



การหาค่าตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจูดรอยต่อเกย  
ระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี  
FRICTION STIR SPOT WELDING PARAMETERS OPTIMIZATION OF LAP JOINT  
BETWEEN ALUMINUM ALLOY AND ZINC-COATED STEEL

วราญา วัฒนจิตศิริ<sup>1\*</sup> สุรัตน์ ตรีชวนพงศ์<sup>1</sup> และกิตติพงษ์ กิมะพงษ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาความต้องการใช้งานรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าในโครงสร้างรถยนต์ คือเรื่องเร่งด่วนเนื่องจากประโยชน์ของรอยต่อลักษณะนี้สามารถลดน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างและประหยัดการใช้พลังงาน ด้วยเหตุนี้การหากระบวนการเชื่อมที่สามารถทำให้เกิดความแข็งแรงสูงของรอยต่อเกยระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดนี้จึงมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง บทความนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจูดที่มีผลต่อการเชื่อมรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD การทดลองถูกออกแบบด้วยวิธีทาгуชิและวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมมินิแทป 15 หลังจากนั้นทำการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจูดต่างๆ ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่ทำให้มีความแข็งแรงเฉือน 2165 นิวตัน คือความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที ความเร็วในการสอดตัวกวน 6 มิลลิเมตรต่อวินาที และเวลาคดแช่ 6 วินาที

**คำสำคัญ:** การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจูด, รอยต่อเกย, อะลูมิเนียม, เหล็กกล้า

ABSTRACT

*In the last decade, the requirement of using aluminum and steel lap joint in car structure was a hot issue because of this type of joint could reduce a gross weight of the structure and save the fuel consumption. So an optimization of a welding process that could produce higher strength of the lap joint between these two materials was continuously investigated and developed. This article aims to study the effect of the friction stir spot welding parameters on AA1100 aluminum alloy and SGACD steel lap joint strength. The experiment was designed by Taguchi design and analyzed with MINITAB15, then investigated the relation among the friction stir spot welding. The experimental results are as follows. The optimum welding condition that gave the shear strength of 2165 N was the rotating speed of 4000 rpm, the pin insert speed of 6 mm/s and the holding time of 6s.*

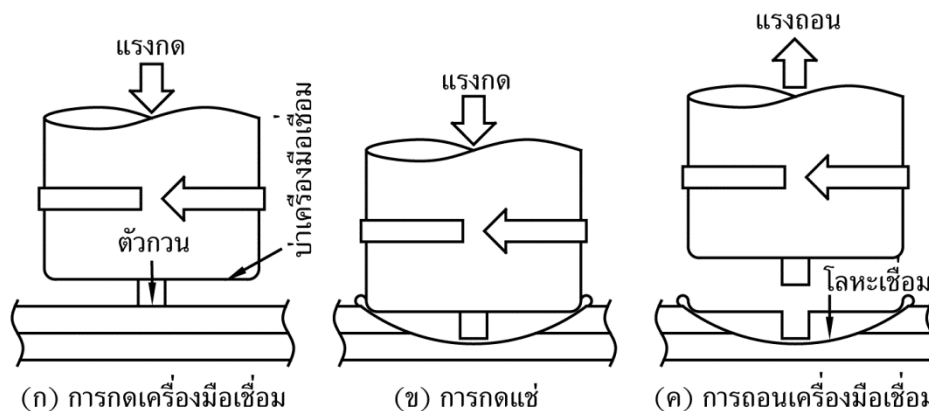
**KEYWORDS:** friction stir spot welding, lap joint, aluminum, steel.

Voraya Wattanajitsiri<sup>1\*</sup> Surat Triwanapong<sup>1</sup> and Kittipong Kimapong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyabur.

### 1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ รอยต่อเกยเป็นรอยต่อสำคัญที่มีปริมาณการใช้งานมากกว่า 60% เมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่ออื่นๆ เช่น รอยต่อชน (Butt joint) หรือรอยต่อฉาก (T joint) เป็นต้น [1] ที่ผ่านมาการเชื่อมความต้านทานจุด (Resistance spot welding: RSW) คือกระบวนการเชื่อมที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมยึดรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้า อย่างไรก็ตามการเชื่อมความต้านทานจุดซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมหลอมละลายที่ต้องใช้พลังงานสูงและก่อให้เกิดโครงสร้างไม่พึงประสงค์ในโลหะเชื่อม เช่น โครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อทำการเชื่อมรอยต่อเกยของโลหะชนิดเดียวกัน (Similar materials) และสารประกอบประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงเมื่อทำการเชื่อมรอยต่อเกยของโลหะต่างชนิด (Dissimilar materials) [2-4] การลดการใช้พลังงานสำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดได้มีการคิดค้นกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด (Friction stir spot welding: FSSW) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) [5, 6] และหลักการเชื่อมดังรูปที่ 1 เครื่องมือเชื่อม (Welding tool) ซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบสูงถูกกดสอดเข้าสู่รอยต่อเกยจนกระทั่งบ่าเครื่องมือเชื่อม (Tool shoulder) จมลงไปบนพื้นผิวด้านบนของรอยต่อเกย เครื่องมือเชื่อมที่ถูกสอดเข้าไปจะถูกกดแช่ด้วยเวลาที่กำหนด (Holding time) และทำการถอนเครื่องมือเชื่อมออกจากรอยต่อ แรงเสียดทานที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างผิวของเครื่องมือเชื่อมกับวัสดุรอยต่อส่งผลให้เกิดความร้อนเสียดทานที่สามารถทำให้วัสดุรอบผิวสัมผัสและที่อยู่ใกล้กับผิวของเครื่องมือเชื่อมเกิดการอ่อนตัว หลังจากนั้นวัสดุที่อ่อนตัวเนื่องจากความร้อนเสียดทานถูกทำให้เคลื่อนที่ไหลวนด้านล่างเครื่องมือเชื่อมและเกิดการรวมตัวกันเกิดเป็นโลหะเชื่อมขึ้น



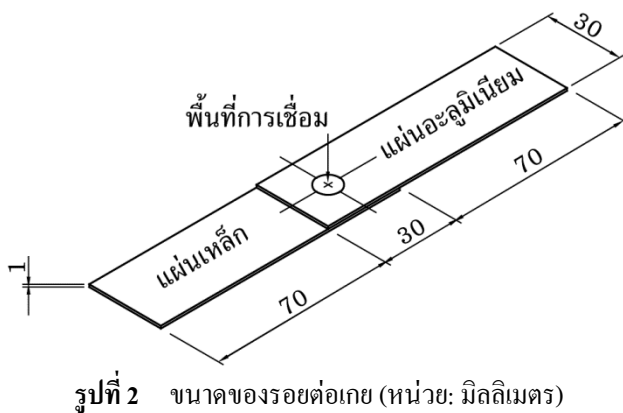
รูปที่ 1 หลักการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด [5]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการแสดงผลการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไว้อย่างน่าสนใจ เช่น การศึกษาเปรียบเทียบผลการเชื่อมรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม AA6061 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดและการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่แสดงความแข็งแรงของรอยต่อเกยจากสองกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกันและสามารถใช้ทดแทนได้ [5] หรือการศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม AA6061 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีการศึกษาอิทธิพลระหว่างระยะการสอดตัวกวนเข้าสู่รอยต่อและความเร็วรอบการเชื่อมที่แตกต่างกันสามารถทำให้เกิดรอยต่อที่มีความแข็งแรงแตกต่างกัน และพบการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะในบริเวณโลหะเชื่อม [6]

นอกจากนั้นการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดสามารถทำการเชื่อมรอยต่อที่มีความแข็งแรงสูงระหว่างอะลูมิเนียม AA1100 และ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 การเลือกตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมสามารถทำให้ได้โลหะเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงกว่าโลหะฐาน การก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะเกิดการก่อตัวที่ผิวสัมผัสซึ่งไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อเนื่องจากการพังทลายจะเกิดขึ้นที่แผ่นอะลูมิเนียม และความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้นกับการก่อตัวของโครงสร้างผิวสัมผัสคล้ายตะขอ (Hook-like interface structure) [7]

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นถึงแม้รอยต่อของอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าได้มีการศึกษามาบ้างแล้ว แต่เมื่อพิจารณาหนึ่งในรูปแบบของเหล็กกล้า เช่น เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี ที่มีการประยุกต์ใน โครงสร้างรถยนต์นั้นก็มีข้อจำกัด และไม่พบผลการรายงานการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดในการเชื่อมรอยต่อโลหะระหว่างแผ่นอะลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD ด้วยเหตุนี้ในบทความนี้จึงมีจุดประสงค์ในการนำเสนอผลการทดลองในการออกแบบการทดลองโดยวิธีทากูชิและใช้โปรแกรมมินิแทป 15 วิเคราะห์ผล นำมาประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดในการเชื่อมรอยต่อโลหะระหว่างแผ่นอะลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD รอยต่อที่ได้ถูกนำไปทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดและสมบัติของรอยต่อ เลข ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป

## 2. วิธีการทดลอง



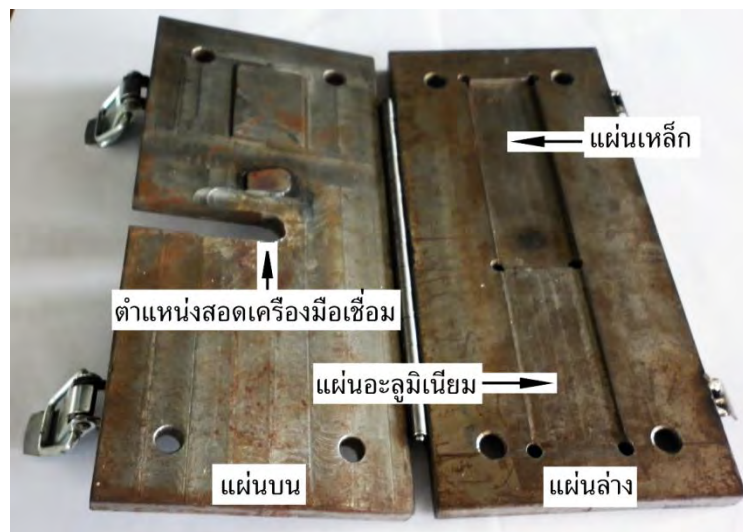
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง

ธาตุ (%wt)	อะลูมิเนียม	เหล็กกล้า
Al	สมดุล	-
Fe	-	สมดุล
C	-	0.050
Si	0.095	-
Mn	0.050	-
Cu	0.150	-
P	0.006	-
S	0.014	0.240
Zn	-	0.095

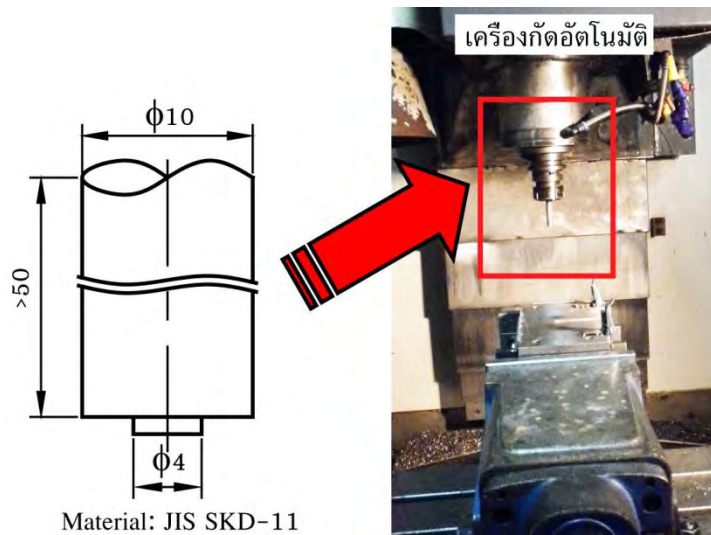
วัสดุในการทดลอง คืออะลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีที่มีส่วนผสมทางเคมีตารางที่ 1 แผ่นโลหะทั้งสองที่มีความหนา 1.0 มิลลิเมตรถูกตัดโดยใช้เครื่องตัดเฉือนด้วยแรงกลให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 30 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร เมื่อทำการประกอบรอยต่อ กำหนดให้แผ่นอะลูมิเนียมวางต่อเขยบนแผ่นเหล็กเท่ากับ 30 มิลลิเมตรดังรูปที่ 2 โดยแผ่นวัสดุทั้งสองถูกยึดแน่นในอุปกรณ์จับดังรูปที่ 3 หลังจากนั้นอุปกรณ์จับยึดจะถูกยึดแน่นบนโต๊ะงานเครื่องกัดอัตโนมัติดังรูปที่ 4

เครื่องมือเชื่อมทำจากเหล็กกล้า JIS-SKD11 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำมัน เครื่องมือเชื่อมมีรูปร่างทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือเชื่อมเท่ากับ 10.0 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวน 4.0 มิลลิเมตร ความยาวตัวกวน 1.0 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4

การออกแบบการทดลองทำได้โดยการใช้วิธีทากูชิ และโปรแกรมมินิแทป 15 ซึ่งการวิเคราะห์ของทากูชิ มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากระดับ(ค่า) ที่ทำให้ค่าตัววัดของทากูชิ คือ Signal of Noise(S/N) มีค่าสูงสุด จุดที่ดีที่สุดคือ จุดที่ทำให้ได้ค่า Max (S/N) ณ วิธีปฏิบัติของกลุ่มปัจจัยนั้นๆ [8] และกำหนดคสัญลักษณ์ของตัวแปรการเชื่อมดังตารางที่ 2 ตัวแปรการเชื่อมในการทดลองนี้ประกอบด้วยความเร็วรอบ (Tool rotating speed) ของการหมุนเครื่องมือเชื่อมที่ 3000-4500 รอบต่อนาที ความเร็วในการสอดตัวกวนเข้าสู่แนวเชื่อม (Pin insert rate) 2-6 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลากดแช่ (Pin holding time) 2-6 วินาที และความลึกของตัวกวน (Pin depth) 1.0 มิลลิเมตร หลังจากทำการเชื่อมรอยต่อเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาทำการทดสอบความแข็งแรงเฉือน แนวการพังทลาย และตำแหน่งการพังทลาย นอกจากนี้ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อถูกนำมาทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับความแข็งแรงเฉือนที่ได้



รูปที่ 3 อุปกรณ์จับยึดรอยต่อ



รูปที่ 4 เครื่องมือเชื่อมและการติดตั้ง (หน่วย: มิลลิเมตร)

ตารางที่ 2 ตัวแปรการเชื่อม

สัญลักษณ์	ตัวแปรการเชื่อม	หน่วย	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3
A	ความเร็วรอบ	rpm	3500	4000	4500
B	เวลากดแช่	s	2	4	6
C	อัตราการสอดตัวกวน	mm/s	2	4	6

### 3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

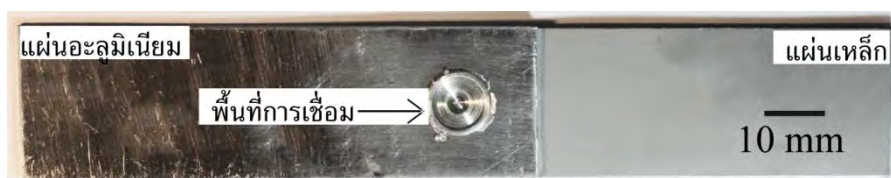
การทดลองเริ่มต้นจากการกำหนดตัวแปรการเชื่อม 3 ระดับดังตารางที่ 2 ตัวแปรการเชื่อมถูกกำหนดด้วย A B และ C สำหรับค่าความเร็วรอบการหมุน เวลากดแช่ และอัตราการสอดตัวกวน ตามลำดับ ความลึกของปลายตัวกวนที่สอดเข้าสู่รอยต่อมีค่าเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร (ค่า 0.0 มิลลิเมตร คือค่าที่ปลายตัวกวนแตะที่ผิวบนของรอยต่อเกย) ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติแบบออกคอนอลอาร์เรย์  $L_9$  ( $L_9$  Orthogonal array) [8] และโปรแกรมมินิแทป 15 คือเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ผลของการออกแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 ตัวแปรการเชื่อมที่ออกแบบถูกประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้า ในการทดลองแต่ละสภาวะการทดลองมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อความเชื่อมั่นในการออกแบบการทดลอง รอยต่อเกยที่ถูกเชื่อมเสร็จสิ้นดังรูปที่ 5 โดยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดถูกนำมาทำการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงเฉือนและแสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 การออกแบบการทดลองออกคอนอลอาร์เรย์  $L_9$

ลำดับการทดลอง	ตัวแปรการเชื่อม		
	A (ความเร็วรอบ)	B (เวลาคดแช่)	C (อัตราการสอดตัวกวน)
1	3500	2	2
2	3500	4	4
3	3500	6	6
4	4000	2	4
5	4000	4	6
6	4000	6	2
7	4500	2	6
8	4500	4	2
9	4500	6	4

ตารางที่ 4 ความแข็งแรงเหนือนเฉลี่ยและอัตราส่วน S/N

ลำดับการทดลอง	ความแข็งแรงเหนือน (N)	อัตราส่วน S/N (dB)
1	630	55.99
2	1336	62.52
3	1853	65.36
4	1113	60.93
5	1530	63.69
6	1631	54.25
7	1876	65.46
8	1151	61.22
9	880	58.89



รูปที่ 5 รอยต่อที่ผ่านการเชื่อมด้วยสภาวะการเชื่อมที่กำหนด

วิธีการทางสถิติใช้ในการหาค่าอัตราส่วนซิกแนลต่อฟอยส์ (Signal of Noise: S/N) [8] และแสดงผลในคอลัมน์ที่ 3 ของตารางที่ 3 ศัพท์คำว่า “ซิกแนล (Signal)” ในการทดลองนี้แสดงค่าที่ต้องการของคุณลักษณะที่ได้ (Desirable value of output characteristic) ด้วยเหตุนี้อัตราส่วน S/N คืออัตราส่วนของค่าเฉลี่ยต่อการเบี่ยงเบนกำลังสอง (Ratio of mean to square deviation: S.D.) ทางสถิติอัตราส่วน S/N ในการวัดค่าคุณลักษณะคุณภาพที่เบี่ยงเบนออกจากค่าที่ต้องการ อัตราส่วน S/N [9] แบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ

1. กรณีค่ายิ่งมามากยิ่งดี (Larger is Better) ดังสมการที่ (1)

$$S/N_L = -10 \cdot \log \left( \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{y^2} \right] / n \right) \quad (1)$$

2. กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is Better) ดังสมการที่ (2)

$$S/N_s = -10 \cdot \log \left( \sum \frac{y^2}{n} \right) \quad (2)$$

3. กรณีค่าตรงเป้าหมายที่สุด (Target the Best) ดังสมการที่ (3)

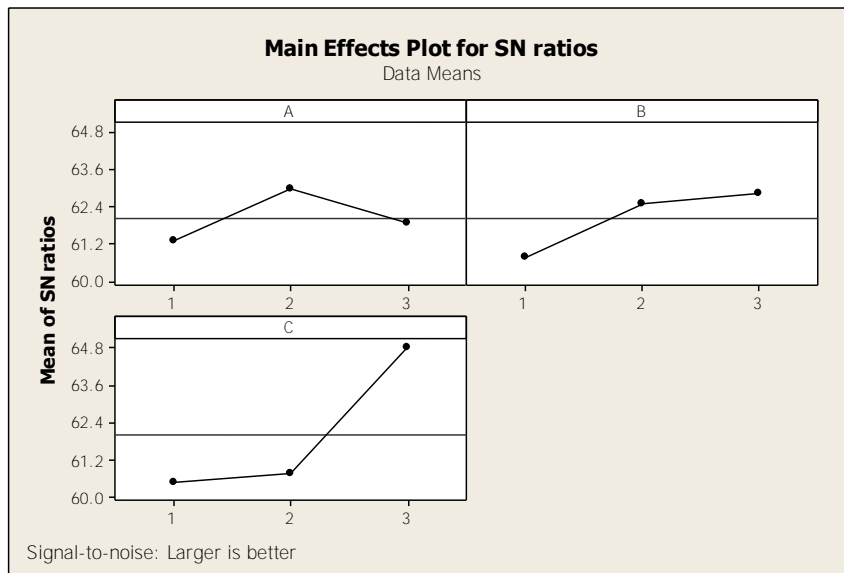
$$S/N_T = 10 \cdot \log \left( \frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (3)$$

เมื่อค่า  $n$  คือจำนวนของการทดสอบ และค่า  $y$  คือค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมของการทดสอบ  $i$  th ค่าคุณลักษณะที่ได้ (Output characteristic) โดยการทดลองนี้จะใช้กรณียิ่งมามากยิ่งดี (Larger is Better) ดังสมการที่ (1) ที่ Orthogonal Array  $L_9$  ที่ตัวแปรการทดลอง 3 ตัวแปร (ความเร็วรอบ เวลากดแช่ และอัตราการสอดตัวกวน) 3 ระดับการทดลอง (ระดับ 1,2,3) และ 1 ผลลัพธ์ตอบสนอง (ค่าแข็งแรงเนียน) ซึ่งค่าที่ได้ความแข็งแรงสูงและคุณลักษณะที่ดีกว่าจะถูกเลือก [10] ผลการทดลองหาค่าความแข็งแรงเนียนของรอยต่อและแสดงอัตราส่วน S/N ที่คำนวณจากสมการที่ (1) ในการทดสอบนี้เป็นผลจากการทดสอบที่แตกต่างกัน 9 การทดลอง ดังตารางที่ 4 และนำมาวิเคราะห์ห้อทธิพลของตัวแปรการเชื่อมแต่ละตัวต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งสามารถอธิบายค่าทางสถิติได้ด้วยโปรแกรมมินิแทป [11]

รูปที่ 6 แสดงกราฟ S/N response สำหรับค่าความแข็งแรงเนียนที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 4 และแสดงค่าอัตราส่วน S/N เฉลี่ยเท่ากับ 62 dB และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน S/N เฉลี่ย และระดับของตัวแปรการเชื่อมที่ประกอบด้วยความเร็วรอบ (A) เวลากดแช่ (B) และอัตราการสอดตัวกวน (C) ตามลำดับ ดังตารางที่ 5 ผลที่ได้พบว่าตัวแปรการเชื่อมที่ผลต่อความแข็งแรงเนียนที่สุด คืออัตราการสอดตัวกวน เมื่อพิจารณา “signal of Noise” หากค่าที่แสดงมากกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า (Larger is better) ซึ่งตัวแปรที่เหมาะสมในการทดลองนี้ คือที่ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที (A2) เวลากดแช่ 6 วินาที (B3) และอัตราการสอดตัวกวน 6 มิลลิเมตรต่อนาที (C3)

ตารางที่ 5 ค่า S/N response สำหรับความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อ

สัญลักษณ์	ตัวแปรการเชื่อม	อัตราส่วน S/N (dB)				
		ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	Max-Min	Rank
A	ความเร็วรอบ	61.29	62.96	61.86	1.67	3
B	เวลากดแช่	60.79	62.48	62.83	2.04	2
C	อัตราการสอดตัวกวน	60.49	60.78	64.84	4.35	1



รูปที่ 6 กราฟ S/N response เฉลี่ยสำหรับความแข็งแรงเฉือน

ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมที่พยากรณ์ด้วยโปรแกรมมินิแทปที่ทำการวิเคราะห์ 2 ครั้งและถูกเปรียบเทียบกับการทดลองจริงที่ได้รับดังตารางที่ 6 พบว่าการพยากรณ์ด้วยมินิแทปมีค่า A2B3C3 คือ A2 ตัวแปรความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองที่ระดับการทดลองที่ 2 จาก 3 ระดับการทดลอง คือ 4000 รอบต่อนาที B3 ตัวแปรเวลากดแช่ ที่ใช้ในการทดลองที่ระดับการทดลองที่ 3 จาก 3 ระดับการทดลองคือ 6 วินาที และ C3 ตัวแปรอัตราการสอดกวนตัวแปร ที่ใช้ในการทดลองที่ระดับการทดลองที่ 3 จาก 3 ระดับการทดลองคือ 6 มิลลิเมตรต่อวินาที และได้ค่าความแข็งแรงเฉือนเท่ากับ 1965.67 นิวตัน และเมื่อทำการทดลองซ้ำจะได้ผลตัวแปรที่เหมาะสมเช่นเดียวกับการพยากรณ์การทดลองคือที่ความเร็วรอบ(A2) เท่ากับ 4000 รอบ เวลากดแช่ (B3) เท่ากับ 6 วินาที และอัตราการสอดกวนเท่ากับ 6 มิลลิเมตรต่อวินาที และค่าความแข็งแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองจริงนั้นมีค่า 2165 นิวตัน ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าพยากรณ์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการพยากรณ์และผลที่ได้รับจะมีค่าความผิดพลาดที่ร้อยละ 0.21 ผลการทดลองที่ได้พบว่าเทคนิคทางสถิติสามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษาเพื่อหาตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมด้วยเพราะค่าอัตราส่วน S/N เฉลี่ยที่ได้สูงกว่าค่าพยากรณ์



ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม

รายการ	ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม	
	การพยากรณ์การทดลอง	ผลการทดลองที่ได้รับ
ระดับตัวแปร	A2B3C3	A2B3C3
ความแข็งแรงเฉือน (N)	1965.67	2165
อัตราส่วน S/N (dB)	66.56	66.70

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเกสรระหว่างอะลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD สามารถทำการศึกษาและวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีทากูจิ ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

- การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดสามารถทำการเชื่อมรอยต่อเกสรระหว่างอะลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD อันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วรอบ เวลากดแช่ และอัตราการสอดตัวกวน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของรอยต่อเกสร

- ตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่เหมาะสมที่ได้ค่าความแข็งแรงเฉือน 2165 นิวตัน ประกอบด้วยความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 6 วินาที และอัตราการสอดตัวกวน 6 มิลลิเมตรต่อวินาที

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Barnes, T.A. and Pashby, I.R. Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part I — solid and liquid phase welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 99, pp.62-71.
- [2] Sun, X., et al. Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Materials – From Process to Performance – Part I: Experimental Study. *Welding Journal*, 2004, 84, pp.188-195.
- [3] Qiu, R. et al. Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy joints welded by resistance spot welding with cover plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209, pp.4186-4193.
- [4] Qiu, R. et al. The influence of reaction layer on the strength of aluminum/steel joint welded by resistance spot welding. *Materials Characterization*, 2009, 60, pp.156-159.
- [5] Fujimoto, M. et al. Friction Spot Joining for Automotive Industry. Proceeding of International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly. Tokyo, Japan, 2005, pp.173-179.
- [6] Tanaka, K. and Kumagai, M. Dissimilar Joining of Aluminum Alloy and Steel Sheets by Friction Stir Spot Welding. International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly. Tokyo, Japan, 2005, pp.181-189.
- [7] Kimapong, K. Friction Spot Joining of AA1100 Aluminum Alloy and AISI304 Stainless Steel Lap Joint. *Engineering Journal Of Siam University*, 2007, 15, pp.56-61.
- [8] Sudasna-na-Ayudhya, P. and Luangpaiboon, P. Design and Analysis of Experiments, Top Publishing Co. Ltd, 2008.

- [9] Peace, G.S. Taguchi methods. Addison-Wesley, New York. 1993.
- [10] Juang, S.C. and Tarn, Y.S. Process parameter selection for optimizing the weld pool geometry in the tungsten inert gas welding of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 122, pp.33-37.
- [11] MINITAB, Minitab User Manual (Release 15). Making data analysis easier. MINITAB Inc., PA, USA. 2001.