



การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็ก AISI 1015 โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

Optimal Conditions of Friction Welding Process for AISI 1015 Steel using Response Surface Methodology

อิทธิพล วรพันธุ์^{1*}, ช่วงชัย ชูปวา² และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์³

Ittipon Worapun^{1}, Chuanchai Chooppava² and Chawalit Thinvongpituk³*

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

³ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* Correspondent author: ittipon.wo@rmuti.ac.th, i.worapun@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็กคาร์บอนชนิด AISI 1015 โดยศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงที่สุด ในการศึกษาวิธีพื้นผิวตอบสนองถูกนำมาใช้ในการประเมินผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมได้แก่ เวลาในการเสียดทาน เวลาในการอัด ความดันในการเสียดทาน ความดันในการอัด และความเร็วยรอบในการหมุนชิ้นงาน จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นว่า เวลาในการเสียดทานความดันในการเสียดทานและความดันในการอัด มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม ในขณะที่เวลาในการอัดและความเร็วยรอบในการหมุนชิ้นงานไม่มีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.8064 ได้สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานคือเวลาในการเสียดทานเท่ากับ 8.86 sec เวลาในการอัดเท่ากับ 2.22 sec ความดันในการเสียดทานเท่ากับ 29.36 bar ความดันในการอัดเท่ากับ 59.25 bar และความเร็วยรอบในการหมุนเท่ากับ 1259.58 rpm ให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงสุดเท่ากับ 1048 MPa ส่วนการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมได้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเท่ากับ 1007 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายพบว่ามีค่าอคติของค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเท่ากับ 3.91% ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามีความเหมาะสมสำหรับอธิบายช่วงของตัวแปรในการทดลองที่ใช้ศึกษาและมีความน่าเชื่อถือทางสถิติในการใช้ทำนายค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม

Abstract

The purpose of this research was to determine the relationship between various important parameters of the friction welding process for AISI 1015 steel to obtain a maximum tensile strength of welding joints. In this study, response surface methodology (RSM) was employed to evaluate the effects of friction time, upset time,

friction pressure, upset pressure and rotational speed on the tensile strength of welding joints. The results from the RSM analysis indicate that the friction time, friction pressure and upset pressure have the most significant effect on tensile strength of welding joints, while the upset time and rotational speed were not significant. The coefficient of determination (R^2) of the mathematical model was 0.8064. The optimal conditions of friction welding, which obtained the maximum tensile strength of welding joints of 1048 MPa, were performed at friction time of 8.86 sec, upset time of 2.22 sec, friction pressure of 29.36 bar, upset pressure of 59.25 bar and rotational speed of 1259.58 rpm. The experimental values of the optimized condition exhibited tensile strength of welding joints of 1007 MPa. Comparison of the experimental values with those of the predicted values was almost identical with low percentage bias of tensile strength of welding joints of 3.91%. Therefore, the mathematical model has developed adequately describing ranges of the experimental parameters studied and provides a statistically accurate prediction of the optimum tensile strength of welding joints.

คำสำคัญ: สภาพที่เหมาะสม การออกแบบการทดลอง วิธีพื้นผิวตอบสนอง การเชื่อมด้วยความเสียดทาน

Keywords: Optimal conditions, Experimental design, Response surface methodology, Friction welding

1. บทนำ

ในปัจจุบันเหล็กกล้าคาร์บอนได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาใช้สำหรับผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตชิ้นส่วนของยานยนต์ และบ่อยครั้งที่พบว่าความเสียหายของชิ้นส่วนต่างๆเกิดขึ้นบริเวณที่เป็นรอยเชื่อมต่อ ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Tensile strength of welding joints) นั้นเอง ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนนั้นกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม (Shield metal arc welding, SMAW) เป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้กันมากที่สุดในขณะนี้ โดยกระบวนการเชื่อมดังกล่าวมีหลักการทำงานคืออาศัยการอาร์คกันระหว่างชิ้นงานที่จะเชื่อมกับลวดเชื่อมผ่านช่องว่างของอากาศทำให้เกิดความร้อนขึ้นบริเวณนั้น ความร้อนดังกล่าวจะทำให้เกิดการหลอมละลายและหยดลงในรอยต่อของแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามลักษณะของการเชื่อมวิธีนี้เป็นเหมือนกับการพอกผิวด้านนอกของรอยเชื่อมจึงทำให้การต่อติคของชิ้นงานที่นำมาเชื่อมทำได้ไม่ทั่วถึงกันทั้งหน้าสัมผัส (1) ซึ่งจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยนั่นเอง ทั้งนี้หากต้องการคุณภาพของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่สูงด้วยวิธีการเชื่อมแบบนี้ ก็จะต้องอาศัย

ช่างเชื่อมที่มีทักษะและความชำนาญในการเชื่อมสูง รวมถึงต้องคำนึงถึงชนิดของลวดเชื่อมที่นำมาเชื่อมด้วย ดังนั้นหากพิจารณาโดยให้ความสำคัญกับค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมการพัฒนาเทคนิคหรือกระบวนการเชื่อมวิธีอื่นที่สามารถเชื่อมชิ้นงานให้ต่อติดได้ทั่วกันทั้งหน้าสัมผัสจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อนำกระบวนการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงมาใช้แทนทดกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

กระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทาน (Friction welding process) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของการเชื่อมที่ได้รับความนิยมสูงสำหรับนำมาใช้แทนกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อม ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถเชื่อมชิ้นงานได้ตลอดทั้งหน้าสัมผัส ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของรอยเชื่อมมีความแข็งแรงขึ้น นำไปสู่การลดความเสี่ยงต่อการเสียหายที่บริเวณรอยเชื่อมได้ โดยกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานมีหลักการคือความร้อนจากการเชื่อมจะเกิดขึ้นในรูปแบบของการเปลี่ยนรูปพลังงาน โดยการเปลี่ยนรูปของพลังงานกลไปเป็นพลังงานความร้อนที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดทานจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานและทำให้ชิ้นงานทั้งสองมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาสั้นๆ จากนั้นเมื่อให้แรง

กดอัดแก่ชิ้นงานก็จะทำให้ชิ้นงานเชื่อมติดกัน สำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นมีข้อดีหลายประการ เช่น ประหยัดวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม ใช้เวลาในการเชื่อมน้อยและรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นมีค่าความแข็งแรงสูง (2-4) นอกจากนี้ได้มีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจและทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานโดยการศึกษาดูตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม เช่น กรณีของการเชื่อมวัสดุที่เป็นชนิดเดียวกัน (Similar) หรือ วัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar) จากผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรดังต่อไปนี้ได้แก่ แรงดันในการเสียดทาน (Friction pressure) เวลาในการเสียดทาน (Friction time) แรงดันในการเชื่อม (Upset pressure) เวลาในการเชื่อม (Upset time) และความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงาน (Rotational speed) ส่วนเป็นตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานทั้งสิ้น (5-10) ทำให้การเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมเพื่อให้ได้คุณภาพของรอยเชื่อมที่สูงจึงเป็นขั้นตอนที่ทำให้ยาก ดังนั้นการหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ จึงมีความสำคัญต่อกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานเป็นอย่างมาก จึงต้องมีการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆเพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของแต่ละตัวแปรต่อค่าคุณภาพของรอยเชื่อม โดยทั่วไปในการหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานจะใช้วิธีการแบบดั้งเดิม (Conventional method) โดยเป็นการทดลองแบบปรับค่าตัวแปรทีละค่า (One factor at a time, OFAT) ซึ่งให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดหมายที่ต้องการได้ช้าและสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์ รวมไปถึงต้องเก็บข้อมูลจำนวนมากและไม่เหมาะกับกระบวนการที่มีอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยตนเอง จากข้อจำกัดต่างๆ ของวิธีการหาสภาวะที่เหมาะสมแบบดั้งเดิม สามารถหลีกเลี่ยงข้อจำกัดเหล่านั้นได้โดยวิธีการหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติ ซึ่งพบว่า

ในปัจจุบันได้มีการนำเอาวิธีการทางสถิติมาช่วยในการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Respond surface methodology, RSM) เป็นอีกหนึ่งวิธีของการหาค่าที่เหมาะสมที่ได้รับ ความสนใจและนิยมนำมาหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรในกระบวนการต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการทดลองและศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง พร้อมทั้งพัฒนาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และหาระดับของตัวแปรอิสระที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังให้ความแม่นยำของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่ในระดับที่น่าพอใจอีกด้วย (11, 12)

บทความนี้จึงเป็นการนำเสนอกระบวนการเชื่อมเหล็กคาร์บอนชนิด AISI 1015 ด้วยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการทำนายค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองโดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 ชิ้นงานทดลอง

วัสดุที่ใช้ทำเป็นชิ้นงานทดลอง (Specimen) สำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานในงานวิจัยนี้ได้แก่เหล็กกล้าคาร์บอนชนิด AISI 1015 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. ยาว 100 mm. ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) จากการทดสอบเท่ากับ 663 MPa และมีส่วนประกอบทางเคมี (Chemical composition) ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 (13)



รูปที่ 1 เหล็กกล้าคาร์บอนชนิด AISI 1015 ที่ใช้เป็นชิ้นงานสำหรับการเชื่อมด้วยความเสียดทานในการทดลอง

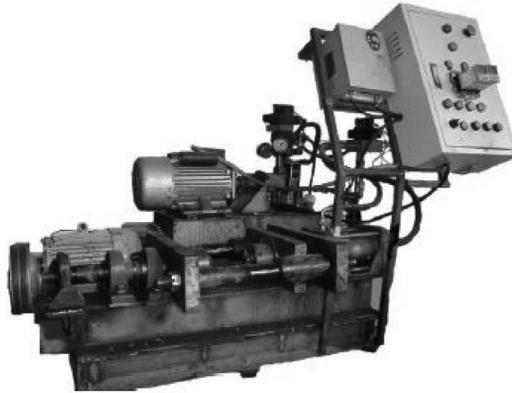
ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กคาร์บอนชนิด AISI 1015 ที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบทางเคมี	C	Mn	Si	P	S	Cr
% wt	0.15	0.47	0.17	0.03	0.01	0.01

2.2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน (Friction welding machine) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องเชื่อมที่คณะผู้วิจัยได้สร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีมอเตอร์ขนาด 5 Hp เป็นต้นกำลังในการหมุนชิ้นงานและใช้ระบบไฮดรอลิกส์ในการสร้างแรงดันสำหรับกดอัดชิ้นงานให้เกิดการเชื่อมกัน นอกจากนี้ยังมีมอเตอร์ขนาด 3 Hp

ใช้ขับปั๊มไฮดรอลิกส์ขนาดแรงดัน 100 bar ซึ่งเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานนี้ทำงานโดยใช้ระบบ Manual relief valves สำหรับปรับค่าแรงดันและใช้ Electric solenoid valve ในการควบคุมแรงดันของไฮดรอลิกส์ในช่วงต่างๆ ในส่วนของการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมนั้นใช้ Inverter ขนาด 7.5 Hp เพื่อควบคุมความเร็วรอบการทำงานของมอเตอร์



รูปที่ 2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (13)

2.3 การออกแบบการทดลอง

ในการศึกษานี้วิธีพื้นผิวทดสอบของถูกนำมาใช้สำหรับประเมินค่าของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ทั้งนี้เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่างๆ และหารูปแบบสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม ในส่วนของการออกแบบการทดลองนั้น วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-behnken ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลอง ซึ่งในการออกแบบการทดลองแบบ Box-behnken สามารถหาเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด (n) ได้จากสมการ $n = 2k(k-1) + C_0$ เมื่อ k คือจำนวนตัวแปรอิสระที่ทำการ

ศึกษาและ C_0 คือจำนวน Center point ดังนั้นในการทดลองนี้จึงมีจำนวนการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆ ทั้งหมด 46 การทดลอง ทั้งนี้การออกแบบการทดลองดังกล่าวจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert[®] รุ่น 8.0.7.1 (Stat Ease, USA) เป็นตัวช่วยในการออกแบบการทดลอง นอกจากนี้ได้กำหนดระดับของตัวแปรไว้ 3 ระดับคือระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาในการเชื่อมเหล็กคาร์บอนชนิด AISI 1015 ด้วยความเสียดทานมีด้วยกันทั้งหมด 5 ตัวแปรประกอบด้วย เวลาในการเสียดทาน (T_1) เวลาในการอัด (T_2) ความดันในการเสียดทาน (P_1) ความดันในการอัด (P_2) และความเร็วรอบในการหมุน (N) ซึ่งมีผลตอบสนองคือ

ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม และได้กำหนดช่วงของตัวแปรต่างๆดังนี้ เวลาในการเสียดทานมีค่าระหว่าง 8-12 sec เวลาในการอัดมีค่าระหว่าง 2-4 sec ความดันในการเสียดทานมีค่าระหว่าง 10-30 bar ความดันในการอัดมีค่าระหว่าง 40-60 bar และความเร็วรอบในการหมุนขึ้น

งานมีค่าระหว่าง 1200-1400 rpm ทั้งนี้ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้มาจากการศึกษาในเบื้องต้นและจากงานวิจัยที่ผ่านมา (1, 13, 14) โดยมีรายละเอียดและระดับของตัวแปรดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษาในการออกแบบการทดลองแบบ Box-benhken

ตัวแปร/สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับ		
		-1 (ต่ำ)	0 (กลาง)	+1(สูง)
เวลาในการเสียดทาน (T_1)	sec	8	10	12
เวลาในการอัด (T_2)	sec	2	3	4
ความดันในการเสียดทาน (P_1)	bar	10	20	30
ความดันในการอัด (P_2)	bar	40	50	60
ความเร็วรอบในการหมุน (N)	rpm	1200	1300	1400

2.4 วิธีการทดลอง

การเชื่อมชิ้นงานทดลองในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจะเชื่อมชิ้นงานทดลองได้แก่เหล็กคาร์บอนชนิด AISI 1015 ตามขนาดที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.1 ให้เชื่อมติดกันตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 3 จำนวนทั้งสิ้น 46 ชุดการทดลอง หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานทดลองที่เชื่อมตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลองไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่อไป

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลผลการทดลองจากตารางที่ 3 ซึ่งได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Box-behnken จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนองด้วยสมการพหุนามกำลังสอง (Second-order polynomial equation) ซึ่งจะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนอง (ความแข็งแรงของรอยเชื่อม) ที่ได้จากการทำนายและค่าตัวแปรอิสระของกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานโดยที่สมการพหุนามกำลังสองดังกล่าวแสดงได้ตามสมการที่ 1

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i>j}^k \sum_j^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ ค่าผลตอบสนอง (ความแข็งแรงของรอยเชื่อม) $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$ และ β_{ij} คือ ค่าคงที่, สัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังหนึ่ง, สัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังสองและสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรร่วมตามลำดับ X_i และ X_j คือ ตัวแปรอิสระ และ k คือจำนวนตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert[®] สำหรับการวิเคราะห์สมการถดถอยและสร้างกราฟฟิคของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะประเมินด้วยการทดสอบค่าความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ความเหมาะสมและความเพียงพอของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ในขณะที่นัยสำคัญทางสถิติแต่ละพจน์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะประเมินด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) และการหาค่าสถานะที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรจะใช้การแก้ปัญหาจากสมการถดถอยและการวิเคราะห์ด้วยกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface plot)

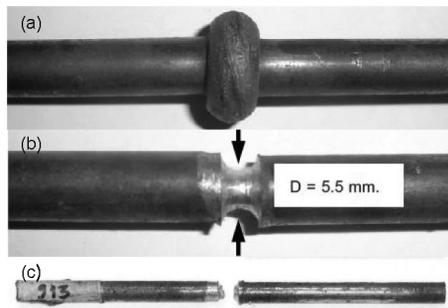
ตารางที่ 3 แผนการทดลองและผลของค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่สภาวะต่างๆ

การทดลองที่	ตัวแปร					ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม (MPa)
	T ₁ (sec)	T ₂ (sec)	P ₁ (bar)	P ₂ (bar)	N(rpm)	
1	8.00	2.00	20.00	50.00	1300.00	861.33
2	12.00	2.00	20.00	50.00	1300.00	830.56
3	8.00	4.00	20.00	50.00	1300.00	890.31
4	12.00	4.00	20.00	50.00	1300.00	812.39
5	10.00	3.00	10.00	40.00	1300.00	778.27
6	10.00	3.00	30.00	40.00	1300.00	818.21
7	10.00	3.00	10.00	60.00	1300.00	758.18
8	10.00	3.00	30.00	60.00	1300.00	954.53
9	10.00	2.00	20.00	50.00	1200.00	790.44
10	10.00	4.00	20.00	50.00	1200.00	795.84
11	10.00	2.00	20.00	50.00	1400.00	810.40
12	10.00	4.00	20.00	50.00	1400.00	851.32
13	8.00	3.00	10.00	50.00	1300.00	736.29
14	12.00	3.00	10.00	50.00	1300.00	798.47
15	8.00	3.00	30.00	50.00	1300.00	969.61
16	12.00	3.00	30.00	50.00	1300.00	788.25
17	10.00	3.00	20.00	40.00	1200.00	821.79
18	10.00	3.00	20.00	60.00	1200.00	811.06
19	10.00	3.00	20.00	40.00	1400.00	856.05
20	10.00	3.00	20.00	60.00	1400.00	752.94
21	10.00	2.00	10.00	50.00	1300.00	729.56
22	10.00	4.00	10.00	50.00	1300.00	727.38
23	10.00	2.00	30.00	50.00	1300.00	895.20
24	10.00	4.00	30.00	50.00	1300.00	881.73
25	8.00	3.00	20.00	40.00	1300.00	816.25
26	12.00	3.00	20.00	40.00	1300.00	803.16
27	8.00	3.00	20.00	60.00	1300.00	890.45
28	12.00	3.00	20.00	60.00	1300.00	836.93
29	10.00	3.00	10.00	50.00	1200.00	723.27
30	10.00	3.00	30.00	50.00	1200.00	790.28
31	10.00	3.00	10.00	50.00	1400.00	766.32
32	10.00	3.00	30.00	50.00	1400.00	763.8
33	8.00	3.00	20.00	50.00	1200.00	814.74
34	12.00	3.00	20.00	50.00	1200.00	777.41
35	8.00	3.00	20.00	50.00	1400.00	783.28
36	12.00	3.00	20.00	50.00	1400.00	805.43
37	10.00	2.00	20.00	40.00	1300.00	739.01
38	10.00	4.00	20.00	40.00	1300.00	794.9
39	10.00	2.00	20.00	60.00	1300.00	931.77
40	10.00	4.00	20.00	60.00	1300.00	814.45
41	10.00	3.00	20.00	50.00	1300.00	743.15
42	10.00	3.00	20.00	50.00	1300.00	744.1
43	10.00	3.00	20.00	50.00	1300.00	742.87
44	10.00	3.00	20.00	50.00	1300.00	742.35
45	10.00	3.00	20.00	50.00	1300.00	743.22
46	10.00	3.00	20.00	50.00	1300.00	743.1

2.6 การวัดค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม

ชิ้นงานทดลองเมื่อเชื่อมด้วยความเสียดทานตามเงื่อนไขต่างๆของการออกแบบการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้วจะถูกนำไปหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งในงานวิจัยนี้วัดค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่อง Tensile test ยี่ห้อ TORSEE รุ่น ACR-200-30P (Tokyo Testing Machine, Japan) โดยมีขั้นตอนในการทดสอบคือ เมื่อเชื่อมชิ้นงานทดลองโดยเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานเสร็จแล้ว ชิ้นงานทดลองที่ถูกเชื่อมติดกันดังแสดง

ในรูปที่ 3(a) จะถูกนำไปกลึงเอาเศษโลหะที่ถูกดันจากกระบวนการเชื่อมออกและนำไปกลึงเพื่อกำหนดจุดขาดในการทดสอบค่าความแข็งแรงจากการดึงโดยให้จุดขาดของชิ้นงานทดลองตรงกับรอยเชื่อม ทั้งนี้ในการกลึงเพื่อกำหนดจุดขาดของชิ้นงานทดลองนั้นจะทำการกลึงให้ชิ้นงานทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตรงรอยบากมีค่า 5.5 mm. ดังแสดงในรูปที่ 3(b) จากนั้นจึงนำชิ้นงานทดลองไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงด้วยเครื่อง Tensile test โดยชิ้นงานทดลองจะถูกดึงให้ขาดออกจากกันตรงบริเวณรอยเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3(c)



รูปที่ 3 (a) ลักษณะรอยเชื่อมของชิ้นงานจากการเชื่อมเสียดทาน (b) ชิ้นงานก่อนการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม และ (c) ชิ้นงานหลังการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 สมการถดถอยและการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองเพื่อหารูปแบบสมการที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ได้แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือการวิเคราะห์การแสดงผลการคำนวณเชิงลำดับ (Sequential sums of squares) และการวิเคราะห์ผลสรุปทางสถิติของแบบจำลอง (Model summary statistic) จากผลการวิเคราะห์การแสดงผลการคำนวณเชิงลำดับในตารางที่ 4 พบว่ารูปแบบเชิงเส้น (Linear), กำลังสอง (Quadratic) และกำลังสาม (Cubic) ได้รับความยอมรับให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้เนื่องจากค่า P-value ของรูปแบบสมการทั้งสามมีค่า

น้อยกว่า 0.05 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่การวิเคราะห์ผลสรุปทางสถิติของแบบจำลอง เพื่อยืนยันว่ารูปแบบสมการใดเป็นรูปแบบสมการที่เหมาะสม โดยประเมินที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแต่ละรูปแบบสมการเปรียบเทียบกัน จากตารางที่ 4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของตัวแบบจำลองแบบกำลังสามมีค่าสูงที่สุดรองลงมาเป็นแบบกำลังสองโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9716 และ 0.8064 ตามลำดับ จะเห็นว่าตัวแบบจำลองแบบกำลังสามเป็นรูปแบบสมการที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ แต่ข้อมูลจากการวิเคราะห์ที่มีข้อความเตือนเกี่ยวกับการเป็นคู่แฝดแปลง (aliased) ในรูปแบบกำลังสามซึ่งแสดงให้เห็นว่าการออกแบบการทดลองแบบ Box-behnken มีการทำการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดแบบจำลองแบบกำลังสามได้ (15) จึงเลือกรูปแบบตัวแบบจำลองที่มี

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจรองลงมานี้ก็คือรูปแบบกำลังสอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองแบบกำลังสอง (Quadratic model) ดังแสดงในสมการที่ 1 มีความเหมาะสมสำหรับเป็นตัวแทนจำลองที่จะใช้ในการทำนายค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็กคาร์บอนชนิด AISI 1015 และผลการทดลองในตารางที่ 3 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการถดถอยเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ กับค่าผลตอบสนองหลังจากตัดตัวแปรที่ไม่มีความสำคัญทางสถิติออกไปแล้วจะได้รูปแบบสมการการถดถอยที่เหมาะสมดังแสดงในสมการที่ 2

$$Y = 743.13 - 19.35T_1 + 52.74P_1 + 20.17P_2 - 60.89T_1P_1 - 43.30T_2P_2 + 39.10P_1P_2 + 51.10T_1^2 + 46.24T_2^2 + 23.14P_1^2 + 48.02P_2^2 \quad (2)$$

ในการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนสำหรับใช้ในการตรวจสอบความเหมาะสมและความเพียงพอของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น ได้ควบคุมระดับความน่าเชื่อถือไว้ที่ 95% โดยผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนในงานวิจัยนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 จากตารางที่ 5 เมื่อใช้ *F*-test ตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการที่ 2 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีความสำคัญทางสถิติ (Highly significant) ซึ่งจะเห็นได้จากค่า *P*-value ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.001 แต่เมื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากค่าความสมรูป (Lack of fit) กลับพบว่าไม่เหมาะสมกับรูปแบบเชิงเส้นตรงและเส้นโค้งอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่า *P*-value น้อยกว่า 0.05 อย่างไรก็ตามในส่วนของคุณภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งประเมินได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8064 แสดงให้เห็นว่า 80.64% ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถเข้ากันได้กับข้อมูลที่ได้จากการ

ทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และยังบ่งบอกว่าผลของค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ได้เป็นผลหรือมีอิทธิพลจากตัวแปร 80.64% ส่วนอีก 19.36% เป็นผลมาจากตัวแปรอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูงๆ ความแม่นยำในการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการทำนายผลลัพธ์ก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้โดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงขนาดที่เหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีก็ควรจะมียุทธศาสตร์การตัดสินใจเข้าใกล้ 1 มากที่สุดในทำนองเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ ($Adj. R^2$) ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตารางที่ 5 พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.651 ซึ่งมากกว่า 0.64 (ค่ากำหนดต่ำสุดของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควรจะมียุทธศาสตร์การตัดสินใจ) จึงเป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมนั่นเอง และเมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทำนาย ($Pred. R^2$) ซึ่งโดยปกติควรจะมียุทธศาสตร์การตัดสินใจไม่เกิน 0.25 ทั้งนี้ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทำนายมีค่าเกินกว่านี้ก็แสดงว่าข้อมูลอาจมีปัญหาการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่จากตารางที่ 5 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทำนายที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.225 ซึ่งมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดจึงแสดงว่าข้อมูลไม่มีปัญหาการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of variation, CV) พบว่ามีค่าค่อนข้างต่ำคือมีค่าเท่ากับ 4.45% แสดงให้เห็นว่าผลสรุปความสมรูปของแบบจำลองนั้นมีความน่าเชื่อถือและเป็นตัวบ่งบอกว่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายโดยสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าความแตกต่างกันน้อยมาก

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานโดยวิธีออกแบบการทดลองแบบ Box-benhken

Sequential Model Sum of Squares						
Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value	
Mean vs Total	2.991×10 ⁷	1	2.991×10 ⁷			
Linear vs Mean	57294.20	5	11458.84	4.21	0.0036	
2FI vs Linear	33982.68	10	3398.27	1.36	0.2440	
Quadratic vs 2FI	42617.20	5	8523.44	6.63	0.0005	Suggested
Cubic vs Quadratic	27424.23	15	1828.28	3.87	0.0180	Aliased
Residual	4720.33	10	472.03			
Total	2.998×10 ⁷	46	6.516×10 ⁵			

Model Summary Statistics						
Source	SD	R ²	Adj. R ²	Pred. R ²	PRESS	Remark
Linear	52.14	0.3451	0.2632	0.1459	1.418×10 ⁵	
2FI	49.92	0.5497	0.3246	-0.0016	1.663×10 ⁵	
Quadratic	35.86	0.8064	0.6515	0.2256	1.286×10 ⁵	Suggested
Cubic	21.73	0.9716	0.8721	-0.8189	3.020×10 ⁵	Aliased

ตารางที่ 5 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนอง

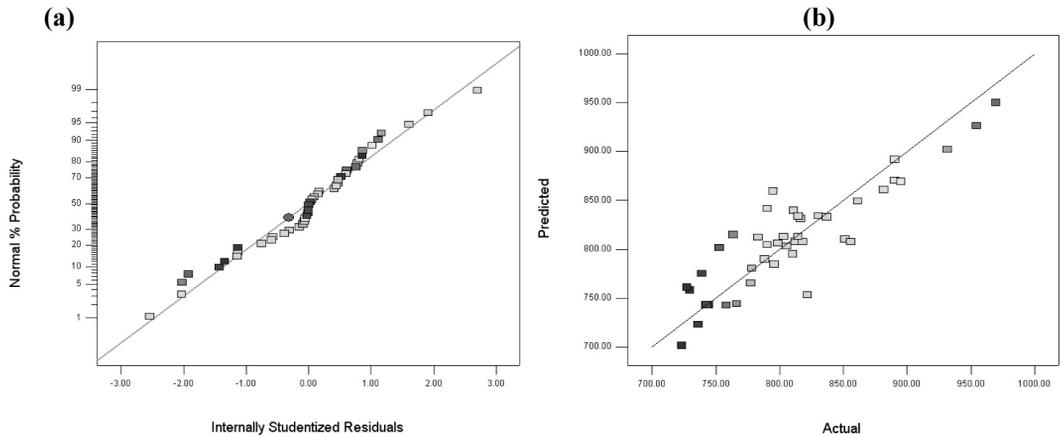
Source	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean squares	F-value	P-value
Model	1.339×10 ⁵	20	6694.70	5.21	<0.0001
Residual	32144.56	25	1285.78		
Lack of fit	32142.94	20	1607.15	4941.16	<0.0001
Pure error	1.63	5	0.33		
Corrected total	1.66×10 ⁵	45			

CV = 4.45%, R² = 0.8064, Adj. R² = 0.651, Pred. R² = 0.225

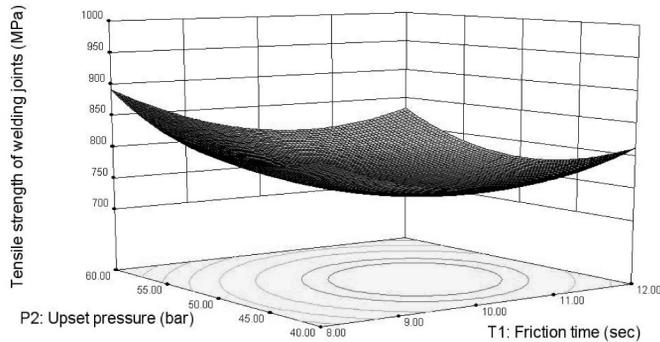
ในส่วนของการวิเคราะห์ห้ำมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรนั้นเป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีอิทธิพลหรือไม่ต่อค่าตัวแปรตอบสนอง โดยที่ค่าห้ำมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระในแต่ละพจน์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณหาได้จากโปรแกรม Design Expert[®] ซึ่งนัยสำคัญทางสถิติของค่าห้ำมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวหาได้จากค่า *P*-value รายละเอียดได้แสดงไว้ในตารางที่ 6 จากตารางที่ 6 เมื่อพิจารณาในส่วนของพจน์เชิงเส้น (Linear terms) พบว่าตัวแปรอิสระได้แก่ เวลาในการเสียดทาน (T_1) ความดันในการเสียดทาน (P_1) และความดันในการอัด (P_2) มีค่า *P*-value เท่ากับ 0.0406, 0.0001 และ 0.0335 ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรอิสระในพจน์ที่กล่าวมาทั้งหมดมีค่า *P*-value < 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระดังกล่าวมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ได้ ในขณะที่เมื่อพิจารณาในส่วนพจน์อิทธิพลร่วม (Interaction terms) พบว่าค่า *P*-value ของตัวแปรอิสระได้แก่ พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการเสียดทานกับความดันในการเสียดทาน (T_1P_1) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการอัดกับความดันในการอัด (T_2P_2) และพจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความดันในการเสียดทานกับความดันในการอัด (P_1P_2) มีค่าเป็น 0.0023, 0.0234 และ 0.0388 ตามลำดับ แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระดังกล่าวเป็นไปอย่างมีนัยสำคัญ สุดท้ายพิจารณาในส่วนพจน์กำลังสอง (Square terms) จะเห็นว่าค่า *P*-value ของตัวแปรอิสระดังต่อไปนี้คือ พจน์กำลังสองของเวลาในการเสียดทาน (T_1^2) พจน์กำลังสองของเวลาในการอัด (T_2^2) และพจน์กำลังสองของความดันในการอัด (P_2^2) มีค่า *P*-value < 0.05 โดยมีค่าเป็น 0.0003, 0.0008 และ 0.0006 ตามลำดับ แสดงว่าตัวแปรอิสระเหล่านี้มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

นั่นเอง ในขณะที่ตัวแปรอิสระในพจน์อื่นๆ ได้แก่ เวลาในการอัด (T_2) ความเร็วในการหมุน (N) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการเสียดทานกับเวลาในการอัด (T_1T_2) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการเสียดทานกับความดันในการอัด (T_1P_2) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการเสียดทานกับความเร็วในการหมุน (T_1N) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการอัดกับความเร็วในการเสียดทาน (T_2P_1) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาในการอัดกับความเร็วในการหมุน (T_2N) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความดันในการเสียดทานกับความเร็วในการหมุน (P_1N) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความดันในการอัดกับความเร็วในการหมุน (P_2N) พจน์กำลังสองของความดันในการเสียดทาน (P_1^2) และพจน์กำลังสองของความเร็วในการหมุน (N^2) มีค่า *P*-value > 0.05 ซึ่งทำให้ตัวแปรอิสระในพจน์ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 4(a) แสดงการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบค่าส่วนตกค้างปกติ พบว่าข้อมูลค่าความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability) มีลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเส้นตรงและใกล้เคียงกับค่าของเส้นตรง จึงสรุปได้ว่ามีการแจกแจงแบบปกติเป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนายและไม่มีชุดการทดลองที่แสดงค่าความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะเมื่อพิจารณารูปที่ 4(b) ซึ่งเป็นการอธิบายถึงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ได้จากการทดลอง (Actual) และค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted) จากรูปที่ 4(b) จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ได้จากการทำนายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มของทิศทางความสอดคล้องกันโดยมีค่าต่างกันไม่เกิน 10% และมีแนวโน้มเข้าใกล้กับแนวของเส้นทแยงมุม ซึ่งบ่งบอกว่าช่วงของตัวแปรอิสระที่เลือกมาในการศึกษานี้มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับค่าห้ำมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีค่าถึง 0.8064



รูปที่ 4 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้าง (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ได้จากการทดลองและจากการทำนาย



รูปที่ 5 อิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและความดันในการอัดต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม (เวลาในการอัด 3 sec, ความดันในการเสียดทาน 20 bar, ความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงาน 1300 rpm)

3.2 อิทธิพลของตัวแปรต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ 2) สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนองเพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 จากรูปที่ 5 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและความดันในการอัดต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยกำหนดให้ระดับของเวลาในการอัด ความดันในการเสียดทานและความเร็วในการหมุนอยู่ที่ระดับกลาง พบว่าการเพิ่มขึ้นของความ

ดันในการอัดมีผลทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดันในการอัดมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม ดังจะเห็นได้จากค่า *P*-value จากตารางที่ 6 ที่มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่เวลาในการเสียดทานกลับพบว่า การเพิ่มขึ้นของเวลาในการเสียดทานมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมไม่มากนัก โดยที่ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 890 MPa เมื่อความดันในการอัดเท่ากับ 60 bar และเวลาในการเสียดทานมีค่าเท่ากับ 8.3 sec

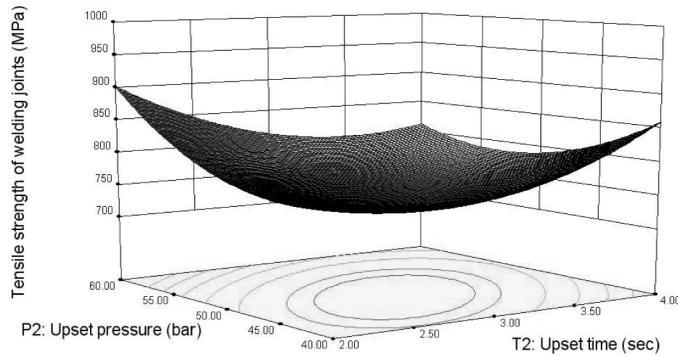
ตารางที่ 6 แสดงค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย

Source	Coefficients	Standard error	P-value
intercept	743.13	14.64	
T ₁	-19.35	8.96	0.0406
T ₂	-1.25	8.96	0.8905
P ₁	52.74	8.96	<0.0001
P ₂	20.17	8.96	0.0335
N	4.04	8.96	0.6558
T ₁ T ₂	-11.79	17.93	0.5169
T ₁ P ₁	-60.89	17.93	0.0023
T ₁ P ₂	-10.11	17.93	0.5779
T ₁ N	14.87	17.93	0.4147
T ₂ P ₁	-2.88	17.93	0.8762
T ₂ P ₂	-43.30	17.93	0.0234
T ₂ N	8.88	17.93	0.6247
P ₁ P ₂	39.10	17.93	0.0388
P ₁ N	-17.38	17.93	0.3416
P ₂ N	-23.09	17.93	0.2095
T ₁ ²	51.10	12.14	0.0003
T ₂ ²	46.24	12.14	0.0008
P ₁ ²	23.14	12.14	0.0682
P ₂ ²	48.02	12.14	0.0006
N ²	9.39	12.14	0.4464

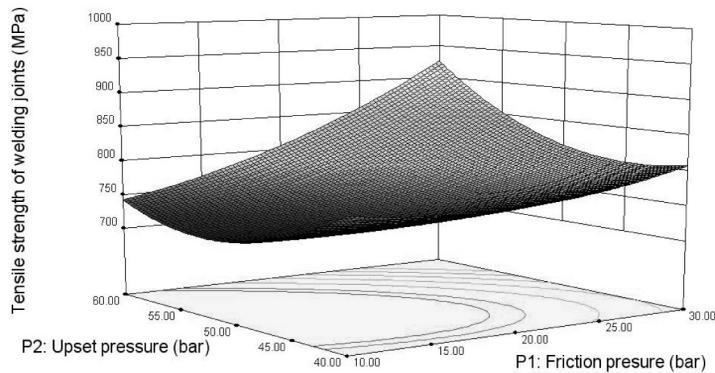
รูปที่ 6 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของเวลาในการอัดและความดันในการอัดต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยกำหนดให้ระดับของเวลาในการเสียดทาน ความดันในการเสียดทานและความเร็วในการหมุนอยู่ที่ระดับกลาง จากกราฟเมื่อพิจารณาที่ค่าความดันในการอัดจะเห็นว่าเมื่อความดันในการอัดมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาที่เวลาในการอัดพบว่าการเพิ่มขึ้นของเวลาในการอัดมีผลไม่มากนักต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม จึงทำให้ที่เวลาในการอัดต่ำที่ 2.3 sec จะให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นและจะลดลงในช่วงเวลาในการอัดระหว่าง 2.5 sec ถึง 3 sec จากนั้นค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมก็จะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเวลาในการอัดเพิ่มจาก 3 sec ไปจนถึง 4 sec โดยที่ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 900 MPa ที่ความดันในการ

อัดมีค่า 60 bar และเวลาในการอัดมีค่าเท่ากับ 2.3 sec

รูปที่ 7 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของความดันในการเสียดทานและความดันในการอัดต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยกำหนดให้ระดับของเวลาในการเสียดทาน เวลาในการอัดและความเร็วในการหมุนอยู่ที่ระดับกลาง จากกราฟพบว่าการเพิ่มขึ้นของความดันในการเสียดทานและความดันในการอัดมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ระดับของตัวแปรทั้งสองที่ค่าสูงๆ จะให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลปฏิสัมพันธ์ (Interaction effect) ระหว่างตัวแปรคือความดันในการเสียดทานและความดันในการอัด โดยที่ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 920 MPa เมื่อความดันในการเสียดทานเท่ากับ 60 bar และความดันในการอัดเท่ากับ 30 bar



รูปที่ 6 อิทธิพลของเวลาในการอัดและความดันในการอัดต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม (เวลาในการเสียดทาน 10 sec, ความดันในการเสียดทาน 20 bar, ความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงาน 1300 rpm)



รูปที่ 7 อิทธิพลของความดันในการเสียดทานและความดันในการอัดต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม (เวลาในการเสียดทาน 10 sec, เวลาในการอัด 3 sec, ความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงาน 1300 rpm)

3.3 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมมากที่สุดโดยการนำสมการถดถอยกำลังสอง (สมการที่ 2) มาคำนวณหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมภายใต้เงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่าค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดจากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทาน เหล็กคาร์บอนชนิด AISI 1015 คือ เวลาในการเสียดทานเท่ากับ 8.86 sec เวลาในการอัดเท่ากับ 2.22 sec ความดันในการเสียดทานเท่ากับ 29.36 bar ความดันในการอัดเท่ากับ 59.25 bar และความเร็วรอบในการหมุนเท่ากับ 1259.58 rpm โดยให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมจาก

การทำนายเท่ากับ 1048 MPa

3.4 การยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ 2) ว่าสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาใช้ในการทำนายค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมได้หรือไม่ จึงได้นำสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมด้วยความเสียดทานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3 ไปทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานจริง ซึ่งได้ทำการทดลองซ้ำจำนวนทั้งสิ้น 3 ครั้งการทดลอง พร้อมทั้งได้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนายของสมการถดถอยเพื่อยืนยันผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 8 จากผลการ

ทดลองเพื่อยืนยันผลจะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1007 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ได้จากการทำนายคือ 1048 MPa นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ค่าอคติพบว่ามีค่าเป็น 3.91% ซึ่งค่าอคติที่ยอมรับได้ไม่ควรมากเกิน 5% แสดงให้เห็นว่าสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความ

เสียดทานที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือและอนุมานได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 2 เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ทำนายค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมจากการเชื่อมเหล็กคาร์บอนชนิด AISI 1015 ด้วยความเสียดทาน

ตารางที่ 7 การกำหนดเกณฑ์ของระดับตัวแปรที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพื่อวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสม

ตัวแปร	เป้าหมาย	ระดับต่ำ	ระดับสูง
เวลาในการเสียดทาน (Sec)	อยู่ในเกณฑ์	8	12
เวลาในการอัด (Sec)	อยู่ในเกณฑ์	2	4
ความดันในการเสียดทาน (bar)	อยู่ในเกณฑ์	10	30
ความดันในการอัด (bar)	อยู่ในเกณฑ์	40	60
ความเร็วรอบในการหมุน (rpm)	อยู่ในเกณฑ์	1200	1400
ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม (MPa)	มากที่สุด	723.27	969.61

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายภายใต้สถานะที่เหมาะสม

เงื่อนไขที่เหมาะสม	ความแข็งแรงของรอยเชื่อม (MPa)		ค่าอคติ ² (Bias)
	ค่าที่ได้จากการทดลอง ¹	ค่าที่ได้จากแบบจำลอง	
เวลาในการเสียดทาน (sec)	8.86		
เวลาในการอัด (sec)	2.22		
ความดันในการเสียดทาน (bar)	29.36	1007	1048
ความดันในการอัด (bar)	59.25		
ความเร็วรอบในการหมุน (rpm)	1259.58		

¹ ค่าที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยจำนวน 3 ครั้งการทดลอง

² Bias คำนวณได้จาก [(ค่าที่ได้จากการทำนาย-ค่าที่ได้จากการทดลอง)/ค่าที่ได้จากการทำนาย] × 100

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าวิธีพื้นผิวตอบสนองและการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายและหาค่าสถานะที่เหมาะสมของตัวแปรในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานของ

เหล็กคาร์บอนชนิด AISI 1015 ได้เป็นอย่างดี จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 ได้แก่ เวลาในการเสียดทาน (T_1) ความดันในการเสียดทาน (P_1) และความดันในการอัด (P_2) โดยสถานะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็กคาร์บอนชนิด AISI 1015 คือ

เวลาในการเสียดทานเท่ากับ 8.86 sec เวลาในการอัดเท่ากับ 2.22 sec ความดันในการเสียดทานเท่ากับ 29.36 bar ความดันในการอัดเท่ากับ 59.25 bar และความเร็วรอบในการหมุนเท่ากับ 1259.58 rpm ซึ่งทำให้ได้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเท่ากับ 1048 MPa และจากการทำการทดลองซ้ำของสภาวะที่เหมาะสมเพื่อยืนยันผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 3 ครั้งการทดลองพบว่าได้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมเฉลี่ยเท่า 1007 MPa ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถทำนายค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงและสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้งานจริงได้ อย่างไรก็ตามจากการนำสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปทดลองเชื่อมจริงอาจทำให้เกิดความยุ่งยากในการปรับค่าของตัวแปรต่างๆ อันเนื่องมาจากขีดจำกัดด้านความละเอียดของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน จึงแนะนำให้ปรับค่าสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ ให้อยู่ในระดับที่เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถทำงานได้ โดยให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุดตามหลักคณิตศาสตร์ คือเวลาในการเสียดทานเท่ากับ 9 sec เวลาในการอัดเท่ากับ 2.5 sec ความดันในการเสียดทานเท่ากับ 30 bar ความดันในการอัดเท่ากับ 60 bar และความเร็วรอบในการหมุนเท่ากับ 1260 rpm ซึ่งก็จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายเช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Arayangkun S, Bootarawong A, Thinwongpituk C. A study of properties of round steel rod joints welded by friction welding. J Sci Technol UBU. 2009;11(1):83-98. Thai.
- (2) Meshram SD, Mohandas T, Reddy GM. Friction welding of dissimilar pure metals. J Mater Process Tech. 2007;184(1-3):330-7.
- (3) Sahin M. Evaluation of the joint - interface properties of austenitic - stainless steels (AISI304) joined by friction welding. Mater Design. 2007;28:2244-50.
- (4) Jayabharath K, Ashfaq M, Venugopal P, Achar DRG. Investigations on the continuous drive friction welding of sintered powder metallurgical (P/M) steel and wrought copper parts. Mater Sci Eng: A. 2007;454-455(0):114-23.
- (5) Ates H, Turker M, Kurt A. Effect of friction pressure on the friction-welded MA956 iron-based superalloy. Mater Design. 2007;28:948-53.
- (6) Li WY, Ma TJ, Yang SQ, Xu QZ, Zhang Y, Li JL, et al. Effect of friction time on flash shape and axial shortening of linear friction welded 45 steel. Mater Lett. 2008;62(2):293-6.
- (7) Hascalik A, Orhan N. Effect of particle size on the friction welding of Al₂O₃ reinforced 6160 Al alloy composite and SAE 1020 steel. Mater Design. 2007;28(1):313-7.
- (8) Noh MZ, Hussain LB, Ahmad ZA. Alumina - mild steel friction welded at lower rotational speed. J Mater Process Tech. 2008;204:279-83.
- (9) Uwaba T, Ukai S, Nakai T, Fujiwara M. Properties of friction welds between 9Cr-ODS martensitic and ferritic-martensitic steels. J Nucl Mater. 2007;367-370, Part B(0):1213-7.

- (10) Shin H-S, Jeong Y-J, Choi H-Y, Kato H, Inoue A. Joining of Zr-based bulk metallic glasses using the friction welding method. *J Alloy Compd.* 2007;434-435(0):102-5.
- (11) Chutima P. *Experimental design of engineering*: Chulalongkorn University Press; 2002. Thai.
- (12) Chanphong S, Tangjitsitcharoen S. Surface roughness prediction in turning process by utilizing response surface method. *Proceedings of the Industrial Engineering Network Conference*; 2011 Oct 20-21. Thai.
- (13) Chooppava C, Thinvongpituk C. The influence of friction time and rotational speed on the strength of AISI 1015 steel rods welded by friction welding. *J Sci Technol UBU.* 2011;13(1):73-81. Thai.
- (14) Chooppava C, Thinvongpituk C. Influence of friction time on the strength of AISI 1015 steel rods welded by friction welding. *UBU En J.* 2010;3(2):17-24. Thai.
- (15) Saikaew C, Chillapat N. Experimental design for product and process improvement: an application in bottle glass crushing machine. *KKU En J.* 2006;33(4):415-30. Thai.