

การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบป้อนสำหรับทีนัท M12 กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC

ธีรวุฒิ เชื้อนแก้ว และ ฐิติ หมอรักษา*

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมภาคตะวันออก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 3154 8929 อีเมล: thiti_mh@mutto.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.09.003

รับเมื่อ 11 มกราคม 2564 แก้ไขเมื่อ 17 มีนาคม 2564 ตอรับเมื่อ 23 มีนาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 9 กันยายน 2564

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงกดสูงสุด (Maximum Compression Force) สำหรับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบป้อน (Projection Spot Welding) สำหรับทีนัท M12 กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^3 (Full Factorial Design) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) เป็นเครื่องมือเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับปัจจัยที่ทำการศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงกดหัวอิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้าเชื่อม และเวลาเชื่อม ซึ่งผลการศึกษาพบว่าค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงกดสูงสุด คือ แรงกดหัวอิเล็กโทรด 7.11 กิโลนิวตัน กระแสไฟฟ้าเชื่อม 11,500 แอมแปร์ และเวลาเชื่อม 15 ไซเคิล (300 มิลลิวินาที) โดยค่าเฉลี่ยค่าแรงกดสูงสุดเท่ากับ 8,766 นิวตัน ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน TSB 1503G นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ปีละ 110,880 บาท คิดเป็น 0.42% ของต้นทุนสินค้าประกอบหลัก (Assembly Part) และคงสภาพการจ้างงานของพนักงานเดิมโดยไม่เลิกจ้างจำนวน 1 คน โดยวิธีการเพิ่มภาระงานให้ครบเวลาการทำงานมาตรฐาน 8 ชั่วโมงต่อวัน

คำสำคัญ: การเชื่อมความต้านทานแบบป้อน การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ฟังก์ชันความพึงพอใจ



Optimization of Resistance Projection Welding Process Parameters for M12 T-Shape Weld Nut and SGHC Hot-Dip Zinc-Coated Steel Sheet

Teerawut Khuenkaew and Thiti Mhoraksa*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Agro-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 3154 8929, E-mail: thiti_mh@rmutto.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.09.003

Received 11 January 2021; Revised 17 March 2021; Accepted 23 March 2021; Published online: 9 September 2021

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed to determine the optimal condition of welding factors affecting maximum compression force of projection spot welding of weldment between M12 T-shape weld nut and SGHC Hot-dip zinc-coated steel sheet by employing the 2^3 full factorial designs and performs at 95% confidence levels. The desirability function was used as the optimization tool. There were three welding parameters investigated including electrode force, welding current and welding time. The significant parameters and optimal welding condition obtained were at 7.11 kN of electrode force, 11,500 amperes of welding current and 15 of cycles (300 ms) welding time, and the corresponding maximum compression force was 8,766 N that reached the TSB 1503G customer's requirement. In addition, the improvement can be reduced the production cost amount 110,880 baht per year or 0.42% of the cost of assembly parts and to maintain employment 1 man by increased production load to production standard time. (8 hours per day).

Keywords: Resistance Projection Welding, Full Factorial Design, Factors Optimization, Desirability Function

Please cite this article as: T. Khuenkaew and T. Mhoraksa, "Optimization of resistance projection welding process parameters for M12 t-shape weld nut and SGHC hot-dip zinc-coated steel sheet," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 1, pp. 102–112, Jan.–Mar. 2023 (in Thai).



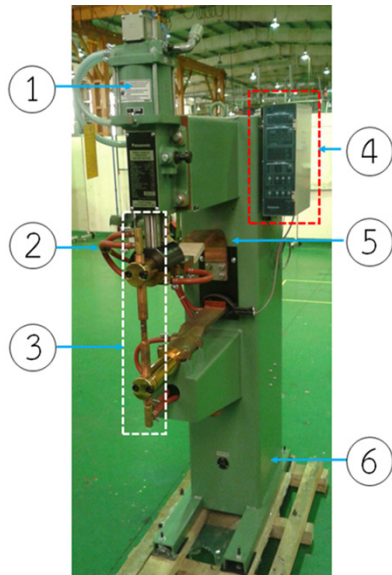
1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตรถยนต์และชิ้นส่วน ถือเป็นผู้ผลิตอันดับต้นๆ ในภูมิภาคเอเชีย และระดับโลก การผลิตรถยนต์และชิ้นส่วนมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทยเป็นอย่างมาก โดยสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ภาคอุตสาหกรรมไทยคิดเป็นร้อยละ 12 ของอุตสาหกรรมรวมของประเทศไทย ใน พ.ศ. 2555 และสูงขึ้นเป็นร้อยละ 14 ใน พ.ศ. 2562 [1] ปัจจุบันการผลิตรถยนต์และชิ้นส่วนมีการผลิตที่ลดลง เนื่องจากสถานการณ์การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 (COVID19) โดยมีการระบาดอย่างรุนแรงในวงกว้าง และยืดเยื้อยาวนาน ส่งผลต่อระดับการผลิตภาคอุตสาหกรรมของไทยลดลงถึง 11.4% ในช่วง 9 เดือนแรกของ พ.ศ. 2563 [2] ดังนั้นเพื่อการค้าการลงทุนธุรกิจให้เป็นไปอย่างต่อเนื่องของภาคอุตสาหกรรม ทุกบริษัทจะทำการลดต้นทุนการผลิต และเพื่อคงสภาพการทำงานของพนักงานเดิม บริษัทกรณีศึกษาจึงกำหนดนโยบายให้ทำการลดต้นทุนการผลิตโดยลดการซื้อชิ้นส่วนประกอบย่อย (Component Sub-Assembly Part) ให้เป็นการผลิตสินค้าภายในบริษัท ชิ้นส่วนประกอบหลัก (Assembly Part) ซื่อตัวประกอบชุดประกอบหลอดไฟ (Plate Support Lamp) เป็นชิ้นส่วนหนึ่งที่ถูกเลือก เพื่อทำการลดต้นทุนการผลิต ชิ้นส่วนประกอบหลักนี้มีชิ้นส่วนประกอบย่อยที่มีพื้นที่ M12 ถูกเชื่อมกับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC ด้วยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบป้อน (Resistance Projection Welding) จากเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบป้อนพิกัด 70 กิโลโวลต์แอมป์ จากบริษัทผู้รับเหมาช่วงต่อ (Supplier)

จากวิธีการลดต้นทุนดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตจากกระบวนการผลิตแบบเดิม คือ มีการเปลี่ยนแปลงสถานที่ผลิต เปลี่ยนแปลงเครื่องจักร และคนงานในการผลิต แต่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงวิธีการเชื่อมจากวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบป้อนเป็นวิธีการเชื่อมอย่างอื่นได้ เนื่องจากข้อกำหนดจากแบบงานของลูกค้าที่กำหนดให้เป็นวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบป้อน บริษัทกรณีศึกษาต้องผ่านการรับรองกระบวนการผลิตจากลูกค้า [3] เนื่องจากกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบป้อน เป็นกระบวนการที่

ต้องควบคุมพิเศษ [4] ต้องมีการกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมโดยกำหนดเป็นมาตรฐานเงื่อนไขการเชื่อม (Projection Welding Condition Standard Sheet) [5] ต้องมีการกำหนดอายุการใช้งานของหัวอิเล็กโทรด [6] เพื่อให้เกิดการประสานที่พื้นที่ M12 ให้ติดแน่นกับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC โดยคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมต้องสามารถรับแรงบิด แรงกดโดยไม่มีอาการหลุดหรือเกิดเสียหายระหว่างการประกอบในสายการผลิตรถยนต์หรือชิ้นส่วน [7] จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ พบนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาค้นคว้าการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมของการเชื่อมความต้านทานแบบป้อน [8]–[10] จะเห็นความสอดคล้องของปัจจัยการเชื่อมที่ถูกกำหนดเป็นปัจจัยหลักในการทดลอง ได้แก่ แรงกดหัวอิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้าเชื่อม และเวลาเชื่อม แต่ระดับค่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีค่าแตกต่างกันเนื่องจาก พิกัดกำลังไฟของเครื่องเชื่อม วัสดุที่ใช้ในการเชื่อม รูปร่าง/ชนิดของอิเล็กโทรดที่ไม่เหมือนกัน เป็นต้น ซึ่งจะแตกต่างจากกระบวนการเชื่อมแบบอื่นๆ เช่น การเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding) ที่มีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมต่อกัน คือ ความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันอัด แรงดันเสียดทาน เวลาต้นอัด และเวลาเสียดทาน [11]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบป้อนสำหรับชิ้นส่วนประกอบย่อย เพื่อเป็นการยืนยันค่าแรงกดสูงสุด (Maximum Compression Load) ของรอยเชื่อมชิ้นงานดังกล่าวต่อลูกค้าของบริษัทกรณีศึกษา วัสดุที่นำมาทำการเชื่อมคือ พื้นที่ M12 กับ เหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC ความหนา 1.6 มิลลิเมตร โดยผลตอบของการศึกษานี้คือ ค่าแรงกดสูงสุดภายใต้มาตรฐาน TSB 1503G โดยพื้นที่ต้องต้านทานแรงกดสูงสุดอย่างน้อย 5,685 นิวตัน ปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงกดหัวอิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้าเชื่อม และเวลาเชื่อม เชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบป้อนขนาดพิกัด 50 กิโลโวลต์แอมป์ โดยวิธีการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยใช้วิธีการวิเคราะห์



- ① ชุดกระบอกลม
- ② ชุดท่อน้ำระบายความร้อน
- ③ ชุดจับยึดหัวอิเล็กทรอนิกส์
- ④ ชุดควบคุมปัจจัยการเชื่อม
- ⑤ ชุดตัวนำกระแสไฟฟ้าเชื่อม
- ⑥ โครงสร้างเครื่อง

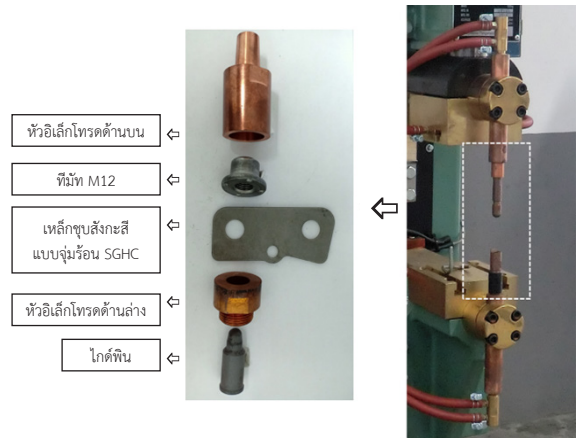
รูปที่ 1 เครื่องเชื่อมความดันแบบปั๊ม

ตัวแปรผิวสะท้อน (Response Surface Methodology) และ ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) นอกจากนี้ ยังมีการเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย และภาระงานของพนักงาน ที่ทำหน้าที่ผลิตชิ้นส่วนประกอบย่อยที่นัท M12 กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

ในการดำเนินการวิจัยวัสดุที่ใช้คือที่นัท M12 (JIS B 1196) กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC ความหนา 1.6 มิลลิเมตร (JIS G 3302) และมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 ทำการเชื่อม โดยใช้เครื่องเชื่อมความดันแบบปั๊มเครื่องหมายการค้า PANASONIC รุ่น YR500-CM2 ตามรูปที่ 1 มีพิกัดกำลัง ระดับ 50 กิโลวัตต์แอมป์ 50 เฮิร์ตซ์ โดยหัวอิเล็กทรอนิกส์ ด้านบน และล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 30 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุ CuCrZr และมีโถดพื้นทำจากวัสดุ KCF เป็น ตัวประกอบที่นัท M12 ให้มีความร่วมศูนย์กับแผ่นงานเชื่อม



รูปที่ 2 ชุดจับยึดหัวอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ (wt%)

สัญลักษณ์	ที่นัท M12	เหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC
C	0.08	0.15
Mn	0.035	0.80
P	0.009	0.05
S	0.0016 Max	0.05
Si	-	0.04
Cr	-	0.06
Fe	Remain	Remain

การทดลองเชื่อมชิ้นงานจะดำเนินการตามลำดับการ ออกแบบการทดลองแบบสุ่มโดยมีขั้นตอน ดังนี้

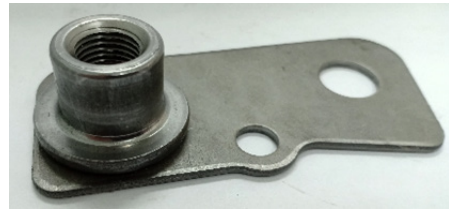
- 1) การเตรียมที่นัท M12 กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC จำนวน 19 การทดลอง โดยชิ้นงานทั้งหมด จะถูกทำความสะอาดเพื่อขจัดสิ่งสกปรก และคราบน้ำมัน
- 2) การประกอบหัวอิเล็กทรอนิกส์ด้านบน-ด้านล่าง และ โถดพื้นเข้ากับชุดจับยึดหัวอิเล็กทรอนิกส์ตามรูปที่ 2
- 3) ปรับตั้งค่าปัจจัยการเชื่อมในชุดควบคุมการเชื่อม ตามรูปที่ 3
- 4) ทำการเชื่อมชิ้นงานตามลำดับการออกแบบการทดลอง
- 5) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3 ถึง 4 ตามลำดับการออกแบบ การทดลองจนครบทั้ง 19 ชิ้นงานทดลอง หลังจากเชื่อม ชิ้นงานเสร็จ นำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบค่าแรงกดสูงสุด ตามมาตรฐาน TSB 1503G แล้วบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 3 ชุดควบคุมปัจจัยการเชื่อม

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงเครื่องจักรในการผลิตโดยเปลี่ยนจากการเชื่อมชิ้นงานด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มพิกัดกำลัง 70 กิโลโวลต์แอมป์ จากบริษัทผู้รับเหมาช่วงต่อเป็นการเชื่อมชิ้นงานภายในบริษัทด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มพิกัดกำลัง 50 กิโลโวลต์แอมป์ ดังนั้นปัจจัยการเชื่อมปัจจุบันที่ใช้กับเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มพิกัดกำลัง 70 กิโลโวลต์แอมป์ จึงไม่สามารถนำมาเป็นปัจจัยการเชื่อมสำหรับเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มพิกัดกำลัง 50 กิโลโวลต์แอมป์ ได้เนื่องจากมีความแตกต่างกันหลายประการ เช่น แหล่งจ่ายพลังงานสำหรับการเชื่อม (Welding Power Source) มีค่าพิกัดกำลังที่แตกต่างกัน รูปร่างของหัวอิเล็กโทรด (Electrode Geometry) ที่ใช้ในการเชื่อมมีความแตกต่างกัน รวมถึงเครื่องหมายการค้า (Brand) ของเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มจากผู้ผลิตแตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการออกแบบการทดลองใหม่โดยกำหนดปัจจัยการเชื่อมเพื่อทำการทดลองตามคำแนะนำในคู่มือการใช้งานเครื่องเชื่อมจากผู้ผลิตเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มพิกัดกำลัง 50 กิโลโวลต์แอมป์



รูปที่ 4 ชิ้นงานหลังผ่านการเชื่อม

งานวิจัยนี้การออกแบบการทดลองแพททอเรียลเต็มรูป โดยผลตอบของการศึกษานี้ คือ ค่าแรงกดสูงสุด สำหรับปัจจัยที่ทำการศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงกดหัวอิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้าเชื่อม และเวลาเชื่อม ซึ่งแต่ละปัจจัยแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ ระดับต่ำและระดับสูงดังตารางที่ 2 ในแต่ละลำดับการทดลองทำการทดลองซ้ำ (Replication) 2 ครั้ง และทำการทดลองบนปัจจัยระดับกลาง (Center Point) 3 การทดลองรวมผลการทดลองทั้งหมด 19 ผลการทดลอง ภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อมแสดงตามรูปที่ 4 การเชื่อมชิ้นงานทำการทดลองแบบสุ่มเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากปัจจัยที่ไม่ได้ทำการควบคุม สำหรับปัจจัยการเชื่อมอื่นๆของการทดลองผู้วิจัยได้กำหนดค่าปัจจัยเป็นค่าคงที่ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ปัจจัย สัญลักษณ์ และระดับของปัจจัย

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย	
		ต่ำ	สูง
แรงกดหัวอิเล็กโทรด (kN)	F	6.5	7.5
กระแสไฟฟ้าเชื่อม (x100A)	I	100	115
เวลาเชื่อม (Cycles)	Tw	15	25

ตารางที่ 3 ปัจจัยการเชื่อมที่กำหนดเป็นค่าคงที่

ปัจจัย	ค่าของปัจจัย
อุณหภูมิน้ำขาเข้า	23.5 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิน้ำขาออก	27.0 องศาเซลเซียส
ปริมาณการไหลของน้ำ	7 ลิตรต่อนาที
เวลาการกด (Squeezes Time)	45 ไชเคิล
เวลาการกดค้าง (Hold Time)	5 ไชเคิล

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

เมื่อทำการทดลองเชื่อมชิ้นงาน และทดสอบแรงกด ผลการทดลองจะถูกนำไปประมวลผล และทำการวิเคราะห์ ข้อมูลด้วยโปรแกรม MINITAB Release18 โดยข้อมูลการทดลองจะถูกตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองรวมทั้ง การหาค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบ (Response) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการประมวลผล และการวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม MINITAB ด้วยวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรผิวสะท้อน เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ของการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่ม (Optimization) ผลการประมวลผลจะแสดงเป็นข้อมูลทางสถิติในรูปแบบตาราง การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย สำหรับการพิจารณา ปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ ค่าแรงกดสูงสุดของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญจะพิจารณาจาก ค่า p -value ที่ค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 สำหรับฟังก์ชัน ความพึงพอใจ ใช้วัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมของผลตอบ เช่นกัน โดยในกรณีการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของ ปัจจัยที่มีต่อผลตอบในการศึกษาหลายผลตอบ ค่าความ พึงพอใจรวม (D) สามารถหาได้จากค่ามัธยฐานเรขาคณิต (Geometric Mean) ของความพึงพอใจของแต่ละผลตอบ ตามสมการที่ (1)

$$D = \left(\prod_{i=1}^k d_i(\hat{Y}_i) \right)^{1/k} \quad (1)$$

เมื่อ k คือ จำนวนของผลตอบ

ถ้าให้ $\hat{Y}_i(x)$ เป็นค่าผลตอบของเงื่อนไขการเชื่อม x และ $d_i(Y_i)$ คือ ฟังก์ชันความพึงพอใจของ \hat{Y}_i โดยค่าความพึงพอใจ อยู่ช่วงระดับ 0–1 โดย $d_i(Y_i) = 0$ คือ ค่าความพึงพอใจที่ต่ำ สุด และ $d_i(Y_i) = 1$ คือ ค่าความพึงพอใจที่สูงที่สุด และในทาง ปฏิบัติจะใช้ค่าทำนาย \hat{Y}_i แทน Y_i

การหาค่าที่เหมาะสมจากการทดลองกรณีที่ต้องการผล ตอบที่น้อยที่สุดฟังก์ชันความพึงพอใจสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (2)

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } \hat{Y}_i(x) < T_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - U_i}{T_i - U_i} \right)^r & \text{if } T_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq U_i \\ 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (2)$$

เมื่อ L_i คือ ขีดจำกัดบน (Upper Limit) ของผลตอบ

r คือ ค่าน้ำหนักของฟังก์ชัน

T_i คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ

การหาค่าที่เหมาะสมจากการทดลองในกรณีที่ต้องการ ผลตอบที่มากที่สุดฟังก์ชันความพึงพอใจสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ (3)

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - L_i}{T_i - L_i} \right)^r & \text{if } L_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq T_i \\ 1 & \text{if } \hat{Y}_i(x) > T_i \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ L_i คือ ขีดจำกัดล่าง (Lower Limit) ของผลตอบ

r คือ ค่าน้ำหนักของฟังก์ชัน

T_i คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ

สำหรับการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับงาน วิจัยนี้จะใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ เพื่อหาเงื่อนไขในการเชื่อม ที่ให้ค่าแรงกดสูงสุดได้ค่าตามเป้าหมาย (Target) ซึ่งฟังก์ชัน ความพึงพอใจสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - L_i}{T_i - L_i} \right)^s & \text{if } L_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq T_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - U_i}{T_i - U_i} \right)^t & \text{if } T_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq U_i \\ 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (4)$$

เมื่อ U_i คือ ขีดจำกัดบน (Upper Limit) ของผลตอบ
 L_i คือ ขีดจำกัดล่าง (Lower Limit) ของผลตอบ
 r คือ ค่าน้ำหนักของฟังก์ชัน
 T_i คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ
 s และ t คือ ค่าน้ำหนักของฟังก์ชัน

3. ผลการทดลอง

3.1 การหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานตามลำดับการออกแบบการทดลองแบบสุ่ม จากนั้นทำการทดสอบหาค่าแรงกดสูงสุดตามมาตรฐาน TSB 1503G ผลการทดลองดังตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่าแรงกดสูงสุดจำนวน 19 ชิ้นถูกนำมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม MINITAB Release18 เพื่อตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองในเทอมต่างๆ [12] รวมทั้งการหาค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงกดสูงสุดของการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มของทินท์ M12 กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าการตรวจสอบสมมติฐานของแบบจำลองจากส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ซึ่งประกอบด้วย การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง และการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลที่ทำกรวิเคราะห์ไม่ปรากฏการละเมิดสมมติฐานใดๆ

จากตารางที่ 5 แสดงการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหลังการปรับปรุงแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าปัจจัยหลักแรงกดหัวอิเล็กโทรด (F) กระแสไฟฟ้าเชื่อม (I) เวลาเชื่อม (Tw) และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ($F*F$), ($F*I$), ($I*Tw$) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงกดสูงสุดของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่า R-Sq = 98.24% และ R-Sq (adj) = 97.37% และจะเห็นได้ว่าค่า p -value ของการทดสอบ Lack-of-Fit = 0.997 ซึ่งมีความเพียงพอของตัวแปรในสมการ และเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับการทำนาย

ตารางที่ 4 ผลทดลองตามการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

ลำดับการออกแบบการทดลอง	ปัจจัยการเชื่อม			ค่าแรงกดสูงสุด (N)	
	แบบสุ่ม	ตามมาตรฐาน			
		F (kN)	I (x100A)	Tw (Cycles)	
1	19	7.0	108	20	5,504
2	10	7.5	100	15	2,594
3	4	7.5	115	15	8,213
4	18	7.0	108	20	5,528
5	9	6.5	100	15	5,347
6	16	7.5	115	25	11,617
7	1	6.5	100	15	5,144
8	3	6.5	115	15	13,590
9	2	7.5	100	15	2,596
10	5	6.5	100	25	4,026
11	17	7.0	108	20	5,503
12	7	6.5	115	25	14,225
13	12	7.5	115	15	9,000
14	8	7.5	115	25	8,927
15	11	6.5	115	15	1,3873
16	14	7.5	100	25	1,580
17	15	6.5	115	25	16,546
18	6	7.5	100	25	1,503
19	13	6.5	100	25	4,534

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อขนาดรอยเชื่อมไปทำการเขียนสมการทำนายค่าแรงกดสูงสุดจะได้สมการทำนายสมการที่ (5)

$$Y = 317635 - 109479(F) + 1348(I) - 1880(Tw) + 8782(F * F) - 162(F * I) + 18(I * Tw) \quad (5)$$

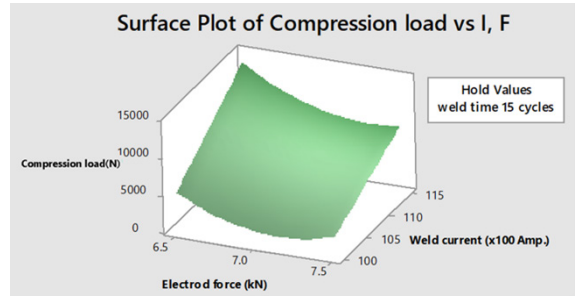
เมื่อ Y คือ ค่าแรงกดสูงสุด

ตารางที่ 5 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	317635	100635	3.156	0.008
<i>F</i>	-109479	27104	-4.039	0.002
<i>I</i>	1348	367	3.676	0.003
<i>Tw</i>	-1880	542	-3.473	0.005
<i>F*F</i>	8782	1897	4.630	0.001
<i>F*I</i>	-162	50	-3.217	0.007
<i>I*Tw</i>	18	5	3.541	0.004

จากข้อกำหนดในคู่มือคุณภาพสำหรับผู้ผลิตชิ้นส่วนหรือผู้รับจ้างช่วง (Supplier Quality Manual) ได้กำหนดระดับการควบคุมค่าแรงกดของการทดสอบแบบทำลายของนัทหรือโบลท์ไว้ว่า ต้องทำการยกระดับค่าแรงกดขึ้นอีกหนึ่งระดับจากข้อกำหนดของลูกค้า เช่น ลูกค้ากำหนดคุณภาพของรอยเชื่อมในระดับคลาส C ผู้ผลิตชิ้นส่วน หรือผู้รับจ้างช่วงต้องกำหนดค่าแรงกดที่ควบคุมตามมาตรฐานคลาส B ค่าแรงกด คือ 1.5 เท่าของค่ามาตรฐานคลาส C ตารางที่ 6 แสดงค่าที่เหมาะสมของปัจจัยจากการประมวลผลโดยโปรแกรม MINITAB ที่เกิดจากการกำหนดเป้าหมายของผลตอบ (Goal) เป็นค่าตามเป้าหมายโดยกำหนดค่าแรงกด 8,528 นิวตัน ซึ่งเป็นค่าเพื่อ 1.5 ตามค่ามาตรฐาน ส่วนค่าในระดับต่ำสุด (Lower) กำหนดตามมาตรฐานค่าแรงกดที่ลูกค้าต้องการคือ 5,685 นิวตัน และค่าในระดับสูงสุด (Upper) กำหนดค่าแรงกด 11,370 นิวตัน ซึ่งเป็นค่าเพื่อ 2.0 เท่าตามค่ามาตรฐาน รวมทั้งกำหนดค่าน้ำหนักของผลตอบ (Weight) และค่าความสำคัญของผลตอบ (Importance) โดยค่าทั้งสองนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 1.0 ในงานวิจัยนี้ให้น้ำหนักและความสำคัญของผลตอบเท่ากับ 1.0 เนื่องจากต้องการเน้นให้ผลตอบอยู่ในขอบเขตที่กำหนด และเข้าใกล้เป้าหมายมากที่สุด จากตารางที่ 6 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยคือ แรงกดหัวอิเล็กโทรด 7.11 กิโลนิวตัน กระแสไฟฟ้าเชื่อม 11,500 แอมแปร์ และเวลาเชื่อม 15 ไซเคิล

รูปที่ 5 แสดงพื้นผิวสะท้อนของค่าแรงกดสูงสุดของรอยเชื่อม และรูปที่ 6 แสดงโครงร่างของค่าแรงกดสูงสุดของ

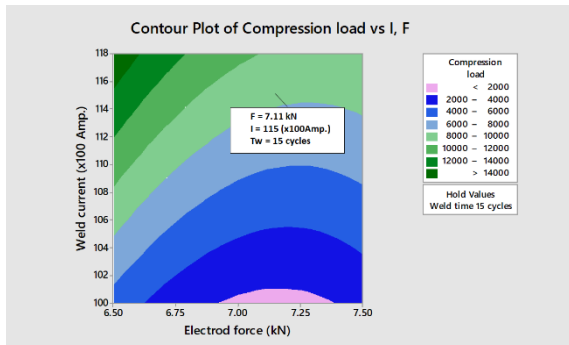


รูปที่ 5 พื้นผิวสะท้อนของค่าแรงกดสูงสุดของรอยเชื่อมระหว่างแรงกดหัวอิเล็กโทรดกับกระแสไฟฟ้าเชื่อม

ตารางที่ 6 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

Parameters	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Target		5685	8528	11370	1	1
Global Solution						
<i>F</i>	=	7.10606				
<i>I</i>	=	114.998				
<i>Tw</i>	=	15				
Predicted Responses						
Mean	=	8528.19,	Desirability =	0.999931		
Composite Desirability = 0.999931						

รอยเชื่อม ระหว่างแรงกดหัวอิเล็กโทรดกับกระแสไฟฟ้าเชื่อม ซึ่งเกิดจากการประมวลผลโดยโปรแกรม MINITAB โดยกำหนดปัจจัยของเวลาเชื่อมที่ 15 ไซเคิลเป็นค่าคงที่ จากรูปจะเห็นว่า การใช้แรงกดหัวอิเล็กโทรดระดับ 6.5 กิโลนิวตัน และการใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมในระดับที่สูงคือ 15,000 ถึง 11,800 แอมแปร์ จะให้ค่าแรงกดสูงสุดของรอยเชื่อมมากกว่า 14,000 นิวตัน แต่หากใช้แรงกดหัวอิเล็กโทรดในช่วงระดับ 6.90 ถึง 7.40 กิโลนิวตัน และการใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมในระดับ 10,000 แอมแปร์ จะให้ค่าแรงกดสูงสุดของรอยเชื่อมน้อยกว่า 2,000 นิวตัน และหากค่าเป้าหมายของค่าแรงกดสูงสุดของรอยเชื่อม มีค่า 8,528 นิวตัน จะต้องใช้แรงกดหัวอิเล็กโทรด 7.11 กิโลนิวตัน กระแสไฟฟ้าเชื่อม 11,500 แอมแปร์ และเวลาเชื่อม 15 ไซเคิล



รูปที่ 6 โครงร่างของค่าแรงกดสูงสุดของรอยเชื่อมระหว่างแรงกดหัวอิเล็กโทรดกับกระแสไฟฟ้าเชื่อม

3.2 การทดลองเพื่อยืนยันผล

การทดลองเพื่อยืนยันผลเป็นการทดลองบนค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อแรงกดสูงสุดของรอยเชื่อมโดยการปรับค่าปัจจัยการเชื่อมต่างๆ ของเครื่องเชื่อมความดันแบบปั๊ม ดังนี้ แรงกดหัวอิเล็กโทรด 7.11 กิโลนิวตัน กระแสไฟฟ้าเชื่อม 11,500 แอมแปร์ และเวลาเชื่อม 15 ไซเคิล แล้วทำการทดลองเพื่อการยืนยันผลการทดลองจำนวน 5 ชิ้น จากผลการทดลองแรงกดสูงสุดของเชื่อมที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8,766 นิวตัน ดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายตารางที่ 6 คือ 8,529 นิวตัน ที่ระดับค่าความพึงพอใจโดยรวม 0.999931 (99.9931%) ปรากฏว่าผลการทดลองเพื่อยืนยันผลค่าแรงกดสูงสุดของรอยเชื่อมมากกว่าค่าทำนายประมาณ 2.78 % และจากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าช่วงความเชื่อมั่น 95% ของผลการทดลองยืนยันผลได้ผ่านมาตรฐาน TSB 1503G

ตารางที่ 7 การทดลองเพื่อยืนยันผล

การทดลอง	แรงกดสูงสุด (นิวตัน)
1	8,533
2	8,666
3	8,808
4	8,833
5	8,991
ค่าเฉลี่ย	8,766
95% CI	8,550-8,982

3.3 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย และภาระงานของพนักงาน

หลังจากได้ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยการเชื่อม ผู้วิจัยได้จัดทำเป็นมาตรฐานเงื่อนไขการเชื่อม และทำการผลิตสินค้าตามมาตรฐานที่กำหนดไว้โดยผ่านการรับรองกระบวนการผลิตจากลูกค้า หากเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการลงทุนกับผลลัพธ์ที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ยอดการสั่งซื้อสินค้าประกอบหลัก คือ ตัวประกอบชุดประกอบหลอดไฟมียอดสั่งซื้อจากลูกค้าเดือนละ 22,000 ชิ้น โดยขายให้กับลูกค้าราคาชิ้นละ 99.67 บาท สินค้าประกอบหลักดังกล่าวมีชิ้นส่วนย่อย (Component Part) จำนวน 8 ชิ้น และมีชิ้นส่วนประกอบย่อย จำนวน 1 ชิ้น คือ ทินท์ M12 กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC ต้นทุนในการผลิตก่อนการปรับปรุงชิ้นละ 10.04 บาท หลังการปรับปรุงโดยการผลิตสินค้าภายในบริษัททำให้ต้นทุนลดลงเป็นชิ้นละ 9.62 บาท ซึ่งลดลงชิ้นละ 0.42 บาท เมื่อกำหนดยอดการสั่งซื้อชิ้นส่วนประกอบย่อย ทินท์ M12 กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC ลดลงเดือนละ 9,240 บาท (22,000 ชิ้นต่อเดือน \times 0.42 บาท) หรือลดลงปีละ 110,880 บาท (9,240 บาทต่อเดือน \times 12 เดือน) หรือคิดเป็น 0.42 % ของต้นทุนสินค้าประกอบหลัก (0.42 บาทต่อชิ้น/99.67 บาทต่อชิ้น)

2) ทางบริษัทกรณีศึกษาได้ใช้กลยุทธ์การผลิตสม่ำเสมอ (Level Production Strategies) [13] โดยมีวันทำงาน 20 วันต่อเดือน จากยอดสั่งซื้อจากลูกค้า 22,000 ชิ้นต่อเดือนหรือวันละ 1,100 ชิ้นต่อวัน (22,000 ชิ้นต่อเดือน/20 วัน) เมื่อผลิตชิ้นส่วนประกอบย่อย ทินท์ M12 กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC ด้วยรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) 10 วินาทีต่อชิ้น ทำให้เกิดภาระงานของพนักงานเท่ากับ 3.06 ชั่วโมงต่อวัน (1,100 ชิ้นต่อวัน \times 10 วินาทีต่อชิ้น) เมื่อรวมภาระงานเดิมของพนักงานประจำสายการผลิต (4.50 ชั่วโมงต่อวัน) ทำให้ภาระงานของพนักงานเพิ่มขึ้นเป็น 7.56 ชั่วโมงต่อวัน ด้วยเหตุผลพนักงานประจำสายการผลิตมีภาระงานรวมมีค่าใกล้เคียงกับเวลาทำงานมาตรฐาน (8.00 ชั่วโมงต่อวัน) จึงคงสภาพการจ้างงานของพนักงานเดิมจำนวน 1 คน โดยไม่เลิกจ้าง

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มสำหรับพินท์ M12 กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^3 สำหรับปัจจัยที่ทำการศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงกดหัวอิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้าเชื่อม และเวลาเชื่อม ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าแรงกดสูงสุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ใช้แรงกดหัวอิเล็กโทรด 7.11 กิโลนิวตัน กระแสไฟฟ้าเชื่อม 11,500 แอมแปร์ และเวลาเชื่อม 15 ไซเคิล (300 มิลลิวินาที) โดยค่าเฉลี่ยค่าแรงกดสูงสุดเท่ากับ 8,766 นิวตัน ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับการเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย และภาระงานของพนักงาน ยอดการสั่งซื้อชิ้นส่วนประกอบย่อย พินท์ M12 กับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน SGHC ลดลงปีละ 110,880 บาท คิดเป็น 0.42% ของต้นทุนสินค้าประกอบหลัก และคงสภาพการจ้างงานของพนักงานเดิมจำนวน 1 คน โดยวิธีการเพิ่มภาระงานให้ใกล้เคียงเวลาการทำงานมาตรฐาน 8 ชั่วโมงต่อวัน โดยไม่เลิกจ้าง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการวิจัยได้โดยเสร็จสมบูรณ์ต้องขอขอบพระคุณบริษัทกรณีศึกษาที่ได้อนุญาตให้คณะวิจัยเข้าศึกษาวิจัย ให้ข้อมูล และเผยแพร่ข้อมูลงานวิจัยเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาต่อไป ขอขอบคุณพนักงานทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณผู้ช่วยเก็บข้อมูล คือ คุณปณณวิษย์ พรวัฒนอนันต์ และคุณสถาพร ศิริแพทย์

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Chanthapong and C. Osatis. (2020, December). Turn over the Thai automotive crisis by enhancing labor skills. Bank of Thailand. Bangkok, Thailand (in Thai) [Online]. Available: [https:// www.bot.or.th/Thai/ResearchAndPublications/articles/](https://www.bot.or.th/Thai/ResearchAndPublications/articles/)

Pages/Article_15Sep2020.asp

[2] S. Tamthai, "The severity of the COVID-19 crisis affecting the manufacturing sector," The Office of Industrial Economics, Bangkok, Thailand, November 2020 (in Thai).

[3] Y. Butsa, "A study of localization automotive parts from japan to Thailand," M.S. thesis, Department of Logistics and Supply Chain Management, Faculty of Logistics, Burapha University, Chon Buri, 2016 (in Thai).

[4] H. Zhang and J. Senkara, *Resistance Welding Fundamentals and Applications*, 2nd ed. New York: Taylor & Francis Group, Inc. 2001.

[5] T. Khuenkaew, "Resistance spot welding of SUS316L and SUS425 stainless steels," D.Eng dissertation, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 2019 (in Thai).

[6] P. D. Enrique, H. Al Momani, C. DiGiovanni, Z. Jiao, K. R. Chan, and N. Y. Zhou, "Evaluation of electrode degradation and projection weld strength in the joining of steel nuts to galvanized advanced high strength steel," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 141, no. 10, pp. 1045011–1045018, 2019.

[7] F. Valdir, S. Danilo, F. Gilmar, and R. Fernando, "Inspection of projection welded automotive nuts through B-scan ultrasonic acoustic imaging," presented at the 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, April 16–20, 2012.

[8] Y. Janthong and K. Kanlayasiri, "Optimization on resistance projection welding variables for M8 nuts and SPHC270 hot-rolled mild steel plates welding," presented at the IE Network



- Conference 2013, Chon Buri, Thailand, October 16–18, 2013 (in Thai).
- [9] Z. Mikno, M. Stepien, and B. Grzesik, “Optimization of resistance welding by using electric servo actuator,” *Welding in the World*, vol. 61, no. 2, pp. 453–462, 2017.
- [10] Z. Mikno, “Projection welding of nuts involving the use of electromechanical and pneumatic electrode force,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 99, pp. 1405–1425, 2018.
- [11] W. Boonchouytan, R. Burapa, and W. Cheewawuttipong, “Effects of friction welding dissimilar joint to metallurgy and mechanical properties between aluminum casting semi-solid metal 356 and 7075 with copper interlayer on welded,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 3, pp. 465–480, 2020 (in Thai).
- [12] P. Chutima, *Design of Experiments in Engineering*, Chulalongkorn University Press, Bangkok, 2002 (in Thai).
- [13] P. Lalitaporn, *Production Planning and Control*, SE-Education public company limited, Bangkok, 2013 (in Thai).