Srinakharinwirot University Engineering Journal (2023) 18(2), 96-110 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 เดือน เมษายน – กันยายน พ.ศ. 2566

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมจุดของอลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ในอุตสาหกรรมยานยนต์

The Parameters Optimization for Spot-welding of 6061-T6 Aluminum Alloy in Automotive Industry

กวิน สนธิเพิ่มพูน* ชลลดา เรือนอินทร์ เดชฤทธิ์ กิติเดช ปริญญา ดวงจิตร์
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000
Kawin Sonthipermpooon* Chonlada Reanin Detrit Kitidet Prarinya Duanchit
[1]Industrial Engineering department, Faculty of Engineering, Naresuan University,
Tha Pho, Mueang Phitsanulok District, Phitsanulok 65000
*Corresponding author Email: sonawin@nu.ac.th
(Received: February 27, 2023; Revised: May 22, 2023; Accepted: June 20, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมแบบจุด (Spot Welding) ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมตัวถังรถยนต์ประสบปัญหาจากการเชื่อมแบบจุดเกี่ยวกับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมแบบจุด เพื่อให้ได้การเชื่อมที่มีคุณภาพและเป็นไปตามมาตรฐานสากลทางด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ การผลิตโดยทั่วไปใช้ประสบการณ์และการลองผิดลองถูกของผู้ปฏิบัติการและความชำนาญของผู้ปฏิบัติการในการปรับค่าพารามิเตอร์ แต่ค่าที่ได้ในการเชื่อมไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดและการปรับค่าพารามิเตอร์ในแต่ละเครื่องยังมีความยุ่งยากและมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมที่มีความซับซ้อน เช่น กระแสไฟฟ้า แรงกดจากหัวอิเล็กโทรด เวลาในการเชื่อม เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาทฤษฎี เพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมแบบจุด เพื่อสร้างชุดปฏิบัติการเชื่อมแบบจุด และทำการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลระดับ 2^k ให้ k = 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อม

ผลการวิจัยของการเชื่อมแบบจุดแสดงให้เห็นว่า เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงเฉือนและใช้เทียบกับค่ามาตรฐานยานยนต์จากมาตรฐาน JIS Z 3140 กำหนดความต้านทานแรงดึงเฉือนของอะลูมินัมอัลลอยความหนา 1.00 มิลลิเมตร ขั้นต่ำ 0.62 กิโลนิวตัน และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.92 กิโลนิวตัน ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมแบบจุด คือ กระแสไฟฟ้าที่ 17.50 กิโลแอมแปร์ เวลา 200 มิลลิวินาที และแรงกดที่หัวอิเล็กโทรด 591.50 เดคานิวตัน ซึ่งได้ค่าแรงดึงเฉือนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.76 กิโลนิวตัน เป็นค่าที่ทำให้จุดรอยเชื่อมแข็งแรงที่สุด

คำสำคัญ: ตัวแปรที่เหมาะสม การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล การเชื่อมแบบจุด 6061-T6 อะลูมิเนียมอัลลอย อุตสาหกรรมยานยนต์

ABSTRACT

The research objective is to determine optimum parameters for spot-welding in the automotive industry. At present, the auto body industry is facing the problem of spot-welding, in regard to spot welding parameter setting to achieve welds quality the production generally uses the experience of trial and error of the technician. The skill of technicians in adjusting parameters but the value used for welding is not always the ideal value. Adjusting the parameters for each machine is also difficult. There is also a complex factor involved in welding is current, force and time of welding etc. Therefore, from such problems. The research operator has studied the theory to understand the relationship of parameter adjustment in the spot-welding process. To create a set of spot-welding operations and perform experiments for optimal parameters. We can increase performance by designing a 2^k level factorial experiment k = 3 factors: current, time, pressure.

Experimental results of spot-welding, when the specimen is put to the shear tensile test it was compared with the standard of international vehicles from JIS Z 3140 standard. Shear tensile strength of aluminum alloy with a thickness of 1.00 mm, minimum 0.62 kN and the average value was 0.92 kN. The most suitable for spot-welding are the current at 17.50 kA, time 200 ms and the pressure at the electrode head 591.50 deka N, the mean shear tensile strength of 2.76 kN is the strength of the weld.

Keyword: Parameters optimization, Factorial design of experiment, Spot-welding, 6061-T6 Aluminum Alloy, Automotive Industry.

1. บทนำ

การเชื่อมแบบจุดในอุตสาหกรรมตัวถังรถยนต์ปัจจุบันนั้นยังประสบปัญหาจากการเชื่อมแบบจุดเกี่ยวกับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมแบบจุด เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพ ซึ่งการผลิตโดยทั่วไปจะใช้คู่มือประสบการณ์การลองผิดลองถูกของผู้ปฏิบัติงาน และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน ในการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ค่าที่ใช้ในการเชื่อมก็ไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดเสมอไป และการปรับค่าพารามิเตอร์แบบรายเครื่องยังมีความยุ่งยาก ถ้ามีการปรับไม่เหมาะสมจะทำให้การเชื่อมจุดไม่ติดกันตามมาตรฐานหรือโลหะทะลุ และยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมที่มีความซับซ้อน คือ กระแสไฟฟ้า แรงกดจากหัวอิเล็กโทรด เวลาในการเชื่อม เป็นต้นซึ่งเป็นเหตุให้ใช้เวลา พลังงานสูง ใช้ชิ้นงานตัวอย่างในการทดลองและยืนยันผลเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงมากในการปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่เหมาะสมคุณภาพ และยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตอีกด้วย [7] เช่น กระแสไฟที่ในการเชื่อมแบบจุดจะเลือกใช้กระแสไฟที่น้อยที่สุดแต่ชิ้นงานที่ได้สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานยานยนต์ได้ตั้งเอาไว้เพราะว่าจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าไฟฟ้าในบริษัทได้ การเลือกเวลาก็จะเลือกเวลาที่น้อยที่สุดเช่นกันเพราะจะสามารถช่วยลดเวลาในการทำงาน ทำให้ในแต่ละวันสามารถผลิตชิ้นส่วนของรถยนต์ได้มากยิ่งขึ้น

ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาทฤษฎีเพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมแบบจุด และทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อ การปรับปรุงคุณภาพของรอยเชื่อมให้ได้ตามมาตรฐาน และมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยกล่าวถึงทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องในการดำเนินการวิจัย การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมแบบจุด ด้วยอะลูมินัมอัลลอย 6061-T6 ขนาดความหนา 1.00 มม.

2. หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

ทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องในการดำเนินการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมแบบจุดด้วยอะลูมินัมอัลลอย 6061-T6 ขนาดความหนา 1.00 มิลลิเมตร [8] สามารถแบ่งทฤษฎีออกเป็นเรื่องต่าง ๆ ดังนี้

2.1. วัสดุอลูมิเนียม (Aluminum Material)

สัญลักษณ์ของอะลูมิเนียม คือ Al อะลูมิเนียมมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมในบรรยากาศน้ำทะเล ปิโตรเคมี และระบบเคมีอื่น ๆ ผิวของอะลูมิเนียมมีความสะท้อนแสงสูง มีความสะดวกในการผลิต อัตราความแข็งแกร่งต่อน้ำหนักสูง ใช้ในกระบวนการเชื่อมได้เป็นอย่างดี และค่าความต้านทานของการแตกหักมีอัตราสูง [1] การเลือกเกรดอะลูมิเนียมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของงาน และสภาวะการใช้งาน และเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมในปัจจุบัน และสมบัติทางกายรูปที่สำคัญของอะลูมิเนียม แสดงไว้ดังตารางที่ 1

อะลูมินัมอัลลอย คือ โลหะผสมชนิดที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนผสมหลักโดยที่ผสม แร่ธาตุอื่น ๆ ลงไปเพื่อสมบัติในการใช้งานที่หลากหลาย อะลูมินัมอัลลอย เกรด 6061 (Aluminum Alloy 6061) เป็นเกรดที่มีความแข็งสูง ทนการกัดกร่อนได้ดี มีสมบัติทางกลที่หลากหลาย ใช้งานได้หลากหลายประเภท และยังสามารถใช้งานกับความร้อนได้ด้วย (Heat Treatable)

2.2. การเชื่อมแบบจุด (Spot-Welding)

การเชื่อมแบบจุดคือการเชื่อมรูปแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยลักษณะการเชื่อมของชิ้นงานจะทำการเชื่อมแผ่นโลหะที่วางซ้อนทับกันในการเชื่อมนั้นจะทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านหัวอิเล็กโทรดหรือหัวทองแดงแล้วกดหัวอิเล็กโทรดลงบนแผ่นโลหะ ทำให้เกิดความร้อน ณ ช่วงเวลาหนึ่งจนแผ่นโลหะเกิดการหลอมละลายจนชิ้นงานประสานติดกัน ณ ตำแหน่งที่หัวอิเล็กโทรดกดลงบนชิ้นงาน โดยข้อดีของการเชื่อมแบบจุดจะทำให้ชิ้นงานไม่สูญเสียรูปร่าง อันตรายจากควันในการเชื่อมมีน้อย ประหยัดเวลาและพลังงานในการเชื่อม แต่ข้อจำกัดในการเชื่อมแบบจุดนั้น จะไม่สามารถใช้งานได้หลากหลายเหมือนการเชื่อมแบบชนิดอื่น ๆ และอุปกรณ์ของการเชื่อมแบบจุดมีราคาสูง

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายรูปของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ [1]

สัญลักษณ์	Al
หมายเลขอะตอม	13
ความถ่วงจำเพาะ	2.7 ก.ก. ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
โครงสร้างผลึก	FCC
จุดหลอมเหลว	660 องศาเซลเซียส
โมดูลัสยืดหยุ่น	69,000 เมกะปาสคาล (MPa)
สินแร่	บอกไซด์ (Bauxite)) (สารมลทินผสมระหว่าง Al_2O_3 และ $Al(OH)_3$
ธาตุผสม	ซิลิกอน (Si), ทองแดง (Cu), แมกนีเซียม (Mg), สังกะสี (Zn), แมงกานีส (Mn)
การใช้งาน	บรรจุภัณฑ์ อะลูมิเนียมแผ่นบาง ตัวนำไฟฟ้า หม้อ กระทะ ชิ้นส่วนโครงสร้าง ยานอวกาศ รถยนต์ หรือชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา

การเกิดความร้อนของรอยต่อการเชื่อมต้านทานแบบจุด [1] เกิดจากการนำกฎของโอห์มมาประยุกต์ใช้ เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำความต้านทานไฟฟ้าที่ยับยั้งการไหลผ่านของกระแสจะทำให้เกิดความร้อน (H) ที่สัมพันธ์กับกระแสเชื่อม (I) และความต้านทาน (R) โดยเป็นไปตามสูตรพื้นฐาน แสดงดังสมการ (1)

$$H = I^2R \quad (1)$$

เมื่อนำเวลาเข้ามาพิจารณาเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของสมการแล้วที่เกิดความร้อนสมการ (1) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้สมการการเกิดความร้อน (H) จากการเชื่อมต้านทานแบบจุด ซึ่งสมการทจะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) เวลาเชื่อม (t) และการสูญเสียความร้อน (K) แสดงดังสมการ (2)

$$H = I^2RtK \quad (2)$$

สิ่งที่สำคัญในการเชื่อมแบบจุดคือเวลา ถ้าเวลาในการเชื่อมยาวนานเกินไป แล้วอาจทำให้โลหะเชื่อมเกิดการเสียหายเนื่องจากหลอมละลายได้ และชิ้นงานอาจเกิดรูพรุนได้ นอกจากนั้นในจุดที่ไม่มีการเชื่อมแบบจุดอาจจะเกิดการดึงโลหะและทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหาย เวลาการเชื่อมที่สั้นเกินไปนั้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่โลหะเป็นไปได้อย่างลำบาก รอบนักเกตมีขนาดเล็กเนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดจากการเชื่อมน้อย

อย่างไรก็ตาม สมการความร้อนที่แสดงดังสมการ (2) ไม่นิยมนำมาใช้มากนัก เนื่องจากค่าสูญเสียความร้อนนั้นมีค่าที่สามารถวัดได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการประยุกต์ใช้สมการความร้อน (Q) ที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) และเวลาเชื่อม (t) แสดงดังสมการ (3)

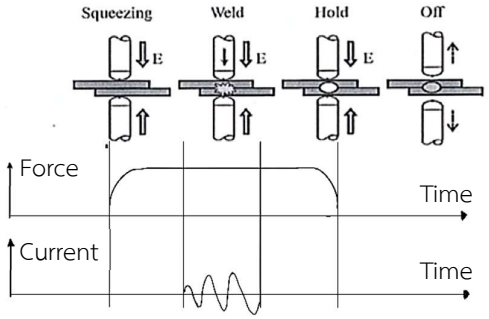
$$Q = I^2Rt \quad (3)$$

2.3. ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมแบบจุด

คุณภาพและขนาดของรอยเชื่อม รวมถึงการเกิดเนื้อเชื่อมบริเวณผิวหน้าประกบกันของชิ้นงาน อาศัยความร้อนจากความต้านทานภายในตัววัสดุ ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยในการเชื่อม[4] ดังนี้

2.3.1 กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม คือ ระดับความเข้มของค่ากระแสไฟฟ้าที่หัวอิเล็กโทรดปล่อยเข้าสู่ชิ้นงาน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการหลอมละลายของชิ้นงานภายใต้หัวกดอิเล็กโทรด ยิ่งค่าความเข้มของกระแสไฟฟ้ามาก ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามค่าความเข้มของกระแสไฟฟ้า

2.3.2 ช่วงเวลาในการเชื่อม คือ ช่วงระยะเวลาที่หัวอิเล็กโทรดกดลงบนผิวสัมผัสของชิ้นงาน และปล่อยกระแสไฟฟ้าออกมาทำให้เกิดความร้อนจนชิ้นงานหลอมละลายประสานติดกัน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการกด เวลา และกระแสไฟฟ้าในวงจรของกระบวนการเชื่อมแบบจุด (Spot Welding Cycle) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลำดับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด [6]

2.3.3 วัสดุชิ้นงานและองค์ประกอบของวัสดุ

วัสดุชิ้นงานและองค์ประกอบของวัสดุจะส่งผลต่อความสามารถในการเชื่อม โดยองค์ประกอบของวัสดุจะประกอบด้วยความต้านทานไฟฟ้า การนำไฟฟ้า การนำความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 2 และสมบัติทางกลแสดงดังตารางที่ 3 [5]

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมินัมอัลลอย 6061-T6 [7]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
สูงสุด	0.80	0.70	0.40	0.15	1.20
ต่ำสุด	0.40	-	0.15	-	0.80
	Cr	Zn	Ti	Al	
สูงสุด	0.35	0.25	0.15	Balance	
ต่ำสุด	0.04	-	-	Balance	

ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของอะลูมินัมอัลลอย 6061-T6 [7]

ทิศทาง	แนวยาว / แนวขวาง
ข้อจำกัด	ค่าต่ำสุด
ความเค้นสูงสุด (MPa)	290.0
ความเค้นคราก (MPa)	255.0
ระยะยืดวัสดุ (%)	12.0
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm^3)	2.7

จากตารางที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่า อะลูมินัมอัลลอย 6061-T6 มีน้ำหนักเบาและมีสมบัติเชิงกลที่ดี อะลูมินัมอัลลอย กลุ่ม 6061-T6 ที่ผ่านการอบผิวแข็ง ซึ่งมีแนวโน้มการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอนาคต ทดแทนเหล็กบางส่วนที่เป็นวัสดุหลักในการสร้างรถยนต์จากมาตรฐานญี่ปุ่น ซึ่งในมาตรฐานสากลได้กำหนดไว้ว่า เป็นการเทียบมาจากมารตรฐานสากล (ISO) กำหนดความต้านทานแรงดึงเฉือนของอะลูมินัมอัลลอยความหนา 1.00 มิลลิเมตร ขั้นต่ำ 0.62 กิโลนิวตัน และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.92 กิโลนิวตัน [Japanese Standard Association, 1995]

2.3.4 แรงกดอิเล็กโทรด

แรงที่หัวอิเล็กโทรด คือ ที่ปลายทั้งสองกดลงบนชิ้นงาน โดยแรงกดอิเล็กโทรดที่เหมาะสมจะเป็นสิ่งสำคัญทำให้ชิ้นงานสมบูรณ์ มีความแข็งแรง ถ้าใช้แรงในการกดลงบนชิ้นงานมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายได้ เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนที่มาจากกระแสไฟฟ้าที่หัวอิเล็กโทรดนำเข้าสู่ชิ้นงาน ในทางกลับกันถ้าแรงกดลงบนชิ้นงานน้อยเกินไปชิ้นงานที่ทำการเชื่อมจะไม่ได้ความแข็งแรงตามที่มาตรฐานกำหนด โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวอิเล็กโทรดจะกำหนดตามขนาดของ Nugget ที่ต้องการ และพิจารณาจากความหนาของชิ้นงาน จากสูตร แสดงดังสมการที่ 4

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวอิเล็กโทรด} = 0.1 + 2t \quad (4)$$

เมื่อกำหนดให้ t คือ ความหนาของชิ้นงาน (นิ้ว)

2.4. การตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบจุด

การตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบจุด คือ การทดสอบรอยเชื่อมตัวต้านทานแบบจุดจะใช้วิธีการทดสอบด้วยแรงดึงเฉือน จะเป็นการใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Tester) เพื่อหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมโลหะแผ่นที่ทำการเชื่อมซ้อนทับกัน โดยการทดสอบแรงดึงเฉือนจะใช้ค่าแรงดึงเฉือน จากมาตรฐาน JIS Z 3140 กำหนดความต้านทานแรงดึงเฉือนของอะลูมินัมอัลลอยความหนา 1.00 มิลลิเมตร ขั้นต่ำ 0.62 กิโลนิวตัน และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.92 กิโลนิวตัน [Japanese Standard Association, 1995] เพื่อหาค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมแบบจุดที่เหมาะสมที่สุด

2.4.1 การทดสอบแบบถูกทำลายสภาพ (Destructive Test : DT) การทดสอบแบบถูกทำลายสภาพของงานเชื่อม ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งเป็นการทดสอบหาความสามารถของรอยเชื่อมในการรับแรงกระทำในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งการทดสอบจะนำงานเชื่อม ที่ต้องการทดสอบมาจับยึดในเครื่องทดสอบโดยจับทั้งหัวและท้ายของงานทดสอบแล้วออกแรง กระทำและเพิ่มแรงขึ้นเรื่อย ๆ จนชิ้นงานทดสอบเสียหาย หรือขาดออกจากกันเป็น 2 ชิ้น ขณะเพิ่มแรงดึงทดสอบจะบันทึกขนาดของแรงดึงและการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานทดสอบด้วยการพิมพ์กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานทดสอบกับแรงที่ใช้ และหาความสามารถของงานที่เชื่อมที่ทนต่อแรงกระทำ การทดสอบแบบถูกทำลายสภาพของงานเชื่อม จะทดสอบหาความต้านทานแรง ดึงที่กระทำของเนื้อเชื่อม และความต้านทานแรงกระทำของรอยต่องานเชื่อม

2.4.2 การทดสอบที่เหมาะสำหรับรอยต่อเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด การทดสอบที่เหมาะสำหรับรอยต่อเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด การทดสอบแรงดึงเฉือนเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับการทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อจากการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด โดยการทดสอบแรงดึงเฉือนจะใช้เครื่องทดสอบแรงดึงมาตรฐานทดสอบหาค่าปัจจัยในการเชื่อม (Welding Parameter)

ที่เหมาะสมที่จะให้ได้รอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดมีความสามารในการต้านทานแรงดึงเดือนสูงสุด ส่วนการแตกหักสามารถเกิดได้ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1) การแตกหักที่ผิวหน้าร่วมของรอยเชื่อมจุด (Interfacial Fracture) การแตกหักที่ผิวหน้าร่วมของรอยเชื่อมจุด โดยปกติผลการทดสอบไม่ต้องการการขาดแบบนี้ เพราะแสดงให้เห็นถึงรอยเชื่อมจุดหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ระหว่างรอยเชื่อมมีความแข็งแรงน้อยกว่าแผ่นโลหะงาน

2) การดึงรอยเชื่อมจุด (Nugget) การดึงรอยเชื่อมจุดฉีกขาดจากแผ่นโลหะงานในลักษณะฉีกขาดเป็นรู (Pull Out Fracture) แสดงว่ารอยเชื่อมมีคุณภาพเยี่ยม การแตกขาดที่แผ่นโลหะงานฉีกเป็นรูอาจเกิดขึ้นได้

3. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design Experiment)

ทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องในการดำเนินการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมแบบจุดด้วยอะลูมินัมอัลลอย 6061-T6 ขนาดความหนา 1.00 มิลลิเมตร สามารถแบ่งทฤษฎีออกเป็นเรื่องต่าง ๆ ดังนี้

ปารเมศ ชุติมา [2] กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เป็นวิธีการทดลองในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจาก การรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย 3 ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย 5 ระดับ ในการทดลอง 1 เรพลิเคต (Replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัด ให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

สรุปคือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ และเป็นการออกแบบที่มี ประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองแบบทีละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลยังเป็น สิ่งที่จำเป็นเมื่อมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่เกิดความผิดพลาดได้ นอกจากนั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผล (Valid) ตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

3.1. หลักการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k แบบเต็มรูปแบบ

หลักการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k จะศึกษาถึงผลร่วมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ใน 2 ระดับ คือ ระดับค่าที่ต่ำที่สุด และสูงที่สุดของค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times ...x\ 2 = 2^k$ ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

ในการทดลองที่เกี่ยวการออกแบบ 2^k จะต้องตรวจสอบทั้งขนาดและทิศทางของปัจจัยที่มีผลเพื่อหาว่าตัวแปรใดที่น่าจะเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลขึ้น และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาเป็นตัวยืนยันข้อสรุปนั้น

3.2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

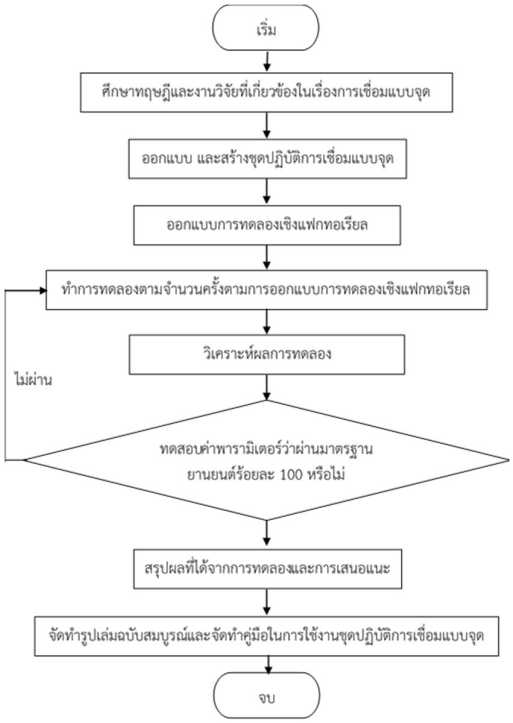
การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นมาตรการของการวัดการกระจายตัวของข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความแปรปรวนจึงเป็นการวัดการกระจายตัวของข้อมูลในรูปแบบของ พื้นที่ สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือเรียกอย่างย่อว่า ANOVA เป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบ สมมติฐาน เพื่อใช้ในการ

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไปในเวลาพร้อมกัน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน อาจจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA) หรือการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพียงตัวแปรเดียว โดยตัวแปรอาจจะมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรต้น จำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียง 1 ตัว

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินโครงงานการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมแบบจุด เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูล และขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

5. ผลการวิจัย

ส่วนของผลการวิจัยได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบไปด้วยผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปสองระดับ และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนี้

5.1. ผลจากการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล (Design of Experiment : DOE)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เป็นการนำหลักการออกแบบการทดลอง มาใช้เป็นหลักการในการออกแบบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยมีการใช้การทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปสองระดับ (2^k Full Factorial Experiment) จะประกอบด้วยปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลอง 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ (สูง-ต่ำ) และเพื่อความน่าเชื่อถือของการทดลอง จะทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ ดังนั้นจะต้องทำการเก็บข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด $2^3 \times 3 = 24$ หน่วยการทดลอง โดยกำหนดกระแสฟ้าในการเชื่อม 17.5 และ 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรด 486.2 และ 591.5 เดคานิวตัน เวลาในการเชื่อม 100 และ 200 มิลลิวินาที ความหนาของชิ้นงาน 1.00 มิลลิเมตร หมายเหตุ ค่าต่าง ๆ ได้มาจากข้อจำกัดของตัวเครื่องจ่ายไฟ ความดันลม และการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าดังข้างต้น ดังนั้นค่าตอบสนอง (Response) ที่เลือกใช้ในการทดลอง คือ ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมของชิ้นงานต่อ 1 ลำดับการทดลอง มีหน่วยกิโลนิวตัน การกำหนดปัจจัย 2 ระดับ 3 ปัจจัย เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ หรือเป็นปัจจัยที่ต้องป้อนค่า (Input) ในชุดโปรแกรมควบคุมการเชื่อม ด้วยโปรแกรม BOS6000) ดังนี้

- กำหนดปัจจัย A กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม
  กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระดับต่ำ (-1) คือ 17.5
  กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระดับสูง (1) คือ 20
- กำหนดปัจจัย B แรงกดอิเล็กโทรด
  แรงกดอิเล็กโทรด ระดับต่ำ (-1) คือ 486.2
  แรงกดอิเล็กโทรด ระดับสูง (1) คือ 591.5
- กำหนดปัจจัย C เวลาในการเชื่อม

เวลาในการเชื่อม ระดับต่ำ (-1) คือ 100

เวลาในการเชื่อม ระดับสูง (1) คือ 200

การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เป็นการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ ซึ่งการทดลองเป็นการออกแบบการทดลองแบบสุ่ม โดยให้แต่ละหน่วยการทดลองมีโอกาสที่จะได้รับทรีทเมนต์หนึ่งเท่ากัน การทดลองตามจำนวนครั้งตามการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมของชิ้นงานต่อ 1 ลำดับการทดลอง จากการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยกำหนดเป็น 2 ระดับ คือ ระดับสูง และระดับต่ำ ซึ่งการออกแบบการทดลองทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งสิ้น 24 การทดลอง ทำการทดลองและทำการบันทึกผลการทดลองค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน จากเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงเฉือน รุ่น LLOYD Universal Testing MODEL LR10K Plus หมายเลขเครื่อง 106463 แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับ	แผนการทดลอง	กระแสไฟฟ้า (kA)	แรงกดอิเล็กโทรด (daN)	เวลา (ms)	ความต้านทานแรงดึงเฉือน (kN)
1	21	20.000	591.500	100.000	0.849
2	11	17.500	591.500	200.000	2.578
3	22	20.000	591.500	200.000	1.073
4	12	17.500	591.500	200.000	2.877
5	15	20.000	486.200	100.000	1.440
6	14	20.000	486.200	100.000	0.847
7	9	17.500	591.500	100.000	1.456
8	13	20.000	486.200	100.000	0.653
9	3	17.500	486.200	100.000	1.357
10	18	20.000	486.200	200.000	0.950
11	19	20.000	591.500	100.000	1.294
12	16	20.000	486.200	200.000	1.972
13	7	17.500	591.500	100.000	1.876
14	17	20.000	486.200	200.000	0.163
15	2	17.500	486.200	100.000	0.946
16	8	17.500	591.500	100.000	1.980
17	5	17.500	486.200	200.000	1.945
18	10	17.500	591.500	200.000	2.812
19	23	20.000	591.500	200.000	1.987
20	1	17.500	486.200	100.000	1.268
21	6	17.500	486.200	200.000	2.324
22	4	17.500	486.200	200.000	2.143
23	24	20.000	591.500	200.000	0.911
24	20	20.000	591.500	100.000	1.165

จากตารางที่ 4 เป็นการออกแบบการทดลองให้มีการสุ่ม (Randomization) โดยให้แต่ละหน่วยการทดลองมีโอกาสที่จะได้รับทรีทเมนต์หนึ่งเท่ากัน เพื่อขจัดอคติหรือความเอนเอียงของผู้ทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าทรีทเมนต์ต่าง ๆ ไม่มีความได้เปรียบและเสียเปรียบในเรื่องเกี่ยวกับการทดลอง และเพื่อให้การวิเคราะห์และการทดสอบทางสถิตินั้นมีความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นโดยสุ่มเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้น การทดลองเบื้องต้นนี้ผู้ดำเนินโครงงานได้ใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab Version 14 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากตารางที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แสดงให้เห็นเพื่อพิจารณาค่าที่ทำซ้ำทั้งการทดลอง มีผลการทดลองที่แตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

กระแสไฟฟ้า (kA)	แรงกดอิเล็กโทรด (daN)	เวลา (ms)	ความต้านทานแรงดึงเฉือน (kN)			ค่าเฉลี่ย (kN)
			1	2	3	
17.5	486.2	100	1.268	0.946	1.357	1.190
17.5	486.2	200	2.143	1.945	2.324	2.137
17.5	591.5	100	1.876	1.980	1.456	1.771
17.5	591.5	200	2.812	2.578	2.877	2.756
20	486.2	100	0.653	0.847	1.440	0.980
20	486.2	200	1.972	0.163	0.950	1.028
20	591.5	100	1.294	1.165	0.849	1.103
20	591.5	200	1.073	1.987	0.911	1.324

5.2. วิเคราะห์ผลการทดลอง

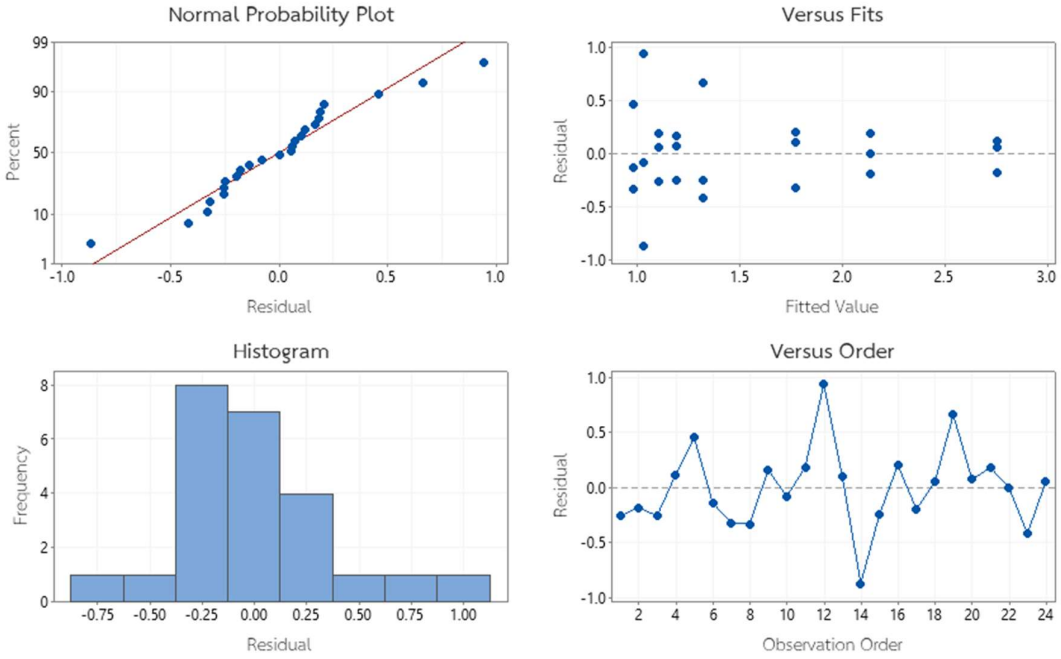
การวิเคราะห์ผลการทดลอง เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14 เพื่อใช้ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยต่อผลตอบสนองที่กำลังสนใจ อันเกิดจากทั้ง 3 ปัจจัย และเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังนี้

5.2.1 การทดสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ คือ การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) แสดงตามรูปที่ 3

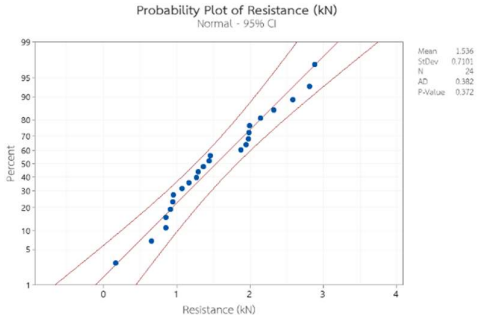
การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง ซึ่งใช้ในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยพิจารณาจากรูปที่ 3 พบว่า ค่าส่วนตกค้าง มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ โดยมีรูปที่ 4 อธิบายเพิ่มเติมในเรื่องของการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ กราฟ Histogram มีลักษณะของระฆังคว่ำ แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง แต่รูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเข้าข่ายกรวยปลายปิด หรือรูปแบบลำโพง แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างและลำดับที่ของการทดลอง เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง ของข้อมูล ซึ่งมีการกระจายตัวไม่มีลักษณะแนวโน้มที่จะเป็นรูปแบบที่แน่นอน จึงถือว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งถือว่าข้อมูลมีความถูกต้องเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์

โดย 4 จุด ของ Normal Probability plot ที่จะมีระยะห่างจากกลุ่มข้อมูลนั้น เริ่มจากจุดล่างสุดไปจุด

บนสุด พบว่า เทียบข้อมูลจากตารางที่ 4 คือ ลำดับการเชื่อมที่ 14 ลำดับแผนการทดลองที่ 17 กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรด 486.2 เดคานิวตัน และเวลาในการเชื่อม 200 มิลลิวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน เท่ากับ 0.163 กิโลนิวตัน ลำดับการเชื่อมที่ 5 ลำดับแผนการทดลองที่ 1 กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรด 486.2 เดคานิวตัน และเวลาในการเชื่อม 100 มิลลิวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน เท่ากับ 1.440 กิโลนิวตัน ลำดับการเชื่อมที่ 19 ลำดับแผนการทดลองที่ 23 กระแสไฟฟ้าในเชื่อม 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรด 591.5 เดคานิตัน และเวลาในการเชื่อม 200 มิลลิวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน เท่ากับ 1.987 และลำดับการเชื่อมที่ 12 ลำดับแผนการทดลองที่ 16 กระแสไฟฟ้าในเชื่อม 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรด 486.2 เดคานิตัน และเวลาในการเชื่อม 200 มิลลิวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน เท่ากับ 1.972 กิโลนิวตัน เหตุผลที่ทำให้จุดทั้ง 4 จุดนี้ค่อนข้างออกห่างจากกลุ่มข้อมูลอื่น ๆ เกิดจากระหว่างการเชื่อมนั้นใช้ไฟฟ้าในเชื่อมที่สูงจึงทำให้เครื่องจ่ายไฟเกิดการตัดในระบบ ทำให้เกิดข้อบกพร่องในการเชื่อม ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนมีค่าคลาดเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 4 แสดงผลการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง โดยโปรแกรม Minitab Version 14 จะให้ค่า P-Value พบว่า (P-Value = 0.372) > (α =0.05) [3] จึงยอมรับสมมติฐาน สรุปได้ว่า ข้อมูลของค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 3 การตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ



รูปที่ 4 กราฟแสดงข้อมูลการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ

5.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่า ไม่มีความผิดปกติของการทดลองเกิดขึ้นและข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 (α = 0.05) แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ

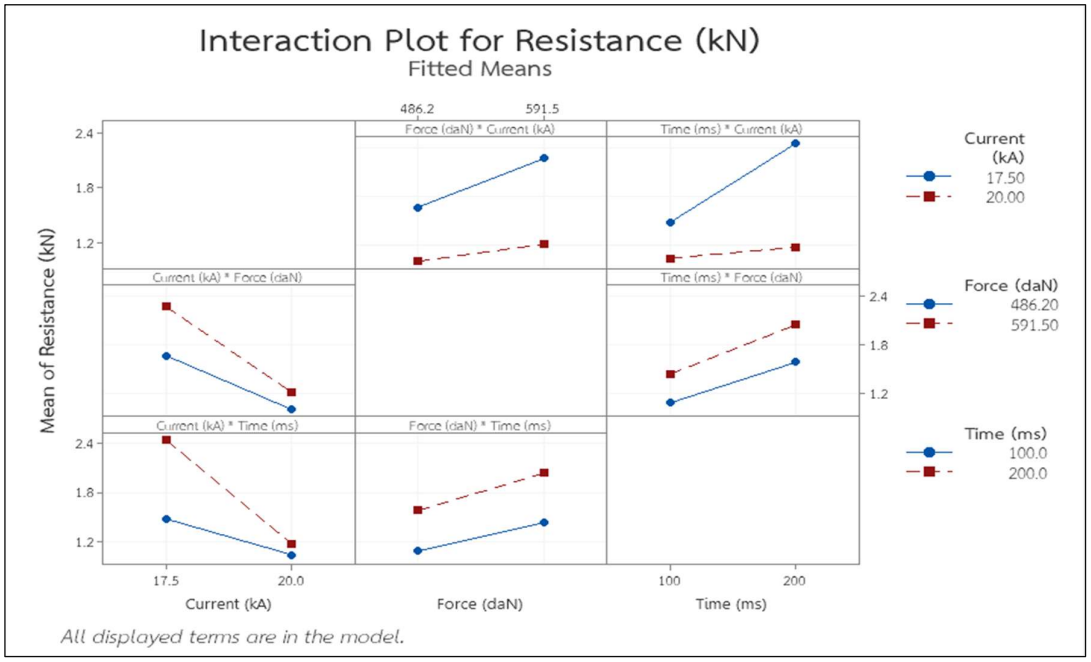
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	8.46880	1.20983	6.19000	0.00100
Linear	3	7.18020	2.39340	12.24000	0.00000
Current (kA)	1	4.38270	4.38267	22.42000	0.00000
Force (daN)	1	0.98030	0.98031	5.02000	0.04000
Time (ms)	1	1.81720	1.81724	9.30000	0.00800
2-Way Interactions	3	1.28180	0.42725	2.19000	0.12900
Current (kA)*Force (daN)	1	0.22840	0.22842	1.17000	0.29600
Current (kA)*Time (ms)	1	1.03660	1.03660	5.30000	0.03500
Force (daN)*Time (ms)	1	0.01670	0.01673	0.09000	0.77400
3-Way Interactions	1	0.00690	0.00686	0.04000	0.85400
Current (kA)*Force (daN)*Time (ms)	1	0.00690	0.00686	0.04000	0.85400
Error	16	3.12740	0.19546		
Total	23	11.59620			

S = 0.44211 R-sq = ร้อยละ 73.03000 R-sq (adj) = ร้อยละ 61.23000

จากตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ พบว่า อิทธิพลของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อมมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-Value น้อยกว่านัยสำคัญที่ 0.05 โดยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 แรงกดอิเล็กโทรดมีค่า P-Value เท่ากับ 0.040 และเวลาในการเชื่อมมีค่า P-Value เท่ากับ 0.008 อิทธิพลของปัจจัยร่วมมีเพียง 1 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน คือ ปัจจัยระหว่างกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมและเวลาในการเชื่อม มีค่า P-Value เท่ากับ 0.035 ซึ่งน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่ 0.05 และอิทธิพลร่วมที่เหลือ คือ ปัจจัยร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงกดอิเล็กโทรด แรงกดอิเล็กโทรดกับเวลาในการเชื่อม และปัจจัยระหว่างกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อม จากผลการทดลองไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน เนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญที่ 0.05

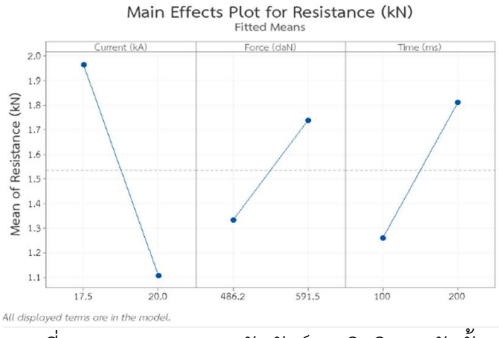
จากข้อมูลที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14 พบว่า ให้ค่าความเชื่อมั่นของข้อมูลคือ R-sq = ร้อยละ 73.03 และ R-sq (adj) = ร้อยละ 61.23 ซึ่งค่าที่ได้จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีจากค่า P-Value ของปัจจัยหลัก ทั้งกระแสไฟในการเชื่อม แรงกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อม ซึ่งมีค่า P-Value < α (ซึ่งผู้จัดทำได้กำหนด α = 0.05) ดังนั้น ค่าที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักจาก 3 ปัจจัย ที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือน ดังรูปที่ 5 พบว่า กระแสไฟในการเชื่อมมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน คือเมื่อกระแสไฟในการเชื่อมเพิ่มขึ้นความต้านทานแรงดึงเฉือนมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาเพิ่มแรงกดอิเล็กโทรดสูงขึ้น พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเพิ่มขึ้นจนแรงกดอิเล็กโทรด 591.5 เดคานิวตัน หรือ 5,915 นิวตัน (เนื่องจากข้อจำกัดของความดันที่เข้ามาในระบบ เข้ามาเพียง 100 บาร์ แรงกดอิเล็กโทรดจึงสูงสุดได้เพียงข้างต้น) และในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาเวลาในการเชื่อม พบว่า เมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนก็จะเพิ่มขึ้น (ผู้ทำการทดลองได้ทดลองจากหลาย ๆ ค่า และผู้ทำการทดลองได้นำค่าที่ดีที่สุดมาใช้ในการออกแบบการทดลอง)



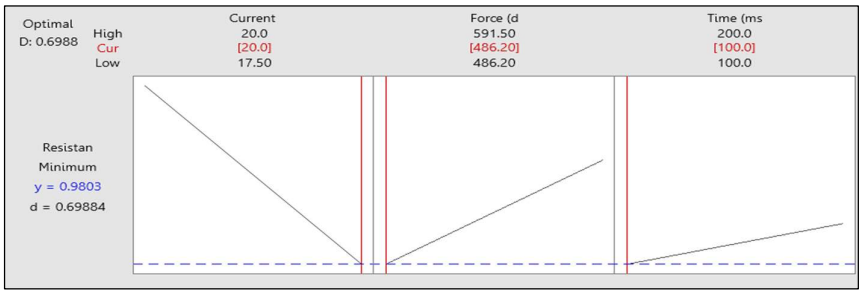
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมทั้ง 3 ปัจจัย

จากรูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อม ที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือน พบว่า เมื่อกระแสไฟในการเชื่อมเท่ากับ 17.5 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรดเท่ากับ 591.5 เดคานิวตัน หรือมีค่าเท่ากับ 5,915 นิวตัน และเวลาในการเชื่อมชิ้นงานเท่ากับ 200 มิลลิวินาที ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด มากกว่าการปรับค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อมในระดับอื่น

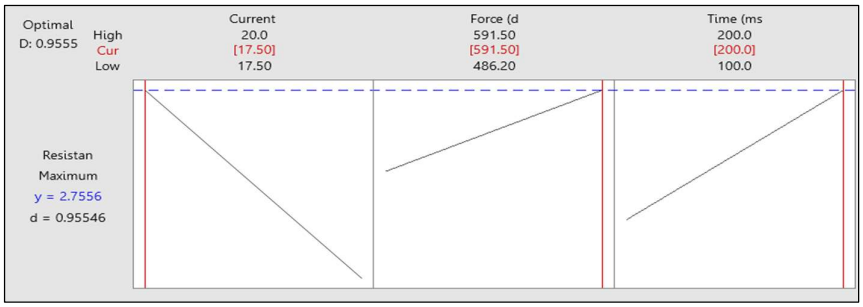


รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักทั้ง 3 ปัจจัย

5.2.3 การกำหนดค่าของปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง การทดลองหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของชิ้นงานในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14 เลือกใช้ฟังก์ชั่น Response Optimizer ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยปัจจัยที่ได้นำมาพิจารณาประกอบด้วย ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อม แสดงดังรูปที่ 7-8



รูปที่ 7 กราฟแสดงผลการตอบสนองของระดับปัจจัยที่มีผลต่ำสุด



รูปที่ 8 กราฟแสดงผลการตอบสนองของระดับปัจจัยที่มีผลสูงสุด

จากรูปที่ 7 พบว่า เมื่อกระแสไฟในการเชื่อมเท่ากับ 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรดเท่ากับ 486.2 เดคานิวตัน หรือ 4,861 นิวตัน และเวลาในการเชื่อมเท่ากับ 100 มิลลิวินาที จะได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเท่ากับ 0.9803 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่ต่ำที่สุด ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด แต่เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงทำการหาสภาวะปัจจัยที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุดต่อไป

จากรูปที่ 8 พบว่า เมื่อกระแสไฟในการเชื่อมเท่ากับ 17.5 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรดเท่ากับ 591.5 เดคานิวตัน หรือ 5,915 นิวตัน และเวลาในการเชื่อมเท่ากับ 200 มิลลิวินาที จะได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเท่ากับ 2.7556 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่สูงที่สุดและมากกว่าค่ามาตรฐาน JIS Z 3140 [[Japanese Standard Association, 1995] กำหนดไว้ และบรรลุตามวัตถุประสงค์ของการดำเนินโครงการวิจัย

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1. ตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

ตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด พบว่า ปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อม ปัจจัยร่วม คือ ปัจจัยร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อม ที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ในการเชื่อมอะลูมินัมอัลลอย 6061-T6 ขนาดความหนา 1.00 มิลลิเมตร อย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาค่า P-Value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

6.2. ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

จากการพิจารณาความสัมพันธ์พารามิเตอร์ในการเชื่อมที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือน พบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมลดลงจาก 20 ถึง 17.5 กิโลแอมแปร์ ความต้านทานแรงดึงเฉือนจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มแรงกดอิเล็กโทรดจาก 486.2 ถึง 591.5 เดคานิวตัน หรือ 4,862 ถึง 5915 นิวตัน ความต้านทานแรงดึงเฉือนจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 100 ถึง 200 มิลลิวินาที ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนจะเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับอะลูมินัมอัลลอย 6061-T6 ขนาดความหนา 1.00 มิลลิเมตร โดยเครื่องเชื่อมแบบจุด รุ่น NIMAK B1.020.020 ใช้โปรแกรม BOS6000 ในการควบคุมระบบ คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 17.5 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรด 591.5 เดคานิวตัน หรือ 5915 นิวตัน และเวลาในการเชื่อม 200 มิลลิวินาที

6.3. ข้อเสนอแนะ

ผู้ดำเนินโครงงานมีข้อเสนอแนะในการพัฒนาฟิกซ์เจอร์จับยึดชิ้นงานทดสอบขณะทำการเชื่อม เพื่อป้องกันการหล่นจากตัวเครื่องเชื่อม หรือบิดงอของชิ้นงาน และเพื่อการกำหนดระยะจุดเชื่อมได้ง่ายขึ้น หากต้องการใช้วัสดุอื่นในการเชื่อมแบบจุด สามารถนำวิธีการทดลองไปปรับใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวัสดุนั้น ๆ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Chantasri, P. Yampuern and K. Kimapong, “A Study of Resistant Spot Welds Properties between AA1100 Aluminum Alloy and SGACD Zinc Coated Steel”, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2555.

[2] P. Chutima (2545). Design of Experiment (DOE)”, Academic Resources, Chulalongkorn University, 2545.

[3] C. Seekeawsiew (2555). Design of Experiment : DOE [Online]. Avaliable : http://www.geocities.ws/chalong_sri/why_DOE.htm.

[4] T. Alanchai and K. Sonthipermpoon, T. Arunchai, K. Sonthipermpoon, P. Apichayakul and K. Tamee, “Resistance Spot Welding Optimization Based on Artificial Neural Network”, *International Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 2014, Article ID154784.

[5] P. NA. Ayutthaya and P. Learunpaiboon, *Design and Analysis of Experiment*, Top Publishing, 2551.

[6] C.Z Syn, M. Mokhtar, C.J. Feng and Y. H.P. Manurung, “Approach to prediction of laser cutting quality by employing fuzzy expert system”, *Expert Systems with*

Applications, Vol. 38, Issue 6, pp. 7558-7568, June 2011.

[7] R.S. Florea, K.N. Solanki, D.J. Bammann, J. C. Baird, J.B. Jordon and M.P. Castanier, "Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation", *Materials & Design*, vol. 34, pp. 624-630, 2012.

[8] J. HIRSCH, "Recent developments in aluminum for automotive applications", *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, Issue 7, pp. 1995-2002, 2014.