การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการเชื่อมของการเชื่อมไทเทเนียม
Study of Factors that Affect Weldability of a Titanium Welding

ตะวันฉาย โพธิ์หอม* สุริยา โชคสวัสดิ์
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190
E-mail : tawanchai.p@ubu.ac.th*

Tawanchai Phohom* Suriya Choksawat
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, UbonRatchathani University, UbonRatchathani
E-mail: tawanchai.p@ubu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมไทเทเนียม ในกระบวนการเชื่อมทิก สำหรับ Ti Gr-2 โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการศึกษา ประกอบด้วย กระแสไฟในการเชื่อม แรงดันก๊าซ และระยะอาร์ค โดยแต่ละปัจจัยมีทั้งสิ้น 3 ระดับ และผลตอบสนองคือ ค่าความต้านแรงดึงของรอยเชื่อม โดยทำการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ Orthogonal Array L27 เพื่อกรองปัจจัย พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ คือ กระแสไฟในการเชื่อมและระยะอาร์ค ค่าที่เหมาะสมของกระแสไฟเท่ากับ 85 แอมป์ ค่าที่เหมาะสมของระยะอาร์คเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร จากผลการทดลอง พบว่า การกำหนดปัจจัยดังกล่าวทำให้ได้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด

คำสำคัญ: ไทเทเนียม กระบวนการเชื่อมแบบมีบ่อหลอมละลาย ความสามารถในการเชื่อม คุณสมบัติทางกล

Abstract

This research is intended to study factors that affect welding titanium. TIG welding process was used to weld a Ti Gr-2 grade. Factors that involved in the study included current (A.), gas flow (L/min.) and arc gap (mm.). Each factor consisted of 3 levels and responses were the tensile strength of the weld. Taguchi Orthogonal Array L27 was used to analyze the effect of factors. Using the 0.10 significance level factors, the result showed that the current and arc welding distance were significant factors. The appropriate value of the current was 85 (A.) and arc distance was 1.5 (mm.). The results showed that such factors yield the maximum tensile strength.

Keywords: Titanium Fusion Welding Weldability Mechanical properties

1. บทนำ

ไทเทเนียมเป็นโลหะที่กำลังถูกพัฒนานำมาใช้ในอุตสาหกรรมมากขึ้น เป็นลำดับเพราะไทเทเนียมจัดเป็นโลหะที่พบมากเป็นอันดับสี่รองจากอะลูมิเนียม, เหล็กและแมกนีเซียม ไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงและความเหนียวอยู่ในเกณฑ์สูงทั้งที่อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ไทเทเนียมเป็นโลหะที่ค่อนข้างเบา เมื่อเทียบกับเหล็ก ไทเทเนียมเป็นโลหะที่ค้นพบมาเป็นเวลานาน มี

ปริมาณมากกระจายอยู่ทั่วๆไปบนพื้นโลก ไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างแพง เป็นธาตุที่มีแนวโน้มในการรวมตัวกับธาตุ กลุ่มอโลหะได้ง่าย ในขบวนการผลิตจะผลิตโดยวิธีการรีดิวซ์สารประกอบคลอไรด์ของไทเทเนียม

ไทเทเนียมสามารถปรับปรุงให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นได้โดยทำให้เป็นโลหะผสม เหตุผลเพราะเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำเพียง 4.5 จึงมีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ที่สูงมากเป็นโลหะที่มีจุดหลอมละลายสูงถึง 1725 °C ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 จึงเหมาะสมในการนำมาทำเป็นชิ้นส่วนประกอบในเครื่องยนต์เจต นอกจากนี้ยังเป็นโลหะที่มีความต้านทานการคืบและความต้านทานการล้าสูงมาก จึงนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอากาศยานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไทเทเนียมจะมีความไวต่อปฏิกิริยาสูง แต่มีความต้านทานการกัดกร่อนดีมีคุณลักษณะคล้ายอะลูมิเนียม

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ [2]

ความถ่วงจำเพาะ (20°C)	4.54 ก./ซม.³
จุดหลอมเหลว	1725 **เซลเซียส**
จุดเดือดกลายเป็นไอ	เหนือกว่า 3000 เซลเซียส
ระดับผลึก (ต่ำกว่า 882°C)	C.P.H.
(ต่ำกว่า 882°C)	B.C.C.

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพ [2]

ความหนาแน่น	4.506 ก./ซม.³
ความหนาแน่นของของเหลว	4.11 ก./ซม.³
จุดหลอมเหลว	1668 เซลเซียส
จุดเดือด	3287 เซลเซียส
ความร้อนของการหลอมเหลว	14.15 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	425 กิโลจูล/โมล

กระบวนการเชื่อมแบบทิก (Tungsten Inert Gas Welding)

การเชื่อมทิก (TIG Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมโลหะแบบหลอมละลายที่ได้รับความร้อนจากการอาร์คระหว่างลวดทังสเตน (Non-Consumable Electrode) กับชิ้นงานเชื่อม โดยที่ก๊าซเฉื่อยหรือก๊าซผสมปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมละลาย เพื่อป้องกันอากาศภายนอกทำปฏิกิริยากับบริเวณดังกล่าว ในบริเวณอาร์คมีความร้อนสูงถึงประมาณ 6,093 °C ในการเชื่อม

การเชื่อมทิก เป็นกระบวนการเชื่อมที่สามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ซึ่งรวมถึงโลหะผสม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน , เหล็กกล้าผสม, เหล็กกล้าไร้สนิม, โลหะทนความร้อน อะลูมิเนียม, ทองแดงและทองแดงผสม เป็นต้น

การเชื่อมทิกเป็นกระบวนการเชื่อมที่สามารถเชื่อมโลหะบางได้ดี คือมีความหนาตั้งแต่ 0.005 นิ้ว -1/8 นิ้ว และในการเชื่อมอาจจะเชื่อมแบบซ้อนแนว (Multiple-Pass) ซึ่งงานที่ต้องการคุณภาพสูง ได้แก่ งานอากาศยาน เป็นต้นไป สำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนยังสามารถเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแบบทิกอาจจะเป็นระบบด้วยมือหรืออัตโนมัติ

การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเป็นการดึงชิ้นทดสอบซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบตกอยู่ใต้สภาวะการยืดและเป็นกระบวนที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูปโดยการเสียรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นทดสอบจากแรงที่กระทำการตรวจวัดการเสียรูปจะวัดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดชิ้นทดสอบเทียบกับขนาดเริ่มต้นโดยการเสียรูปจะวัดจากความยาวของระยะทดสอบ (gauge length) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบเทียบกับระยะทดสอบเริ่มต้นระยะทดสอบเป็นช่วงความยาวมาตรฐานที่ใช้ในการวัดระดับการยืดหรือการเสียรูปที่เกิดขึ้น คุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงทางวิศวกรรมมีดังนี้

1. โมดูลัสของความเป็นอิลาสติก (Modulus of elasticity)
2. ความเค้นและความเครียด ณ. จุดคราก (Stress and strain at yield)
3. ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress)
4. เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation)

2. วิธีการวิจัย

การออกแบบการทดลองทำการออกแบบทดลองแบบทากูชิ และวิเคราะห์ผลด้วยวิธีสถิติทางวิศวกรรมหาปัจจัยที่มีผลต่อความต้านแรงดึงและค่าความแข็งของรอยเชื่อมทั้ง 3 ปัจจัย คือ กระแสที่ใช้ในการเชื่อม แรงดันในการเชื่อม และระยะอาร์ค และแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ออกแบบการทดลองการเชื่อมไทเทเนียมแผ่น เพื่อทดสอบแรงดึงและดูการหลอมลึก

Order	Current (A)	Gas Flow (L/min)	Arc (mm.)
1	75	15	1.0
2	75	15	1.5
3	75	15	2.0
4	75	18	1.0
5	75	18	1.5
6	75	18	2.0
7	75	21	1.0
8	75	21	1.5
9	75	21	2.0
10	80	15	1.0
11	80	15	1.5
12	80	15	2.0
13	80	18	1.0
14	80	18	1.5
15	80	18	2.0
16	80	21	1.0
17	80	21	1.5
18	80	21	2.0
19	85	15	1.0
20	85	15	1.5
21	85	15	2.0
22	85	18	1.0
23	85	18	1.5
24	85	18	2.0
25	85	21	1.0
26	85	21	1.5
27	85	21	2.0

ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองดำเนินการตามขั้นตอนข้างล่างนี้

1. นำไทเทเนียม เกรด Gr-2 (Titanium Plate Gr-2) มีความหนา 5 มิลลิเมตร ตัดเตรียมวัสดุกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตรจำนวน 54 ชิ้นและนำไทเทเนียมที่ตัดได้ขนาดดังกล่าวข้างต้นมาขัดด้วยกระดาษทรายหยาบเพื่อปรับผิวชิ้นงานด้านที่จะทำการเชื่อมให้เรียบ และทำความสะอาดด้วยน้ำยาอะซิโตน

2. นำไทเทเนียมที่ตัดได้ขนาดแล้วสองชิ้นมาประกบเข้าหากัน โดยการเชื่อมแบบต่อชนแบบไม่เติมลวดเชื่อม

3. เปิดเครื่องเชื่อมทิก เลือกใช้ไฟกระแสตรง และปรับค่ากระแส แรงดันก๊าซ และระยะอาร์คให้ตรงตามที่กำหนดไว้ในตารางการทดลองที่ 3 และเปิดการเดินเครื่องเชื่อมใต้ฟลักซ์ ช่วยในการเดินแนวเชื่อมอัตโนมัติ

4. นำชิ้นงานมาเชื่อม ตามค่าที่ตั้งไว้โดยใช้เครื่องเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Automatic Submerged Arc Welder) เข้ามาช่วยในการเดินแนวในการเชื่อมอัตโนมัติ

5. ทำการทดลองซ้ำ แต่ปรับค่าต่างๆตามตารางการทดลองที่ 3 จนได้ผลการทดลองครบทุกการทดลอง

การวัดค่าแรงดึง

อุปกรณ์ในการทดลองได้แก่ เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ดังแสดงในรูปที่ 1

รูปที่ 1 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

3. ผลการวิจัย

จากการทดลองเชื่อมตามสภาวะที่ได้ทำการออกแบบและนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบแล้วนั้น ผลการทดลองที่ได้ของแต่ละวิธีการทดสอบ แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงสภาวะการเชื่อมของชิ้นงานและค่าการทดสอบแรงดึง

ชิ้นที่	Current (A)	Gas (L/min)	Arc Gab (mm.)	Tensile (Mpa)
1	75	15	1.0	46.89
2	75	15	1.5	29.56
3	75	15	2.0	43.56
4	75	18	1.0	34.20
5	75	18	1.5	30.81

6	75	18	2.0	31.97
7	75	21	1.0	37.68
8	75	21	1.5	37.69
9	75	21	2.0	28.75
10	80	15	1.0	31.71
11	80	15	1.5	26.71
12	80	15	2.0	31.40
13	80	18	1.0	41.96
14	80	18	1.5	25.01
15	80	18	2.0	24.74
16	80	21	1.0	35.01
17	80	21	1.5	25.60
18	80	21	2.0	35.51
19	85	15	1.0	45.43
20	85	15	1.5	30.09
21	85	15	2.0	28.37
22	85	18	1.0	50.73
23	85	18	1.5	53.27
24	85	18	2.0	44.15
25	85	21	1.0	45.95
26	85	21	1.5	25.88
27	85	21	2.0	33.83

การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลการทดลองจะนำ ข้อมูลผลการทดลองทางกลมาใช้วิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม MINITAB Release 16 วิเคราะห์ผล ตามวิธีการออกแบบการทดลองของทากูชิ วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติโดยหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านแรงดึง

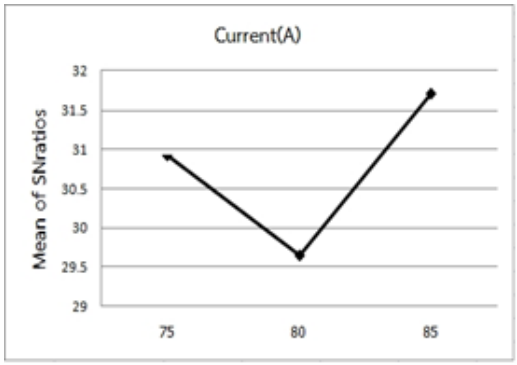
ผลที่ได้จากตารางที่ 4 นำมาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีของทากูชิ วิธีนี้จะพิจารณาจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-noise ratio : S/N) จากกรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger is better) สำหรับผลตอบสนองในกรณีตัวแปรที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้จากค่า S/N ratio เฉลี่ยของระดับแต่ละปัจจัยที่มีค่ามากซึ่งจากรูปที่ 2 ทำให้สามารถเลือกปัจจัยที่เหมาะสมของค่าปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมไทเทเนียมแผ่นด้วยวิธีการเชื่อมทิก (Current 2 , Gas Flow 3 , Arc 1) ปัจจัยที่เหมาะสำหรับการเชื่อมไทเทเนียมคือกระแสเชื่อม 85 แอมแปร์ แรงดันก๊าซ 18 ลิตรต่อนาที และระยะอาร์ค 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 รูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ตามลำดับ และยังมีผลกระทบร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยเกิดขึ้นในกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 6 ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยกระแสเชื่อม, แรงดันก๊าซ และระยะอาร์คตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปัจจัยมีผลกระทบร่วมกัน

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

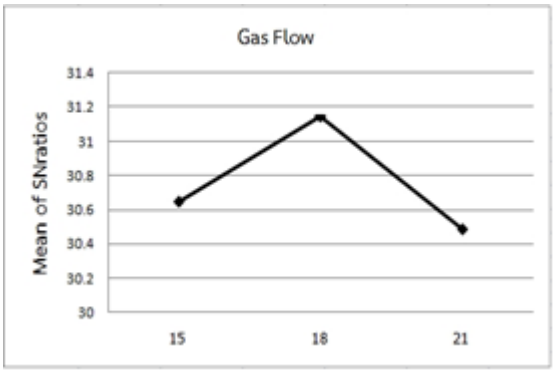
Level	Current A)	Gas Flow	Arc (mm.)
1	30.93	30.65	32.17
2	29.65	31.15	29.75

รูปที่ 2 ค่า S/N Ratio เฉลี่ยของระดับและปัจจัยต่างๆของการเชื่อมไทเทเนียม



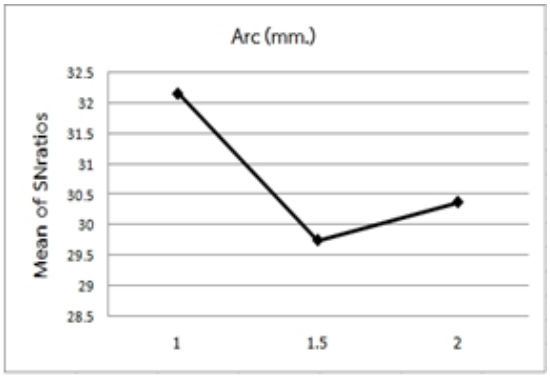
รูปที่ 3 ค่า S/N Ratio เฉลี่ยของกระแสในการเชื่อม

จากรูปที่ 3 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยของปัจจัยกระแสเชื่อม 3 ระดับ จะเห็นได้ว่า กระแสเชื่อมที่ระดับ 85 แอมป์ให้ค่าเฉลี่ยที่มากที่สุด เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมมากที่สุด



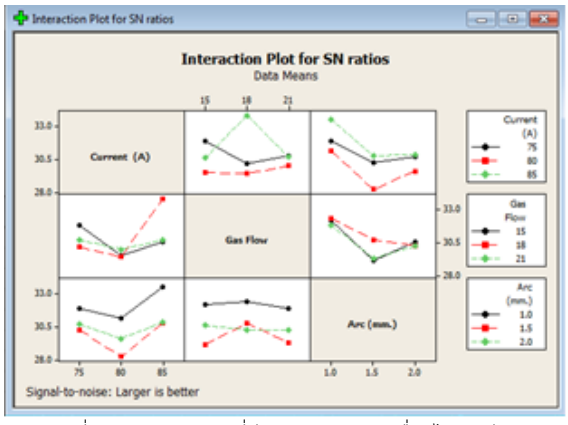
รูปที่ 4 ค่า S/N Ratio เฉลี่ยของแรงดันก๊าซในการเชื่อม

จากรูปที่ 4 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยของปัจจัยแรงดันก๊าซทั้ง 3 ระดับ จะเห็นได้ว่า แรงดันก๊าซที่ระดับ 18 ลิตรต่อนาที ให้ค่าเฉลี่ยที่มากที่สุด เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมมากที่สุด



รูปที่ 5 ค่า S/N Ratio เฉลี่ยของระยะอาร์คในการเชื่อม

จากรูปที่ 5 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยของปัจจัยระยะอาร์คทั้ง 3 ระดับ พบว่าค่า ระยะอาร์คที่ระดับ 1 มิลลิเมตร ให้ค่าเฉลี่ยที่มากที่สุด เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมมากที่สุด



รูปที่ 6 ผลกระทบร่วมที่มีผลต่อปัจจัยการเชื่อมไทเทเนียม

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Current (A)	2	19.510	19.510	9.7549	3.38	0.086
Gas Flow	2	2.161	2.161	1.0804	0.37	0.699
Arc (mm.)	2	28.312	28.312	14.1560	4.90	0.041
Current (A)*Gas Flow	4	23.409	23.409	5.8522	2.03	0.183

รูปที่ 7 วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราส่วน S/N

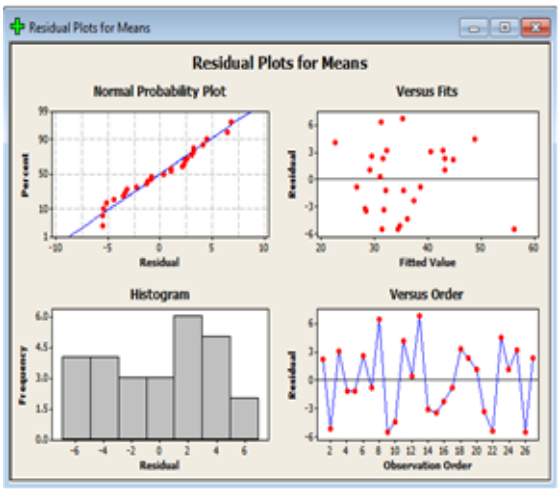
จากรูปที่ 7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า S/N ที่ระดับนัยสำคัญ (α= 0.10) จากค่า P-Value พบว่ามีค่าน้อยกว่า α คือ (0.041, 0.086) < α (0.10) จึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก และสรุปได้ว่า ระยะอาร์ค และ กระแสเชื่อม มีผลต่อค่าความต้านแรงดึงของรอยเชื่อม อย่างมีนัยสำคัญ

Analysis of Variance for Means

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Current (A)	2	356.74	356.74	178.37	3.94	0.064
Gas Flow	2	57.43	57.43	28.72	0.63	0.555
Arc (mm.)	2	446.57	446.57	223.29	4.93	0.040
Current (A)*Gas Flow	4	460.68	460.68	115.17	2.54	0.122

รูปที่ 8 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ย

จากรูปที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ (α=0.10) จากค่า P-Value พบว่ามีค่าน้อยกว่า α คือ (0.064, 0.040) < α (0.10) จึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก และสรุปได้ว่า ระยะอาร์ค และ กระแสเชื่อม มีผลต่อค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงของรอยเชื่อม อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลค่าเฉลี่ยของปัจจัยการเชื่อมไทเทเนียม

จากรูปที่ 9 พบว่า

1. Normal Probability Plot of the Residuals แสดงเส้นตรง 1 เส้น กราฟแสดงข้อมูลค่อนข้างปกติ

2. Histogram แสดงรูปทรงระฆังหงายค่อนไปทางซ้าย แสดงว่า ข้อมูลที่ได้อาจเกิดจากจำนวนชิ้นทดลองไม่เพียงพอ เป็นผลทำให้เกิดความคาดเคลื่อนในการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ สรุปได้ว่า กระแสเชื่อม ระยะอาร์ค มีผลต่อค่าเฉลี่ยความต้านแรงดึงของรอยเชื่อม อย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 0.10 แต่ค่าตัวแปรที่นำมาคำนวณและจำนวนชิ้นทดลองอาจไม่เพียงพอ

5. สรุปผล

จากการศึกษาการตรวจวัดค่าความต้านแรงดึงของรอยเชื่อม ซึ่งแปรผันตามค่าปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสเชื่อม แรงดันก๊าซ และระยะอาร์ค ซึ่งแต่ละปัจจัยมีอยู่ด้วยกัน 3 ระดับ ผลจากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ 23 มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุดคือ 53.27 Mpa ซึ่งทำให้วิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยแต่ละระดับมีผลต่อความต้านแรงดึง ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลคือ กระแสเชื่อม 85 แอมแปร์ แรงดันก๊าซ 18 ลิตรต่อนาที และระยะอาร์ค 1.5 มิลลิเมตร มีผลต่อค่าความต้านแรงดึงของรอยเชื่อมมากที่สุด การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม MINITAB จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยมีตัวแปรต้น คือ กระแสเชื่อม แรงดันก๊าซ และระยะอาร์ค และตัวแปรตามคือ ค่าความต้านแรงดึง พบว่า การวิเคราะห์ค่าความต้านแรงดึงนั้นจะได้ว่าค่า P-Value ของกระแส และระยะอาร์ค มีค่าเท่ากับ (0.064, 0.040) ตามลำดับ มีค่าน้อยกว่า α (0.10) ทำให้สรุปผลได้ว่า กระแสเชื่อม และระยะอาร์ค นั้นมีผลต่อ ค่าความต้านแรงดึง อย่างมีนัยสำคัญ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

เอกสารอ้างอิง

[1] ผศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช.โลหการวิศวกรรม.พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546: 378-381

[2] มนัส สถิรจินดา.โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536: 45-55

[3] ชวลิต เชียงกูล. โลหะวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2537: 115-116

[4] José A. Orlowski de Garcia and et.al "Characterization of titanium welded joints by the orbital gas tungsten arc welding process for aerospace application", Journal Aerospace Technology Management, São José dos Campos, Vol.2, No.2, Pages. 211-218, May-Aug., 2010

[5] H. Zuhailawati and et.al, "Spot Resistance Welding of a Titanium/Nickel Joint with Filler Metal", Welding Journal, Pages 101-104, May 2010.

[6] Nizamettin Kahraman, "The influence of welding parameters on the joint strength of

resistance spot-welded titanium sheets", Materials and Design, Vol. 28, Pages 420–427, 2007.

[7] Yuhua Chen, Changhua Liu and Geping Liu, "Study on the Joining of Titanium and Aluminum Dissimilar Alloys by Friction Stir Welding", The Open Materials Science Journal, Volume 5, Pages 256-261, 2011.

[8] มนตรี วะเศษสร้อย และ สันติรัฐ นันสะอาง, "การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรพารามิเตอร์ต่อการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1010 กรณีศึกษาการเชื่อมแบบต่อเกย 3 ชั้น", การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำ แพงแสน ครั้ง ที่ 9 ประจำปี 2555, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 6-7 ธันวาคม พ.ศ. 2555