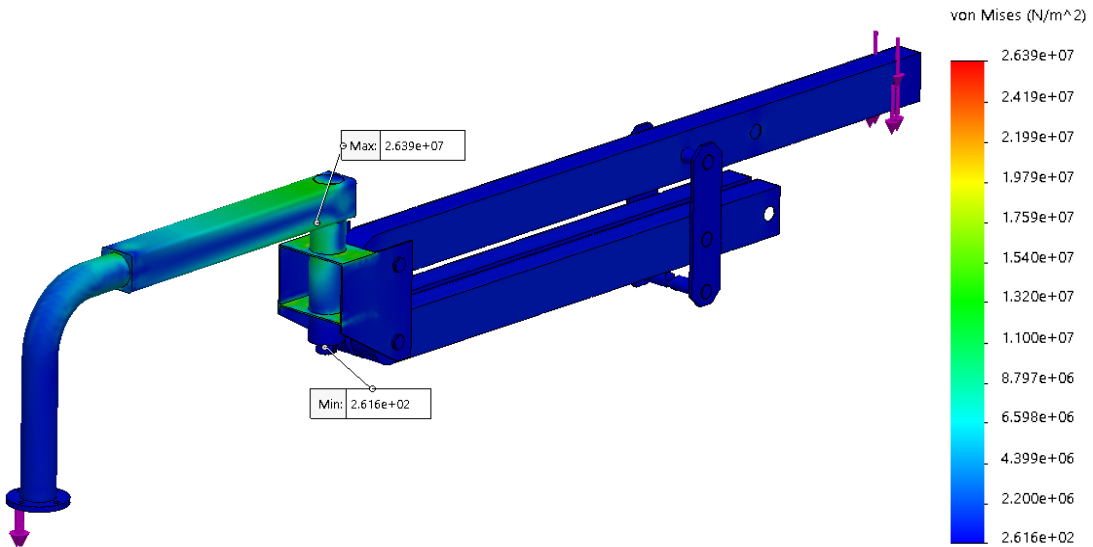
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบด้านรูปแบบที่เลือกใช้

ปัจจัย	ระดับที่แขนกลช่วยยกแบบเดิมเลือกใช้	ระดับที่แขนกลที่ได้จากวิธีที่เสนอเลือกใช้
A	1	1
B	1	3
C	1	1
D	1	2
E	1	2
F	1	1
G	1	2
H	1	2

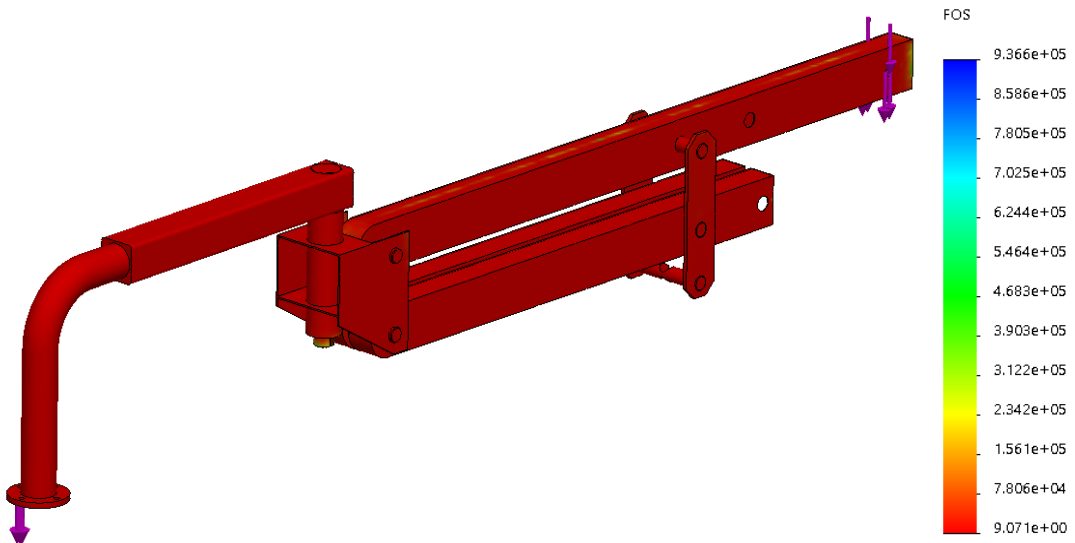
จากรูปที่ 15 และตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแขนกลช่วยยกแบบเดิมของบริษัท

กรณีศึกษาในรูปที่ 2 พบว่ามีการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนที่ 1, 2, 3, 5 และ 6 ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มแข็งแรงโดยรวมให้กับแขนกลช่วยยก ในขณะที่ชิ้นส่วนที่ 4 และ 7 ถูกลดความหนาและปรับให้มีความซับซ้อนในการผลิตน้อยลงเพื่อให้ต้นทุนน้อยลง

จากรูปที่ 16 แสดงให้เห็นว่าแนวทางการออกแบบแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอจะมีความเค้นสูงอยู่ที่บริเวณชิ้นส่วนที่ 1, 2, 3 และ 4 ในขณะที่ชิ้นส่วนที่ 5, 6, 7 มีความเค้นน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ นอกจากนี้แขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 9.07 ซึ่งผลการคำนวณเพื่อหาค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 16 ค่า von Mises Stress ของแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 17 ค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ

4.1.2 การเปรียบเทียบด้านต้นทุนและค่าความปลอดภัย

ในหัวข้อนี้แสดงการเปรียบเทียบด้านต้นทุนและค่าความปลอดภัยระหว่างแขนกลช่วยยกแบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษาและแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ ดังนั้นงานวิจัยจึงกำหนดให้ต้นทุนและค่าความปลอดภัยเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการออกแบบ ซึ่งงานวิจัยนี้พบว่าแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพทางด้านต้นทุนดีกว่าแบบเดิม 24.68% และ แขนกลช่วยยกใหม่นี้ยังมีค่าความปลอดภัยมากกว่าแบบเดิม 204.33% ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบด้านต้นทุนและค่าความปลอดภัย

RP	TD	New	%e
Cost	34,117.64	25,698.40	24.68%
FOS	3.00	9.13	204.33%

เมื่อ RP = ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการออกแบบทั้งด้านต้นทุนการผลิตรวมและค่าความปลอดภัย, TD = แขนกลช่วยยกแบบเดิม, New = ผลลัพธ์จริงของแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ, FOS = ค่าความปลอดภัย, Cost = ต้นทุนการผลิตรวม, %e = ค่าคลาดเคลื่อนร้อยละระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบเก่าและแบบใหม่



4.2 ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ

ในหัวข้อนี้ได้แสดงผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินความเหมาะสมของตัวแบบถดถอยเชิงเส้นที่ได้จากวิธีที่นำเสนอโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (r^2) และ ค่าคาดการณ์เปรียบเทียบกับผลลัพธ์จริงที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ (New) ดังแสดงในตารางที่ 7

จากตารางที่ 7 แสดงค่า r^2 ของทั้งต้นทุนการผลิตรวมคือ 100.00% และค่าความปลอดภัย 99.53% แสดงว่าตัวแบบถดถอยเชิงของทั้งสองตัวชี้วัดประสิทธิภาพการออกแบบเหมาะสมกับข้อมูล ในส่วนค่าคาดการณ์ด้านต้นทุนการผลิตรวมที่ได้จากตัวแบบถดถอยเชิงเส้นมีค่าเท่ากับผลลัพธ์จริงของแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ส่วนค่าคาดการณ์กับผลลัพธ์จริงด้านค่าความปลอดภัยมีความแตกต่างกันเล็กน้อยเพียง 0.99% เท่านั้น แสดงว่าตัวแบบถดถอยนี้มีความแม่นยำที่น่าพอใจ ในงานวิจัยนี้ยังตรวจสอบความเชื่อมั่นเพื่อยืนยันความเชื่อมั่นของผลลัพธ์ ดังในตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ

RP	r^2	ค่า คาดการณ์	New
Cost	100.00%	25,698.40	25,698.40
FOS	99.53%	9.22	9.13

ตารางที่ 8 ยืนยันความเชื่อมั่นของผลลัพธ์

RP	95% CI
Cost	(25,698, 25,698)
FOS	(9.0994, 9.3405)

จากตารางที่ 8 แสดงว่าสามารถมั่นใจได้ร้อยละ 95 ว่าผลลัพธ์ของวิธีที่นำเสนอ (ต้นทุนการผลิตรวม คือ 25,698.40 และ ค่าความปลอดภัย คือ 9.13) อยู่ในช่วงความเชื่อมั่น (95% CI หรือ 95% Confidence Interval)

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์ที่ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ร่วมกับการออกแบบทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) และการหาค่าที่ดีที่สุด สำหรับแขนกลช่วยยกเพื่อลดต้นทุนการผลิตรวมและมีค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) มากที่สุด

จากผลการวิจัยพบว่าแขนกลช่วยยกที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในด้านต้นทุนการผลิตรวมดีกว่าแบบเดิม 24.68% และ มีค่าความปลอดภัยมากกว่าแบบเดิม 204.33% ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะดีกว่าเดิมค่อนข้างมาก แต่การที่ค่าความปลอดภัยสูงถึง 9.13 อาจถูกมองว่าเป็นการออกแบบที่ให้แขนกลช่วยยกมีความแข็งแรงเกินความจำเป็น ดังนั้นในอนาคตผู้เขียนจะพัฒนาวิธีการที่นำเสนอให้สามารถสร้างพรมแดนพาเรโต (Pareto frontier) ด้วยวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดแบบหลายจุดประสงค์ที่จะให้ผู้มีอำนาจตัดสินใจของบริษัทนี้ศึกษาได้เลือกรูปแบบของแขนกลช่วยยกที่หลากหลาย พรมแดนพาเรโตนี้จะเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนการผลิตและค่าความปลอดภัยของแขนกลช่วยยก จากนั้นใช้วิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process, AHP) เพื่อเลือกแบบแขนกลช่วยยกที่เหมาะสมและตรงต่อความ



ต้องการของบริษัทกรณีศึกษามากที่สุดเพื่อนำแบบที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอไปขายจริงในท้องตลาดต่อไป นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าตัวแบบถดถอยที่ได้จากวิธีที่นำเสนอมีความเหมาะสมกับข้อมูลสูงมาก และ ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในช่วงความเชื่อมั่นอย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอนี้ต้องใช้ความพยายามในการสร้างตัวแบบสามมิติของแขนกลช่วยยกจำนวนมาก เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบที่ต้องสร้างแบบแขนกลช่วยยกให้ครบทุกแบบที่มีความเป็นไปได้ และมีปัจจัยการออกแบบจำนวนมากกว่านี้อาจจะทำให้ขั้นตอนการสร้างตัวแบบสามมิตินานมากขึ้น ดังนั้นในอนาคตจำเป็นต้องจะพัฒนาวิธีการออกแบบการทดลอง หรือ แนวทางการตัดปัจจัย หรือ ระดับการทดลองที่ช่วยลดจำนวนการทดลองให้น้อยลง แต่ยังคงประสิทธิภาพไว้ หรือมีประสิทธิผลลดลงเพียงเล็กน้อย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทำวิจัยจาก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ขอขอบคุณกรรมการผู้จัดการและวิศวกรของบริษัท ที.อาร์.โมเดิร์น อินดัสทรี จำกัด ที่ให้ข้อมูลรวมถึงให้ความช่วยเหลืออย่างมากจากงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] www.trmodernasia.com/content/3057/ผลิตและจำหน่าย-เครื่องช่วยยก-เครื่องทุ่นแรงระบบลม-air-balancer-manipulator. (Accessed on 4 August 2021)
- [2] S. Mahalingam and A. Sharan, The optimal balancing of the robotic manipulators, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceeding, 1986, 828-835.
- [3] W.S. Newman and N. Hogan, Time optimal control of balanced manipulators, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1989, 111(2), 187-193.
- [4] C.A.C. Coello, A.D. Christiansen, and A.H. Aguirre, Multiobjective design optimization of counterweight balancing of a robot arm using genetic algorithms, the 7th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, Proceeding, 1995, 20-23.
- [5] C. Baradat, V. Arakelian, S. Briot, and S. Guegan, Design and prototyping of a new balancing mechanism for spatial parallel manipulators, Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2008, 130(7), 0723051-07230513.
- [6] A. Nikoobin and M. Moradi, Optimal balancing of robot manipulators in point-to-point motion, Robotica, 2011, 29(2), 233-244.
- [7] W. Xu, D. Meng, H. Liu, X. Wang, and B. Liang, Singularity-free trajectory planning of free-floating multiarm space robots for keeping the base inertially stabilized, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(12), 2464- 2477.



- [8] J. Wang and X. Kong, An optimization method for the static balancing of manipulators using springs, the 44th Mechanisms and Robotics Conference, Proceeding, 2020, 22217.
- [9] M.H. Ali, Y. Kuralbay, A. Aitmaganbet, and M.A.S. Kamal, Design of a 6-DOF robot manipulator for 3D printed construction, Materials Today: Proceedings, In Press, 31 July 2021.
- [10] R. Xu, J. Luo, and M. Wang, Optimal grasping pose for dual-arm space robot cooperative manipulation based on global manipulability, Acta Astronautica, 2021, 183, 300-309.
- [11] D. Cholaseuk, Optimum and robust geometric design of mechanical parts, Thesis, Columbia University, USA, 2001.
- [12] D. Cholaseuk, A stress-based material distribution method for optimum shape design of mechanical parts, Thammasat International Journal of Science and Technology, 2006, 11(3), 17-21.
- [13] A. Manee-ngam, P. Saisirirat, and P. Suwankan, Hook design loading by the optimization method with weighted factors rating method, Energy Procedia, 2017, 138, 337–342.
- [14] T. Kot, Z. Bobovský, M. Brandstötter, V. Krys, I. Virgala, and P. Novák, Finding optimal manipulator arm shapes to avoid collisions in a static environment, Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(1), 64.
- [15] <https://drive.google.com/file/d/1NpY0PhRgTiJzeCKOaKcApZq7PCW32S2/view?usp=sharing> (Accessed on 14 October 2021)
- [16] www.syssteel.com/wp-content/uploads/2018/09/AW-Catalog-Thai-Effective-April-2018.pdf. (Accessed on 14 October 2021)
- [17] www.meadinfo.org/2010/09/jis-g-3101-ss400-steel-properties-spec.html. (Accessed on 14 October 2021)