



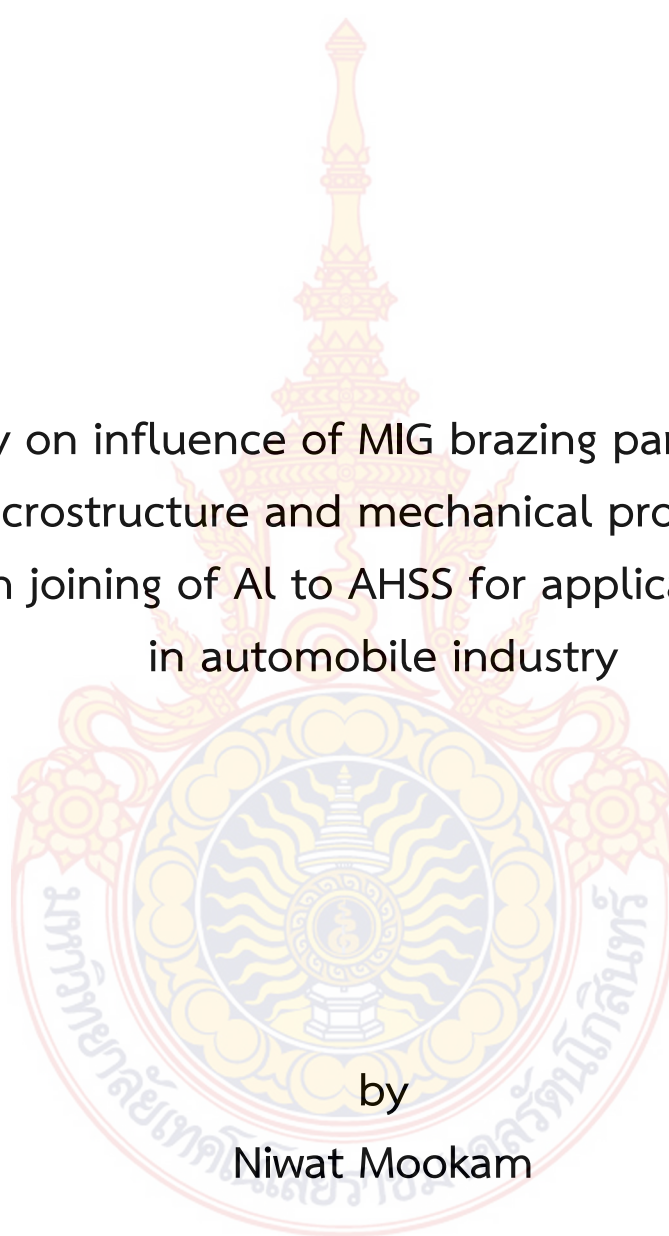
การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกต่อ
โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลในการเชื่อมประสาน
อลูมิเนียมเข้ากับเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษเพื่อประยุกต์ใช้
ในอุตสาหกรรมยานยนต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
โดย
นิวัฒน์ มูแกม

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2557



A study on influence of MIG brazing parameters on
microstructure and mechanical properties
in joining of Al to AHSS for applications
in automobile industry

by

Niwat Mookam

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

Granted by
Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2013

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลในการเชื่อมประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการเล่นประสานที่มีต่อคุณสมบัติทางกลในแง่ของความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมประสานตลอดจนโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีภายในรอยเชื่อมประสานที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการต่อวัสดุต่างชนิดในอุตสาหกรรมอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องตลอดจนการพัฒนากกรรมวิธีการต่อวัสดุแบบใหม่ๆ ต่อไปในอนาคต

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

นิวัฒน์ มุแก้ม

1 กันยายน 2557

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : A49/2557

ชื่อโครงการ : การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลในการเชื่อมประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์

ชื่อนักวิจัย : นายนิวัฒน์ มูแก้ม

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลในการเชื่อมประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ โดยตัวแปรการเล่นประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความเร็วในการเล่นประสาน กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสาน อัตราการป้อนโลหะเติม ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ช และมุมที่ใช้ในการเล่นประสาน การปรับปรุงกระบวนการต่อใช้เงื่อนไขการเล่นประสานที่เหมาะสม มาจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรการเล่นประสานที่เหมาะสมทำให้มีคุณสมบัติทางกลสูงเมื่อตรวจสอบโดยใช้วิธีทากูชิ จากการตรวจสอบพบ ความเร็วในการเล่นประสานที่ 500 mm/min กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสานที่ 25 A อัตราการป้อนโลหะเติมที่ 6.0 m/min ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ชที่ 1 mm และมุมที่ใช้ในการเล่นประสานที่ 90 ° มีความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดที่ 68.40 MPa.

ในการศึกษาผลปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ระหว่างพื้นผิวเมื่อเย็นเย็นผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM, EDS และ XRD ระหว่างการเล่นประสาน เกรนสารประกอบเกิดที่โลหะผสมโลหะเติม ขณะที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $FeAl_3Si_2$ เกิดขึ้นที่ระหว่างพื้นผิวของเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษและโลหะเติม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

คำสำคัญ: การเล่นประสานแบบมิก/ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ/เหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ

E-mail Address : niwat.moo@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ตุลาคม 2556 - 30 กันยายน 2557

Abstract

Code of project : A49/2014

Project name : A study on influence of MIG brazing parameters on microstructure and mechanical properties in joining of Al to AHSS for applications in automobile industry

Researcher name : Mr. Niwat Mookam

The aim of this research was to study on influence of MIG brazing parameters on microstructure and mechanical properties in joining of Al to AHSS. The brazing variables investigated in this study encompassed brazing speed, brazing current, filler metal feed rate, torch-plate distance, torch angle. The improvement of the joining process was accomplished using optimal brazing conditions obtained from statistics analysis. Results showed that, the optimal brazing parameters to maximize the mechanical properties were identified by using Taguchi method. From this investigation, it is found that the joints fabricated with the brazing speed of 500 mm/min, brazing current of 25 A, filler metal feed rate of 6.0 m/min, torch-plate distance of 1 mm, and torch angle of 90° the maximum shear strength of 68.40 MPa.

In this study, the possible reaction products at the interface were confirmed using SEM, EDS and XRD analysis. During brazing, intermetallic grains formed at the filler alloy. An intermetallic compound layer composed of FeAl_3Si_2 was formed at the interface of the advanced high-strength steels and filler metal.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

Keywords: MIG brazing/Intermetallic compound/AHSS

E-mail Address : niwat.moo@rmutr.ac.th

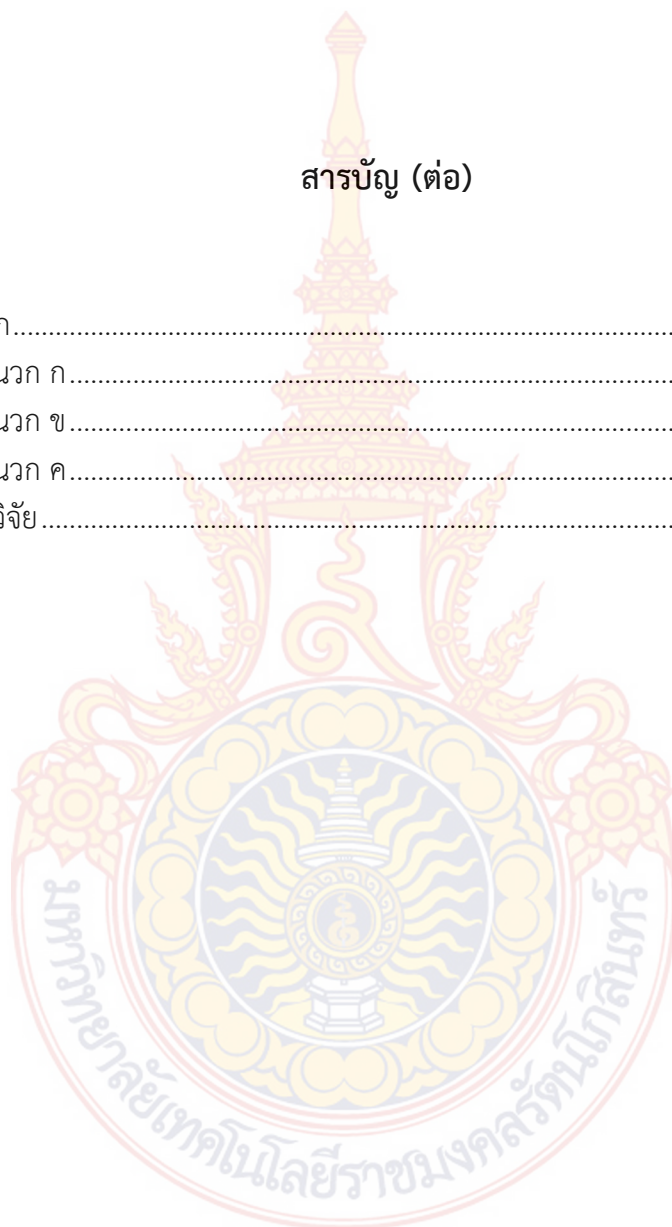
Period of project : 1 October 2013 – 30 September 2014

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่	
1 บทนำ	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
3. สมมุติฐานของการวิจัย	2
4. ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
5. นิยามศัพท์เฉพาะ	3
6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	3
7. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
1.1 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม	4
1.2 การเล่นประสาน	11
1.3 การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ	16
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย	23
1. การเตรียมอุปกรณ์และการทดลอง	23
2. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	29
4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	30
1. ขึ้นงานตัวอย่างหลังการเล่นประสาน	30
2. โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีหลังการเล่นประสาน	32
3. ความต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อหลังการเล่นประสาน	39
4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าความต้านทานแรงเฉือน	41
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	47
1. สรุปผลการวิจัย	47
2. ข้อเสนอแนะ	47
บรรณานุกรม	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก.....	51
ภาคผนวก ข.....	58
ภาคผนวก ค.....	66
ประวัติผู้วิจัย.....	76



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
1 การเชื่อมมิก.....	4
2 เครื่องเชื่อม MIG.....	5
3 ชุดป้อนลวด (a) แบบล้อขับเคลื่อน (b) แบบล้อขับเคลื่อนคู่	6
4 หัวเชื่อม	6
5 หัวทิฟเชื่อม.....	6
6 ลวดเชื่อม	7
7 แสดงแนวเชื่อม (a) แก๊สอาร์กอนปกคลุม และ (b) แก๊สฮีเลียมปกคลุม.....	8
8 ลักษณะแนวเชื่อม	9
9 การถ่ายโอนโลหะแบบกลีบบิวลาหรือหยดขนาดใหญ่.....	9
10 การถ่ายโอนโลหะแบบชอร์ตเซอร์กิตหรือแบบลัดวงจร	10
11 การถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์หรือแบบละออง	10
12 การถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์.....	11
13 รอยต่อชน	13
14 รอยต่อมุม	13
15 รอยต่อเกย	14
16 รอยต่อรูปตัวที	14
17 รอยต่อขอบ.....	15
18 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่อความแข็งแรงของรอยต่อ	15
19 การต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมกับเหล็ก	25
20 เครื่อง Wire – EDM	25
21 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงเฉือน.....	26
22 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์.....	26
23 เครื่องขัดชิ้นงาน.....	27
24 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงระดับมหภาค.....	27
25 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงระดับจุลภาค	27
26 การตรวจสอบขนาดความสูง (h) และความกว้าง (w) รอยแล่นประสานระดับมหภาค .	28
27 จำลองชิ้นสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ระหว่างรอยต่อ	28
28 SEM และ EDS	29
29 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	29
30 ชิ้นงานหลังการแล่นประสานโดยการกำหนดปัจจัยแตกต่างกัน	30
31 ตัวอย่างรอยต่อจากการแล่นประสานที่มีความต่อเนื่อง	31
32 ตัวอย่างรอยต่อจากการแล่นประสานที่ไม่ต่อเนื่อง.....	31
33 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนและโครงสร้างจุลภาค.....	31

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
34 องค์ประกอบของรอยต่อจากการแล่นประสาน.....	32
35 รอยต่ออลูมิเนียมและโลหะเติม	33
36 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเติม.....	33
37 บริเวณกระทบร้อนบนโลหะพื้นอลูมิเนียม	34
38 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะเติมและเหล็ก	34
39 SEM รอยต่อจากการแล่นประสาน.....	35
40 การ SEM บริเวณโลหะเติม	35
41 EDS ตำแหน่งที่ 1	36
42 EDS ตำแหน่งที่ 2	36
43 EDS แสดงการกระจายตัวของธาตุ Al, Si และ Fe.....	37
44 ผลการตรวจสอบ XRD.....	37
45 แผนภาพสมมูลเฟสระหว่าง Fe-Al.....	38
46 ความเค้นและความเครียดของสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Fe และ Al.....	38
47 ผลการทดสอบความต้านทานแรงเฉือน	39
48 ความต้านทานแรงเฉือนในหน่วย MPa.....	41
49 ความต้านทานแรงเฉือนในหน่วย N.....	41
50 การแจกแจงของข้อมูลจากการพล็อตระหว่าง Percent และ Residual	42
51 การกระจายตัวของข้อมูลจากการพล็อตกราฟระหว่าง Residual และ Observation Order	42
52 ความเป็นอิสระของข้อมูล	43
53 ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับ S/N ratios.....	45

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 เปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์และการ ออกแบบการทดลองตามแนวทางทากูชิ	17
2 การออกแบบการทดลองชนิด $L_4(2^3)$	17
3 การออกแบบการทดลองชนิด $L_9(3^4)$	17
4 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ (590 Y)	23
5 องค์ประกอบทางเคมีของอลูมิเนียม 6061	23
6 ตัวแปรที่ใช้ในการเล่นประสาน	24
7 ลำดับการทดลอง	24
8 ค่าความต้านทานแรงเหวี่ยงของรอยเล่นประสาน	40
9 ค่า S/N Ratio และค่า Mean ของค่าแรงเหวี่ยง	44
10 S/N-Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลองค่าแรงเหวี่ยง	45

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

บทที่ 1 บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กกล้าเป็นวัสดุที่มีศักยภาพเป็นอย่างมากสำหรับนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งส่วนประกอบของรถยนต์จะมีเหล็กมากกว่าร้อยละ 60 เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงประกอบกับมีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี เช่น เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel; HSS) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความแข็งแรง เหนียว ทนต่อแรงกระแทกได้ดีและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม อย่างไรก็ตามได้มีการปรับปรุงเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเป็นเหล็กแข็งแรงพิเศษ (Advanced High-Strength Steels: AHSS) ที่มีจุดเด่นด้านน้ำหนักซึ่งจะเบา กว่า HSS และให้ความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างแบบเดิม เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในการผลิตโครงสร้างของรถยนต์ เพื่อให้มีความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำในลักษณะการกระแทกหรือเกิดการชนของรถยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าแบบดั้งเดิม [1] ประกอบกับปัจจุบันผู้ผลิตรถยนต์มีการแข่งขันที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในประเด็นที่ผู้ผลิตรถยนต์ใช้เป็นจุดขาย คือ การผลิตรถยนต์ขนาดเล็กซึ่งเป็นรถยนต์ประหยัดพลังงานตามมาตรฐานสากลหรือ เรียกว่า อีโคคาร์ (ECO Car) ที่ยังคงคงการออกแบบโดยเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงไม่ด้อยกว่าวัสดุชนิดเดิมที่ใช้อยู่ แต่น้ำหนักรถยนต์จะต้องลดลงเพื่อตอบสนองการลดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงและอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งเป็นมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง [2, 3]

ดังนั้นปัจจัยที่สำคัญของการผลิตรถยนต์แบบดังกล่าวให้ได้มาตรฐานและสามารถลดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงวิธีหนึ่ง คือ การลดน้ำหนักของรถยนต์โดยการนำวัสดุชนิดอื่นๆมาทดแทนเพื่อลดปริมาณการใช้เหล็กกล้า เช่น อลูมิเนียมซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและต้านทานต่อการเกิดสนิมได้ดี แต่การนำวัสดุสองชนิดมาใช้ร่วมกันนั้นทำได้ยากโดยเฉพาะกับวิธีการเชื่อมหลอมแบบดั้งเดิม (Conventional Fusion Welding) ซึ่งจะเกิดปัญหาในกระบวนการเชื่อมประสาน เนื่องจากความแตกต่างของจุดหลอมเหลว คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุ [4, 5] โดยเฉพาะกับ AHSS ที่ประกอบด้วยโครงสร้างหลายเฟส (Multi-Phases) ได้แก่ เฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) เบนไนต์ (Bainite) และออสเทนไนต์ (Austenite) ในปริมาณเพียงพอต่อการทำให้เกิดคุณสมบัติทางกลเฉพาะ [6] เมื่อนำมาเชื่อมประสานซึ่งทำให้ง่ายต่อการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compounds) ระหว่าง Al-Fe ที่มีความแข็งแรงและเปราะสูงมากทำให้คุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมประสานลดลงเมื่อเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีบริเวณกว้าง [7, 8] ดังนั้นการลดปริมาณการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างรอยเชื่อมประสานด้วยวิธีการแล่นประสานจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ น่าสนใจและเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมยานยนต์

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเชื่อมประสานวัสดุต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษด้วยวิธีการแล่นประสานแบบมิก (MIG Brazing) โดยจะทำการศึกษาตัวแปรต่างๆได้แก่ กระแสไฟฟ้าในการแล่นประสาน มุมที่ใช้ในการแล่นประสาน อัตราเร็วในการแล่นประสาน อัตราการ

ป้อนโลหะเติม และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อม ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมประสาน

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการเล่นประสานที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีภายในรอยเชื่อมประสาน

2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการเล่นประสานที่มีต่อคุณสมบัติทางกลในแง่ความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมประสาน

2.3 เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมกับการเล่นประสานวัสดุทั้งสองชนิด

3. สมมุติฐานของการวิจัย

การต่อวัสดุโดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการเชื่อมแบบหลอม (Fusion Welding) เช่น การเชื่อมอาร์ค (Arc Welding) การเชื่อมความต้านทาน (Resistance Welding) และการเชื่อมแก๊ส (Oxyfuel Gas Welding) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป กระบวนการเหล่านี้ถึงแม้จะมีต้นทุนการผลิตไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser Beam Welding) และการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Welding) ซึ่งจัดเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูงโดยทำให้เกิดการหลอมเหลวของโลหะพื้นเพื่อประสานวัสดุให้เป็นชิ้นเดียวกัน ดังนั้นการหลอมละลายของวัสดุและโลหะเติมจึงจำเป็นต้องอาศัยพลังงานที่ถ่ายเทลงบนชิ้นงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว นอกจากบริเวณหลอมเหลว (Fusion Zone) แล้วโลหะพื้นจากการเชื่อมด้วยวิธีที่กล่าวมาแล้วยังเกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) จนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาซึ่งเกิดจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปริมาณของความร้อนที่ได้รับและระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ระยะห่างบริเวณที่เกิดการหลอมเหลว ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน อัตราการลดลงของอุณหภูมิและคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะพื้นนำมาเชื่อมประสาน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลมากกับการเชื่อมวัสดุต่างชนิด

สำหรับวิธีการเล่นประสานจะใช้ความร้อนต่ำกว่าการเชื่อมหลอม โดยกระบวนการเล่นประสานจะไม่ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะพื้นนำมาประสานเข้าด้วยกัน ดังนั้นการเล่นประสานจึงน่าจะสามารถเชื่อมประสานวัสดุต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียมกับเหล็กแข็งแรงพิเศษเข้ากันได้ดี ให้อายุเชื่อมที่มีความน่าเชื่อถือ สามารถป้องกันการเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและขนาดของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะลงได้ตามปริมาณความร้อนหรือความหนาแน่นของความร้อนที่ลดลง ดังนั้นการศึกษาถึงตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการเล่นประสานแบบมิกจะทำให้เข้าใจถึงกระบวนการเชื่อมประสานชนิดนี้ได้ดียิ่งขึ้นและเป็นความรู้ที่สำคัญทางโลหะวิทยาของการต่อวัสดุ

4. ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเล่นประสานแบบมิกระหว่างอลูมิเนียม 6061 กับแผ่นเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ (AHSS) โดยการต่อเกย (Lap Joint) ซึ่งใช้โลหะผสมแบบลวดเป็นโลหะเติมและใช้

แก๊สอาร์กอน (Ar) ปกคลุมแนวเชื่อมประสาน จากตัวแปรที่กำหนดในการทดลอง คือ (1) กระแสไฟฟ้าในการเล่นประสาน (2) มุมที่ใช้ในการเล่นประสาน (3) อัตราเร็วในการเล่นประสาน (4) อัตราการเติมลวด และ (5) ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อม เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมีและความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมประสานระหว่างวัสดุต่างชนิด

5. นิยามศัพท์เฉพาะ

5.1 การเล่นประสาน (Brazing) คือ การต่อวัสดุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 450°C แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของชิ้นงาน

5.2 การเล่นประสานแบบมิก (Mig Brazing) คือ การประยุกต์ใช้การเชื่อมแบบมิกสำหรับการเล่นประสานวัสดุต่างชนิด

5.3 โลหะเติม (Filler Metal) คือ โลหะผสมที่มีธาตุตั้งแต่สองชนิดเป็นต้นไปนำมาใช้ประสานวัสดุ

5.4 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) หมายถึง โครงสร้างของวัสดุในระดับไมครอน

5.5 สารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) หรือ สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก หมายถึง สารประกอบที่เกิดจากการรวมกันของธาตุตั้งแต่สองชนิด ซึ่งมีสัดส่วนจำนวนอะตอม องค์ประกอบที่แน่นอน

6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

6.1 ผลสำเร็จของงานวิจัยเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญทางโลหะวิทยาของการเล่นประสานวัสดุต่างชนิด

6.2 งานวิจัยสามารถนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ได้ทั้งในการประชุมวิชาการและวารสารวิชาการในระดับชาติ

6.3 หน่วยงานที่จะนำมาผลการวิจัยมาใช้ประโยชน์ คือ อุตสาหกรรมยานยนต์หรืออุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

7. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

การถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลจากการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย คือ ภาคอุตสาหกรรมยานยนต์หรืออุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้อง สามารถทำการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานลงในวารสารทางด้านเทคโนโลยีของประเทศไทยในรูปแบบของภาษาไทยเพื่อให้เข้าถึงกลุ่มเป้าหมายทุกระดับ

All rights reserved

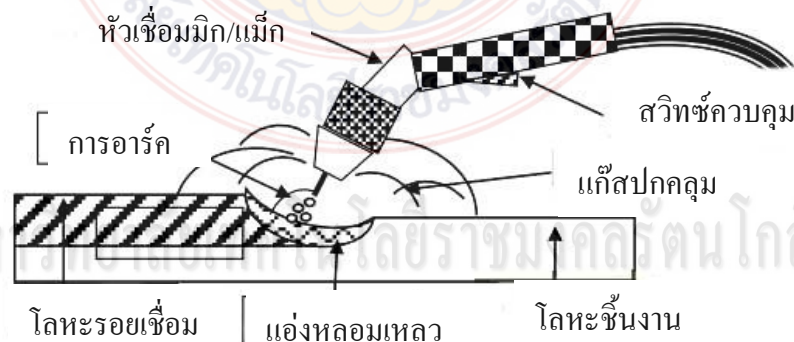
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้มีสองส่วนด้วยกัน คือ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ได้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในส่วนนี้จะทำให้ทราบผลการวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนแนวทางการทำวิจัยในกลุ่มเรื่องที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.1 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม [9]

การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal-Arc Welding) หรือ GMAW เป็นการเชื่อมที่นำมาทดแทนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยใช้อิเล็กโทรดเส้นเปลือยแบบลวดเปลือยแทน สามารถเชื่อมโลหะต่างๆ ได้หลายชนิดโดยเฉพาะอลูมิเนียม กระบวนการเชื่อม MIG ได้มีการพัฒนาให้สามารถเชื่อมได้ทั้งชนิดที่ควบคุมการเชื่อมด้วยมือและด้วยระบบอัตโนมัติ การเชื่อม MIG เป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความร้อนจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อม (Electrode) กับชิ้นงาน สำหรับลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมเส้นเปลือยแบบลวดเปลือยแข็งขนาดเล็กที่ส่งป้อนอย่างต่อเนื่องไปยังบริเวณอาร์คจะหลอมเหลวผิวโลหะชิ้นงานและปลายลวดเชื่อมให้เป็นหยดโลหะถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวของรอยเชื่อม บริเวณบ่อหลอมเหลวจะถูกปกคลุมไว้ด้วยแก๊สปกคลุมไม่ให้เกิดการรวมตัวกับอากาศซึ่งอาจจะเป็นแก๊สบริสุทธิ์หรือแก๊สผสมสำหรับกระบวนการแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การเชื่อมมิก [10]

สำหรับข้อดีของการเชื่อมด้วยวิธีนี้ มีดังนี้ (1) สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม (2) แนวเชื่อมจะไม่มีสแลคปกคลุมจึงไม่เสียเวลาในการเคาะสแลคออก (3) ไม่มีเขม่าและควันขณะเชื่อม (4) สามารถมองเห็นบ่อหลอมเหลวของการเชื่อมได้อย่างชัดเจน (5) การเชื่อมกระทำได้เร็วจึงประหยัดเวลาและลดต้นทุนการผลิต (6) งานเชื่อมมีการเสียรูปน้อย (7) มีคุณภาพของแนวเชื่อมสูง (8) สามารถเชื่อมงานที่มีระยะห่างรอยต่อ (Gap) มากๆ ได้อย่างต่อเนื่อง (9) ลวดเชื่อมเป็นม้วนยาวสามารถเชื่อมได้แนวยาวและไม่มีเศษปลายลวดเชื่อมที่ต้องทิ้งมากเหมือนกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

สำหรับข้อเสียประกอบด้วย (1) การใช้งานอุปกรณ์มีความซับซ้อนและไม่สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย (2) ไม่สามารถเชื่อมในบริเวณจำกัดได้ (3) ถ้าเชื่อมเหล็กที่สามารถชุบแข็งได้อาจทำให้แนวเชื่อมแตก เนื่องจากไม่มีสแลคปกคลุมแนวเชื่อมเพื่อช่วยลดอัตราการเย็นตัว (4) ไม่เหมาะกับงานสนามหรือภายนอกอาคารเนื่องจากลมจะพัดเอาแก๊สปกคลุมออกไป สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานเชื่อม MIG ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้ (1) เครื่องเชื่อม (Welding Machine) (2) เครื่องป้อนลวดและระบบควบคุม (Feed Control And Control System) (3) หัวเชื่อม (Torch) (4) แก๊สปกคลุม (Shielding Gas) และ (5) ลวดเชื่อมหรือลวดอิเล็กโทรด (Electrode Wire)

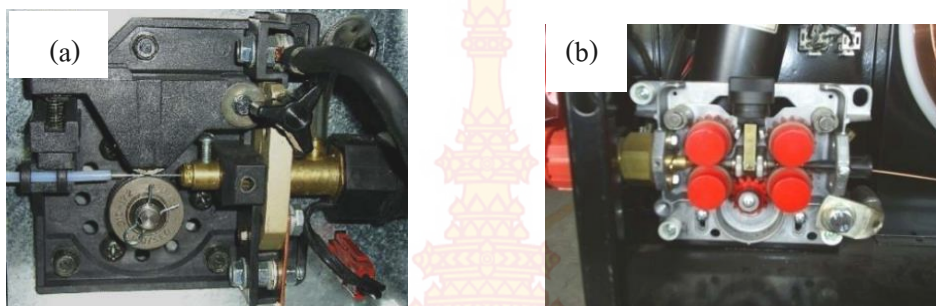
1.1.1 เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์

เครื่องเชื่อม MIG แสดงดังภาพที่ 2 เป็นเครื่องเชื่อมกระแสตรงต่อขั้ว (DCRP) ชนิดแรงเคลื่อนคงที่ (Constant Voltage) สำหรับกระแสตรงต่อขั้วตรง (DCSP) อาจจะมีใช้ไม่มากนักเนื่องจากเป็นกระแสไฟที่ทำให้การซึมลึกสำหรับการเชื่อมต่ำกว่าแบบ DCRP



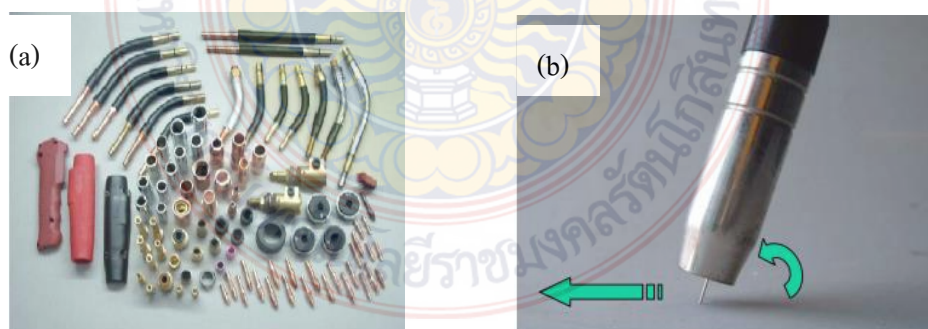
ภาพที่ 2 เครื่องเชื่อม MIG [9]

เครื่องป้อนลวดรวมอยู่ในชุดควบคุมซึ่งต่อโดยตรงกับเครื่องเชื่อม สำหรับเครื่องป้อนลวดเชื่อมมีอยู่ 2 ชนิด จึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับเครื่องเชื่อมและการนำไปใช้งาน สำหรับการเชื่อมแบบ MIG นั้นใช้เครื่องป้อนลวดชนิดความเร็วคงที่ (Constant Speed) ซึ่งเหมาะสมกับเครื่องเชื่อมแบบแรงเคลื่อนคงที่และลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กด้วย เครื่องป้อนลวดชนิดนี้จะมีสามารถปรับความเร็วของลวดซึ่งสามารถเลือกปรับได้ตามขนาดความเหมาะสมกับงานเชื่อม ชุดเครื่องป้อนลวดประกอบด้วยมอเตอร์สำหรับขับกลไกป้อนลวดจากขดลวดให้ออกสู่บริเวณปอหลอมเหลวที่ปลายหัวเชื่อม ซึ่งกลไกการขับลวดอาจเป็นระบบเฟืองก็ได้และสามารถเปลี่ยนใช้กับลวดแต่ละขนาดได้ในชุดควบคุมนี้จะมีโซลินอยด์ (Solenoids) ควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุมการอาร์คและน้ำระบายความร้อนที่หัวเชื่อมรวมอยู่ด้วยชุดป้อนลวดแสดงดังภาพที่ 3 (a) และ (b) สำหรับชุดป้อนลวดแบบล้อขับเดี่ยวและล้อขับคู่ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ชุดป้อนลวด (a) แบบล้อขับเคลื่อน (b) แบบล้อขับเคลื่อน [10]

หัวเชื่อมแบบ MIG แตกต่างจากหัวเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เนื่องจากหัวเชื่อมแบบ MIG ต้องจ่ายแก๊สปกคลุมบริเวณอาร์คและเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้ากับลวดเชื่อมสู่บริเวณอาร์ค หัวเชื่อมจะประกอบติดอยู่กับสายเชื่อมซึ่งสายเชื่อมนั้นจะเป็นทางผ่านแก๊สปกคลุมลวดเชื่อมและกระแสไฟฟ้า โดยภายในของสายเชื่อมที่ลวดผ่านจะทำด้วยเหล็กสปริงที่มีขนาดเป็นท่อและภายนอกจะหุ้มไว้ด้วยท่อพลาสติกลักษณะของหัวเชื่อมมีทั้งชนิดตัวตรงและหัวโค้งแสดงดังภาพที่ 4 (a) อุปกรณ์หัวเชื่อม (b) หัวเชื่อม



ภาพที่ 4 หัวเชื่อม [9]

หัวทิวเชื่อม (Contact Tip) ทำมาจากทองแดงหรือทองแดงผสมดังภาพที่ 5 ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของลวดเชื่อมไปยังตำแหน่งที่เชื่อม นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับลวดเชื่อมด้วยคุณสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้า



ภาพที่ 5 หัวทิวเชื่อม [10]

ลวดเชื่อมเป็นหัวใจสำคัญของการเชื่อม MIG ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสม ลวดเชื่อมจะหลอมผ่านเปลวอาร์คไปยังบ่อหลอมเหลวเกิดเป็นแนวเชื่อม ซึ่งลวดเชื่อมที่ผ่านเปลวอาร์คนั้นจะทำปฏิกิริยากับแก๊สปกคลุมจึงทำให้ส่วนผสมของลวดเปลี่ยนไปและจะมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางกลของรอยเชื่อม สำหรับลวดจะเป็นแบบสิ้นเปลือง (Consumable Electrode) ลักษณะของลวดเชื่อมเป็นเส้นโลหะเหมือนเส้นลวดไม่มีสารพอกหุ้ม เรียกว่า ลวดเปลือย (Solid Wire) ลวดเชื่อมจะถูกขับออกมาจากอุปกรณ์ควบคุมในอัตราเร็วที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่อง ถูกผลิตเป็นเส้นยาวขดไว้ในม้วนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่นิยมใช้ตั้งแต่ 0.8-12 mm แสดงดังภาพที่ 6 การเลือกลวดเชื่อมให้มีความสัมพันธ์เหมาะสมกับชิ้นงานนั้น สามารถเลือกตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น AWS หรือมาตรฐานอื่น ๆ เป็นต้น ดังนั้นการเลือกโลหะเติมสำหรับการนำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมประสานจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเช่นกัน



ภาพที่ 6 ลวดเชื่อม [9]

โลหะเติมเชื่อมประสาน (Brazing Filler Metal) สมบัติของลวดเชื่อมประสานที่ดีมีดังต่อไปนี้

1. สามารถให้รอยต่อที่มีสมบัติเชิงกลและทางกายภาพตามต้องการ
 2. มีจุดหลอมเหลวเหมาะสมกับโลหะงานและสามารถไหลตัวดี ถูกดึงดูดด้วยปฏิกิริยาแทรกซึม (Capillary Action) ได้ง่าย
 3. มีส่วนผสมสม่ำเสมอไม่แยกตัวขณะหลอมเหลว
 4. เกาะติดผิวโลหะงานได้ง่ายและแข็งแรง
 5. ไม่ควรทำปฏิกิริยากับโลหะงาน
- แก๊สปกคลุม [10]

แก๊สที่ใช้ปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมเหลวเพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากวัสดุงานรวมตัวกับออกซิเจน ไนโตรเจนและไอน้ำในอากาศ การหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวนั้นกระทำได้โดยการใช้แก๊สปกคลุม ซึ่งเดิมใช้แก๊สเฉื่อยจำพวกอาร์กอนและฮีเลียม แต่ปัจจุบันใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และออกซิเจนผสมกับแก๊สเฉื่อย กรรมวิธีการเชื่อมด้วยแก๊สคลุมที่นิยมเรียกตามลักษณะการใช้งานและตามชนิดของแก๊สที่ใช้ปกคลุมซึ่งมี 2 ชนิดดังต่อไปนี้

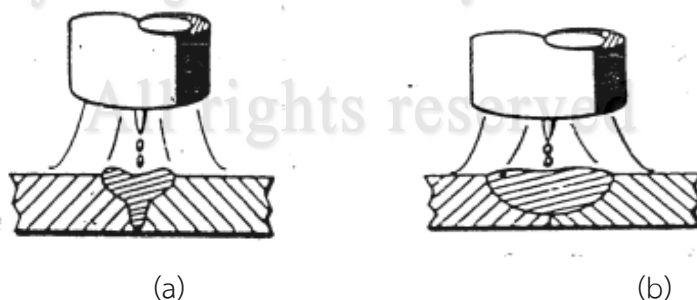
1. แม็ก (Metal Active Gas; MAG)

วิธีนี้แก๊สที่ใช้ คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งอยู่ในลักษณะของสารประกอบที่ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจน ซึ่งมีใช้เป็นแก๊สเฉื่อยเหมือนกับแก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม ดังนั้นในบริเวณที่มีความร้อนสูงจะเกิดออกซิเจนอิสระเมื่อใช้แก๊ส CO_2 เป็นแก๊สปกคลุมและเปลวอาร์คที่เกิดขึ้นจะกว้างกว่าการใช้แก๊สอาร์กอนแต่จะแคบกว่าการใช้แก๊สฮีเลียมแนวเชื่อมที่ปกคลุมด้วย CO_2 จะมีความกว้างปานกลาง ให้การซึมลึก การหลอมเหลว ลักษณะแนวเชื่อมที่ดีและไม่เกิดการกัดแหว่งที่ขอบแนวเชื่อม แต่สำหรับการใช้แก๊ส CO_2 จะเกิดเม็ดโลหะและอาร์คไม่สม่ำเสมอ

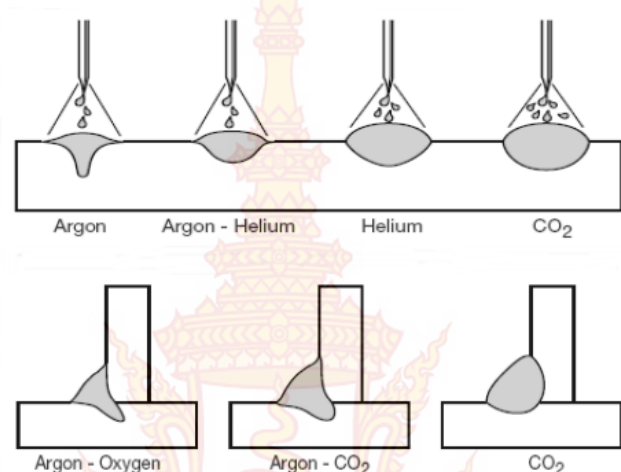
2. มิก (Metal Inert Gas; MIG)

วิธีนี้แก๊สที่ใช้ คือ แก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar) เป็นแก๊สที่มีความต่างศักย์ต่ำ ปฏิกิริยาที่ได้สะอาดเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะที่ผิวเป็นออกไซด์ได้ง่าย เช่น อลูมิเนียม อลูมิเนียมผสมและโลหะผสมที่มีส่วนผสมของอลูมิเนียมอยู่มาก การเริ่มต้นของการอาร์คทำได้ง่าย คงที่มากกว่าใช้แก๊สฮีเลียมเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะบาง ๆ ปริมาตรแก๊สต่ำ มีน้ำหนักมากกว่าอากาศจึงใช้แก๊สน้อยในการปกคลุมเมื่อเทียบกับแก๊สฮีเลียม แก๊สอาร์กอนมีอยู่ในบรรยากาศประมาณ 0.94 % ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและไม่ติดไฟ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกแก๊สอาร์กอนมาใช้เป็นแก๊สปกคลุมในการเล่นประสานแบบมิก

สำหรับแก๊สฮีเลียม (He) เป็นแก๊สที่มีความต่างศักย์สูงและให้ความร้อนสูงเหมาะสำหรับการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนามากกว่า 4.8 mm และโลหะที่ทนต่อความร้อนสูงๆ บริเวณที่รับความร้อนแคบจะมีความเร็วในการเชื่อมสูงซึ่งจะมีผลทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยและทำให้คุณสมบัติทางกลสูงด้วย ปริมาตรของแก๊สสูงมีน้ำหนักเบามากกว่าอากาศเหมาะสำหรับการเชื่อมทำเหนือศีรษะและทำตั้ง การเชื่อมแบบอัตโนมัติถ้าใช้ความเร็วในการเชื่อมมากกว่า 0.0106 m/s จะทำให้รอยเชื่อมเกิดฟองอากาศ สำหรับแก๊สอาร์กอน ฮีเลียม และ CO_2 สามารถใช้ได้โดยไม่ต้องผสมกับแก๊สอื่นใด หรืออาจจะผสมกับแก๊สอื่นๆ เพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สเฉื่อยที่นำความร้อนต่ำจึงเกิดเปลวอาร์คแคบและมีความเข้มข้นสูงทำให้งานได้รับพลังงานและความร้อนสูง ดังนั้นแนวเชื่อมที่ได้จะแคบและซึมลึกดีซึ่งแสดงดังภาพที่ 7 (a) และ (b) สำหรับลักษณะของแนวเชื่อมจากการใช้แก๊สแต่ละชนิดแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 7 แสดงแนวเชื่อม (a) แก๊สอาร์กอนปกคลุม และ (b) แก๊สฮีเลียมปกคลุม [11]



ภาพที่ 8 ลักษณะแนวเชื่อม [10]

การถ่ายโอนโลหะ (Metal Transfer)

การถ่ายโอนโลหะ (Metal Transfer) มี 4 แบบซึ่งมีดังต่อไปนี้

1. การถ่ายโอนโลหะแบบกล็อบบิวลาหรือหยดขนาดใหญ่ (Globular Transfer)

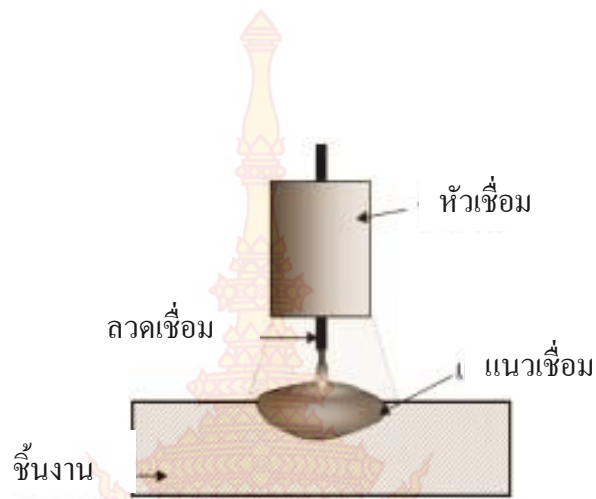
การถ่ายโอนโลหะแบบกล็อบบิวลาหรือหยดขนาดใหญ่ คือ ปลายลวดจะเป็นตุ่มขนาดใหญ่กว่าลวดและหยดลงในบ่อหลอมเหลวจะเกิดเม็ดโลหะ เช่น ใช้เชื่อมทำราบ ไม่เหมาะกับงานบางโดยการถ่ายโอนแสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การถ่ายโอนโลหะแบบกล็อบบิวลาหรือหยดขนาดใหญ่ [11]

2. การถ่ายโอนโลหะแบบชอร์ตเซอร์กิตหรือแบบลัดวงจร (Short Circuit Transfer)

การถ่ายโอนโลหะแบบชอร์ตเซอร์กิตหรือแบบลัดวงจร คือ ปลายลวดที่หลอมเหลวจะแตะกับบ่อหลอมเหลวหลายครั้งต่อวินาที การถ่ายโอนแบบนี้จะเกิดเม็ดโลหะใช้เชื่อมได้ทุกท่าเชื่อมสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การถ่ายโอนโลหะแบบชอร์ตเซอร์กิตหรือแบบลัดวงจร [11]

3. การถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์หรือแบบละออง (Spray Transfer)

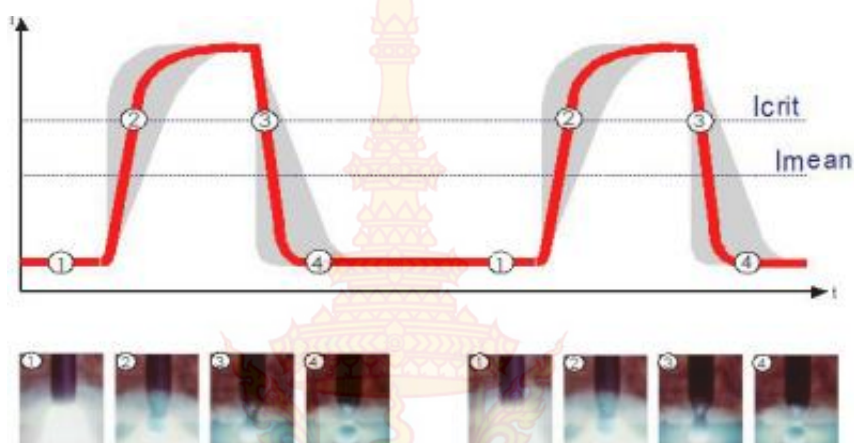
การถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์หรือแบบละออง คือ ละอองลวดที่หลอมเหลวจะเติมลงในบ่อหลอมเหลว โดยปรับโวลท์ (Volt) แอมแปร์ (Amp) สูงเกิดเม็ดโลหะน้อยใช้เชื่อมงานหนาในท่าราบและขนานนอนการถ่ายโอนโลหะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์หรือแบบละออง [11]

4. การถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์ (Pulsed)

การถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์ คือ เครื่องเชื่อมจ่ายกระแสแบบ Pulse และปรับโวลท์ (Volt) แอมแปร์ (Amp) ให้สูงเพื่อให้ถ่ายโอนโลหะแบบ Spray ทำให้งานไม่ร้อนเกินไปใช้เชื่อมได้ทุกท่าเชื่อมและทุกความหนาซึ่งแสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การถ่ายโอนโลหะแบบ พัลส์ [11]

1.2 การเล่นประสาน (Brazing)

การเล่นประสาน (Brazing) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะตั้งแต่สองชิ้นหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน โดยที่โลหะที่นำมาต่อจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ในกระบวนการให้ความร้อนแก่รอยต่อที่อุณหภูมิสูงกว่า 450°C แต่ไม่ถึงกับอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะพื้นๆที่นำมาเล่นประสานในกระบวนการใช้โลหะเติมที่เป็นโลหะที่ไม่อยู่ในจำพวกเหล็ก เช่น สวดเงินหรืออาจเป็นโลหะผสม เช่น สวดทองเหลือง สวดทองแดงผสมฟอสฟอรัสก็ได้ โดยที่โลหะเติมนี้เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450°C แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่นำมาทำการเล่นประสานเติมลงไป ที่รอยต่อของชิ้นงาน โลหะเติมจะหลอมเหลวและแทรกตัวซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างรอยต่อด้วยปฏิกิริยาคาปิลลารี (Capillary Action) สำหรับลักษณะงานที่ใช้การต่อโลหะด้วยวิธีการเล่นประสาน ได้แก่ งานต่อคมตัดคาร์ไบด์ติดกับด้ามมีด งานต่อท่อทองแดงในระบบเครื่องทำความเย็นและงานเชื่อมต่อท่ออลูมิเนียมบางๆ เป็นต้น [13]

1.2.1 วิธีการเล่นประสาน

กระบวนการเล่นประสานชิ้นงานต่างๆ มีอยู่หลายวิธีด้วยกันเมื่อพิจารณาตามวิธีให้ความร้อนแก่ชิ้นงานสามารถแบ่งกระบวนการเล่นประสานออกเป็นหลายวิธี ดังต่อไปนี้ [12]

การเล่นประสานด้วยเปลวไฟ (Flam Brazing หรือ Torch Brazing) ในการเล่นประสานด้วยวิธีนี้ชิ้นงานจะได้รับความร้อนโดยตรงจากเปลวไฟจนกระทั่งมีอุณหภูมิที่เหมาะสม จากนั้นจึงใส่โลหะเติมลงไปที่รอยต่อที่ต้องการประสานเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเล่นประสานโดยใช้เปลวไฟ ได้แก่ อะเซทิลีน (Acetylene) หรือ โพรเพน (Propane) ผสมกับออกซิเจนหรืออากาศ

การเล่นประสานในเตาอบ (Furnace Brazing) ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการเล่นประสานวิธีนี้มาจากเตาอบ โดยที่อุณหภูมิและบรรยากาศภายในเตาอบเป็นปัจจัยสำคัญในการเล่นประสานด้วยวิธีนี้ บรรยากาศในเตาอบจะควบคุมให้เป็นบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยหรืออาจเป็นสุญญากาศ การเล่นประสานด้วยวิธีนี้มักจะใช้เมื่อต้องการกำลัการผลิตตั้งแต่ระดับปานกลางจนถึงระดับสูง

การเชื่อมประสานโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Brazing) การเชื่อมประสานด้วยวิธีนี้ใช้ความร้อนจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำขึ้นงานและโลหะเติมจะถูกรวบรวมอยู่ในบริเวณที่ล้อมรอบด้วยขดลวดที่ผ่านไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วงที่ 5 kHz – 5 MHz และเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขึ้นงานและโลหะเติม การเชื่อมประสานด้วยวิธีนี้มักจะใช้ประสานชิ้นงานขนาดเล็ก

การเชื่อมประสานด้วยความต้านทาน (Resistance Brazing) เป็นการเชื่อมประสานที่ใช้ความร้อนจากความต้านทานทางไฟฟ้า ชิ้นงานจะต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยที่โลหะเติมจะถูกกดอยู่ระหว่างชิ้นงานขณะที่มีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับโลหะเติมจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นมาหลอมเหลวโลหะเติมนั้นโดยทั่วไปแล้วการเชื่อมประสานด้วยวิธีนี้มักใช้ประสานชิ้นงานขนาดเล็ก

การเชื่อมประสานโดยการจุ่ม (Dip Brazing) ในการเชื่อมประสานด้วยวิธีนี้ ชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมประสานจะถูกจุ่มลงในอ่างของโลหะเติมที่อยู่ในสภาพของเหลว เมื่อนำชิ้นงานขึ้นมาโลหะเติมนั้นก็จะแข็งตัวและประสานชิ้นงานเข้าด้วยกัน วิธีนี้สามารถใช้ประสานรอยต่อหลายๆตำแหน่งบนชิ้นงานเดียวกันได้โดยจุ่มเพียงครั้งเดียว

การเชื่อมประสานด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Brazing) การเชื่อมประสานด้วยวิธีนี้ความร้อนจากหลอดไฟอินฟราเรดที่มีความเข้มสูง ซึ่งสามารถให้พลังงานได้สูงถึง 500 W การเชื่อมประสานด้วยวิธีนี้จะค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆและใช้ได้กับชิ้นงานที่มีความหนาไม่มากนัก

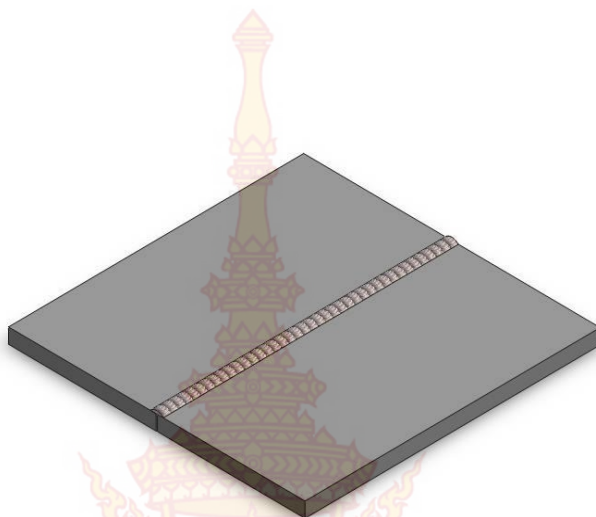
การเชื่อมประสาน (Braze Welding) การเชื่อมประสานด้วยวิธีนี้ต่างจากวิธีอื่นๆเนื่องจากเป็นการใช้โลหะเติมประสานลงในรอยต่อที่ใช้สำหรับงานเชื่อม (Welding) การเชื่อมประสานด้วยวิธีนี้จะใช้โลหะเติมเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับการเชื่อมประสานแบบอื่นๆการใช้งานการเชื่อมประสานด้วยวิธีนี้มักพบในงานซ่อมแซมชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักรกล

สำหรับกระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานติดกัน โดยที่ชิ้นงานไม่หลอมเหลวจะยึดติดกันโดยลวดเชื่อมที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 °F (425 °C) ลวดเชื่อมที่หลอมเหลวจะไหลเข้าไปในรอยต่อยึดชิ้นงานให้ติดกัน ซึ่งการเชื่อมประสานเหมาะสำหรับงานดังต่อไปนี้ คือ ใช้ยึดประกอบชิ้นงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนักใช้ยึดชิ้นงานที่ไม่ต้องการความนูนของรอยต่อเหมือนกับแนวที่เกิดจากการเชื่อม ชิ้นงานไม่เกิดการบิดตัวหลังจากการเชื่อมประสาน (Brazing) เพราะใช้ความร้อนน้อย โครงสร้างภายในของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมประสานไม่มีการเปลี่ยนแปลง

1.2.2 รูปแบบของรอยต่อ (Types of Joints) [14]

รูปแบบของรอยต่อพื้นฐานสำหรับการต่อวัสดุโดยทั่วไปมี 5 แบบ ได้แก่

รอยต่อชน (Butt Joint) คือ การนำชิ้นงานสองชิ้นมาชนกัน โดยขอบของชิ้นงานทั้งสองต้องอยู่ในระดับเดียวกันแสดงดังภาพที่ 13



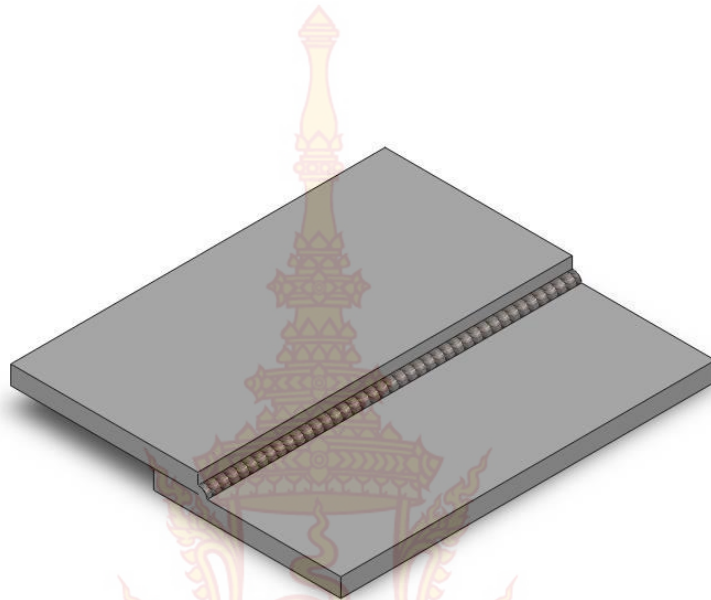
ภาพที่ 13 รอยต่อชน

รอยต่อมุม (Corner Joint) คือ การนำขอบของชิ้นงานทั้งสองชิ้นมาวางตั้งฉากกัน สามารถเชื่อมได้ทั้งมุมภายนอกและมุมภายในแสดงดังภาพที่ 14



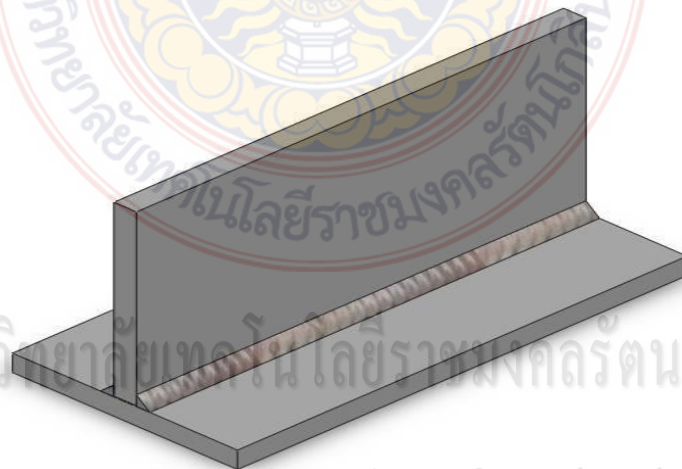
ภาพที่ 14 รอยต่อมุม

รอยต่อเกย (Lap Joint) คือ การนำชิ้นงานสองชิ้นมาวางในลักษณะซ้อนเกยกัน และเชื่อมบริเวณขอบของชิ้นงานที่เกยซ้อนอยู่ นิยมใช้กันมากในงานเล่นประสานแสดงดังภาพที่ 15



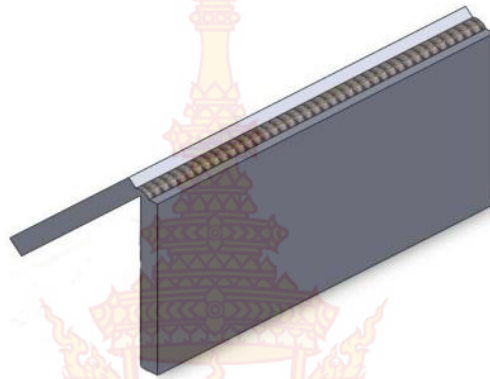
ภาพที่ 15 รอยต่อเกย

รอยต่อรูปตัวที (T-Joint) คือ การนำขอบของชิ้นงานชิ้นหนึ่งวางตั้งฉากอยู่ด้านบนผิวชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งให้มีลักษณะเป็นรูปตัวอักษร T บางครั้งจะบากชิ้นงานชิ้นที่นำมาวางตั้งฉากทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานรอยต่อแสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 รอยต่อรูปตัวที

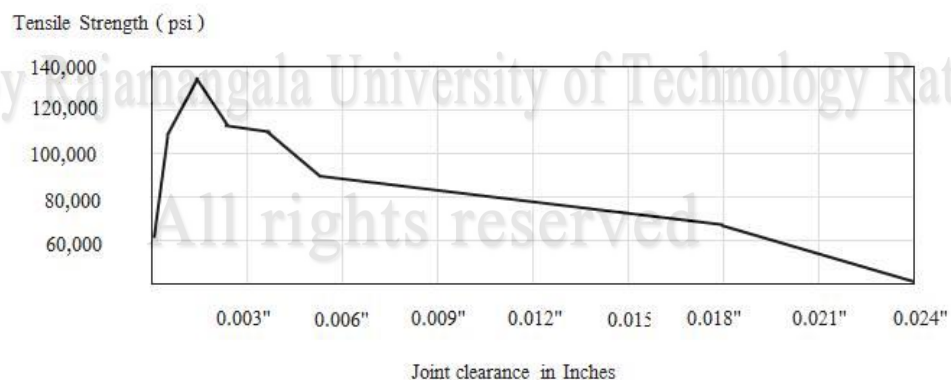
รอยต่อขอบ (Edge Joint) คือ การนำขอบของชิ้นงานสองชิ้นมาชนในลักษณะให้ผิวงานทั้งสองชิ้นทาบแนบชิดกันขอบของงานทั้งสองจะชิดและขนานกันไปตลอดแนวแสดงดังภาพที่



ภาพที่ 17 รอยต่อขอบ

1.2.3 การเว้นช่องรอยต่อ (Gap)

การเว้นช่องรอยต่อระหว่างชิ้นงานต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง ต้องเว้นช่องให้เล็กน้อยที่เกิดปฏิกิริยาแทรกซึมได้ดี ไม่เว้นช่องใหญ่เกินไป เพราะนอกจากจะได้รอยแล่นประสานที่ไม่แข็งแรงการเว้นช่องรอยต่อยังขึ้นกับชนิดของโลหะทั้งสองที่นำมาต่อกัน เนื่องจากการขยายตัวของโลหะจากความร้อน (สัมประสิทธิ์การขยายตัว) แต่ละชนิดไม่เท่ากัน การเกิดการแทรกซึมที่ดีจะขึ้นอยู่กับความหนืดของเหลวและระยะช่องรอยต่อ ดังนั้นการเว้นช่องรอยต่อของงานแล่นประสานต้องคำนึงถึงชนิดของโลหะเติมอีกด้วย ถ้าระยะ Gap น้อยความแข็งแรงของรอยต่อจะมากขึ้น ความแข็งแรงของรอยต่อแล่นประสานยังขึ้นอยู่กับการแทรกตัวของโลหะเติมที่แทรกเข้าไปในขอบเกรนของชิ้นงานอีกด้วย ปริมาณการแทรกตัวขึ้นอยู่กับชนิดของลวดแล่นประสาน ชนิดของโลหะงานและเวลาที่ได้รับความร้อนก็เหมือนกัน โดยภาพที่ 18 แสดงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่อค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อที่เกิดจากการแล่นประสานด้วยระยะห่างระหว่างชิ้นงานที่ต่างกัน ในการแล่นประสานจะมีระยะห่างระหว่างชิ้นงานที่เหมาะสม (Optimum Clearance) ที่ทำให้ได้รอยประสานที่แข็งแรงที่สุด [12]



ภาพที่ 18 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างชิ้นงานต่อความแข็งแรงของรอยต่อ [15]

อย่างไรก็ตามในกระบวนการเล่นประสานโดยการประยุกต์การเชื่อมแบบมิกมาใช้ ยังมีปัจจัยที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่ออีกหลายปัจจัย เช่น ความสะอาดของพื้นผิว ชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของโลหะพื้นและโลหะเติมหรือตัวแปรจากการปรับตั้งค่าจากเครื่อง เช่น กระแสไฟฟ้าในการเล่นประสาน มุมที่ใช้ในการเล่นประสาน อัตราเร็วในการเล่นประสาน อัตราการเติมลวดและระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อมหรือหัวเทอร์ช เป็นต้น ดังนั้นสำหรับการทดลองจึงต้องใช้วิธีการทางสถิติมาช่วยในการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผล เพื่อเลือกตัวแปรที่เหมาะสมกับกระบวนการซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

1.3 การออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ (Taguchi) [16]

ปัจจุบันทฤษฎีหรือแนวทางปฏิบัติของ “ทาคุชิ” ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นลักษณะงานหรือลักษณะปัญหาเชิงเดียวหรือไม่ซับซ้อนจนถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับงานหรือลักษณะปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อนและรวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานด้านบริหารจัดการ รวมถึงหลักเศรษฐศาสตร์และการบริหารธุรกิจโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะค้นหาวิธีการหรือคำตอบที่ดีที่สุด แต่ในขณะเดียวกันก็ไม่ลืมที่จะพิจารณาวิธีการหรือทางออกอื่น ๆ หรือทางเลือกอื่นซึ่งมีความได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทฤษฎีอื่น ๆ ในการแก้ปัญหาหรือแนวทางของ “ทาคุชิ” นั้น สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การระดมความคิด คือ การที่บุคลากรในหน่วยงานซึ่งมีความรับผิดชอบในแต่ละด้านและรวมไปถึงผู้ดูแลและรับผิดชอบในด้านการตลาดมานั่งปรึกษาและออกความคิดเห็นเพื่อที่จะค้นหาลักษณะทางด้านคุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อลูกค้า รวมถึงการช่วยกันออกแบบปัจจัยหรือตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ

ขั้นตอนที่ 2 ทำการออกแบบการทดลองและทำการทดลองจริง

ขั้นตอนที่ 3 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองรวมถึงการกำหนดค่าที่ดีที่สุดของตัวแปร

ขั้นตอนที่ 4 ทำการผลิตจริงหรือปฏิบัติจริงเพื่อพิสูจน์ว่าตัวแปรที่เรากำหนดค่าที่ดีที่สุดนั้นสามารถนำมาซึ่งการแก้ไขปัญหาที่แท้จริงได้หรือไม่

ตัวอย่างการออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ 5 ตัวแปร สำหรับตัวแปรหรือปัจจัยแต่ละตัวสามารถกำหนดค่าระดับความแตกต่างได้ถึง 3 ระดับ เมื่อนำเอาข้อกำหนดในข้างต้นมาพิจารณาแล้วสามารถทำการทดลองได้ทั้งหมด $3^5 = 243$ การทดลอง โดยที่ไม่ซ้ำกันซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เรียกว่า การทดลองแบบสมบูรณ แต่ในขณะเดียวกันหากใช้วิธีการทดลองของทาคุชิโดยใช้หลักการ OA's ในการออกแบบการทดลองซึ่งผลที่ได้ คือ $L_{27}(3^5)$ ซึ่งหมายถึงจำนวนครั้งในการทดลองจะมีเพียง 27 การทดลองเท่านั้น โดยตารางที่ 1 จะแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ กับการออกแบบการทดลองตามแนวทฤษฎีทาคุชิและตารางที่ 2 ถึง 3 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างตารางการออกแบบการทดลองแบบ L_4 , L_9 และ L_{27} ตามลำดับ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบูรณ์และการออกแบบการทดลองตามแนวทางทากูชิ

OA	Factors	Level	Full Factorial
L ₄	3	2	8
L ₈	7	2	128
L ₉	4	3	81
L ₁₂	11	2	2,048
L ₁₇	13	3	1,594,323
L ₆₄	21	4	4.41×10^{12}
L ₈₁	40	4	1.2×10^{19}

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองชนิด L₄(2³)

Run	Factor		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

หมายเหตุ L₄(2³) หมายถึงการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 3 ปัจจัยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ

ตารางที่ 3 การออกแบบการทดลองชนิด L₉(3⁴)

Run	Factor			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

หมายเหตุ L₉(3⁴) การออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 4 ปัจจัยและแต่ละปัจจัยกำหนดให้มี 3 ระดับ

การทดลองจริงเป็นการทำให้บรรลุซึ่งผลสำเร็จและการปฏิบัติการทดลองนี้เป็นการหาค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์ โดยใช้กระบวนการ ผลการทดลองดิบจะถูกนำไปใส่ในตาราง โดยที่เครื่องชี้วัดการปฏิบัติสำหรับการทดลองทั้งหมดจะทำการแปลงให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของ Signal to Noise (S/N Ratio) โดยที่คุณลักษณะของ S/N Ratio สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ (1) Smaller – the – better type problem (2) Nominal – the – best – type problem และ (3) Larger – the – better type problem

Smaller – the – better type problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเป็นศูนย์ เช่น ต้องการให้เกิดข้อบกพร่องน้อยที่สุดในการผลิตคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ ต้องการให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุดจากโรงงานและต้องการให้เกิดการรั่วของกระแสไฟน้อยที่สุด เป็นต้น

Nominal – the – best – type problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับค่าที่ได้กำหนดไว้หรือเป็นค่าที่จำกัดไว้ เช่น ความหนาของโพลีซิลิคอนที่ต้องการมีค่าตามที่กำหนดไว้ในลักษณะที่มีคุณภาพ คือ สำหรับปัญหาแบบนี้เมื่อค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ความแปรปรวนก็จะเป็นศูนย์ด้วย ค่ามากที่สุดของ Nominal – the – best S/N Ratio จะใช้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของ y_i เมื่อ i คือ จำนวนครั้งของการทดลองที่อยู่ในช่วงจาก 1 ถึง n ครั้งสำหรับการนำมาใช้กับกระบวนการเล่นประสาน เช่น ตั้งค่ากระบวนการอย่างไรให้มีค่าความต้านทานแรงเฉือนตรงกับที่กำหนดไว้

Larger – the – better type problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดจะต้องมีค่าให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น ต้องการให้ความแข็งแรงของสายไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดมีค่าให้มากที่สุดหรือการนำมาใช้ในกระบวนการเล่นประสาน เช่น ต้องการให้มีความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด

แผนการออกแบบการทดลอง มีดังนี้

1. แผนการออกแบบการทดลองลาตินสแควร์ (Latin Square Design)
2. แผนการออกแบบการทดลองเนสต์เต็ด (Nested Design)
3. แผนการออกแบบการทดลองสปลิท-พล็อต (Split – Plot - Design)
4. แผนการออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

1.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) คือ เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความผันแปรที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อย ๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความผันแปร ความผันแปรที่เกิดในข้อมูลเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความผันแปรทั้งหมด} = \text{ความผันแปรจากปัจจัย} + \text{ความผันแปรโดยธรรมชาติ} \quad (1)$$

สมการที่ 1 ได้ข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความผันแปร โดยธรรมชาติหรือที่เรียกกันว่า ความผิดพลาดแบบสุ่มของข้อมูลเพียงอย่างเดียวแต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลาย ๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปร ดังนั้นความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูล จึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยของธรรมชาติของข้อมูลปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความผันแปรของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่ได้มีเพียงค่าเดียวแต่จะมีหลายค่าซึ่งเรียกว่า ระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริง ๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่าง ๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้น ๆ แล้วนำไปวิเคราะห์เพื่อดูว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญ หรือไม่เมื่อเทียบกับความผันแปรโดยธรรมชาติของตัวแปรตามและเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองมักจะต้องทำการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจงรูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปเฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดลอง แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกสุ่ม รูปแบบของการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปเฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดลอง แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกสุ่ม รูปแบบของการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย จากความผันแปรทั้งหมด = ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย + ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูลหรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_r = SS_{tr} + SS_E \quad (2)$$

โดยที่ SS_r คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด SS_{tr} คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัยและ SS_E คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความผันแปรของข้อมูลในการทดลองนั้นจะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรปรวน (Variance) ที่ดีที่สุด คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square : Ms) โดยที่ค่า Ms สามารถคำนวณได้จาก

$$Ms = SS/DF \quad (3)$$

เมื่อ SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square) และ DF คือ ชั้นของความอิสระ สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบกับค่าความผันแปรจึงสามารถหาได้จากสมการ

$$F = MS_{TY}/ME_E \quad (4)$$

เมื่อ MS_T คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย และ ME_E คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม เมื่อเปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า F_{α, v_1, v_2}

ถ้า $F \geq F_{\alpha, v_1, v_2}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$ ยอมรับ H_0

เมื่อ α คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) V_1 คือ ชั้นของความอิสระปัจจัยและ V_2 คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

1.3.2 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง เป็นเครื่องมือที่สำคัญในงานด้านวิศวกรรมสำหรับการเพิ่มสมรรถนะของวิธีการผลิตของกระบวนการ ซึ่งมักจะทำให้เกิดการพัฒนาในกระบวนการใหม่ การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองพัฒนากระบวนการสามารถพิจารณาในรูปแบบต่อไปนี้

- การเพิ่มผลผลิตของกระบวนการ
- การลดความผันแปรของกระบวนการและกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการ
- การลดเวลาที่ต้องใช้ในการพัฒนา
- การลดต้นทุนโดยรวมของกระบวนการ

วิธีการออกแบบการทดลองมีบทบาทอย่างมากในการออกแบบทางวิศวกร ทำให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมา การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการออกแบบวิศวกรรมจะรวมถึงสิ่งดังต่อไปนี้

- การประเมินและเปรียบเทียบของพื้นฐานการออกแบบ
- การประเมินทางเลือกของวัสดุ
- เลือกพารามิเตอร์ของการออกแบบที่เมื่อพารามิเตอร์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงจะไม่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์

การใช้การออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ สามารถส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายกว่า มีความน่าเชื่อถือ มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า และระยะเวลาในการออกแบบและผลิตภัณฑ์ใหม่สั้นกว่า

All rights reserved

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากปัญหาการต่อวัสดุต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กด้วยวิธีการเชื่อม หลอมซึ่งทำได้ยากและก่อให้เกิดปัญหาการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความแข็งและเปราะที่จะส่งผลต่อการลดคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมประสานได้ อย่างไรก็ตามการควบคุมขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างการต่อโลหะต่างชนิดสามารถทำได้โดยการใช้วิธีการเล่นประสาน [4] ผลงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อนได้แสดงให้เห็นถึงการนำวัสดุต่างชนิด เช่น อลูมิเนียมมาใช้ร่วมกับเหล็ก เช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์และเรือเดินสมุทร สามารถเชื่อมประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กได้โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) เป็นวิธีการเชื่อมในสถานะของแข็งวิธีหนึ่งที่สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดได้ แต่วิธีนี้การรวมกันของโลหะที่นำมาเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก รวมตัวเข้ากันได้ไม่ดีซึ่งจะเกิดจาก α -Fe (เฟอร์ไรต์) ที่มีเกรนละเอียด และสารประกอบของ Fe_2Al_5 ที่มีลักษณะบางและยาว เกิดความเครียดจากแรงเฉือน (Shear Strain) และความร้อนจากแรงเสียดทานในกระบวนการ ดังนั้นความเค้นตกค้าง (Strain Hardening) ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดรอยแตกที่ระหว่างรอยต่อได้ง่าย [5] การลดความเค้นตกค้างของรอยเชื่อมประสานจึงต้องเสียเวลาอบโดยใช้ความร้อนอย่างเหมาะสม หรือเรียกว่า การอบอ่อน (Annealing) เพื่อให้โครงสร้างกลับคืนสู่สภาพเดิมสำหรับเหล็กแข็งแรงพิเศษชนิด DP ที่นำมาใช้กับอุตสาหกรรมยานยนต์ โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยเมทริกซ์ของเฟอร์ไรต์และมาร์เทนไซต์ คุณสมบัติทางกลจึงขึ้นอยู่กับเฟสเฟอร์ไรต์และมาร์เทนไซต์และลักษณะโครงสร้าง เช่น ปริมาณการตกผลึกและลักษณะของเฟสมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กแข็งแรงพิเศษชนิด DP ซึ่งเฟสมาร์เทนไซต์ขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจะมีความเค้นตกค้างสูงทำให้คุณสมบัติด้านความเหนียวลดลง [6] ในกรณีการเชื่อมประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กโดยใช้เลเซอร์ (Laser) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถควบคุมความร้อนให้เกิดการหลอมเหลวเฉพาะส่วนและควบคุมการเจริญเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ดี แต่วิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์เหมาะกับการเชื่อมเฉพาะจุดและในกระบวนการมีต้นทุนสูง [7] ในกรณีการเล่นประสานแบบทิก (Tungsten Inert Gas; TIG) สำหรับเชื่อมอลูมิเนียมและเหล็กกล้าพบว่า เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ได้แก่ $FeAl_3$ มีความแข็งถึง 850 HV และ Fe_2Al_5 มีความแข็งถึง 1100 HV นอกจากนั้นยังเกิดปัญหาจากตำหนิที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เชื่อมติดกับโลหะพื้นเหล็กจนเกิดการขยายตัวของรอยแตกจากขอบเกรนไปยังเนื้อเกรน ปริมาณอะตอม Cr, Ni และ Cu ที่มีอยู่สามารถแทนที่ Fe ในสารประกอบเชิงโลหะ Fe_4Al_{13} ที่มีความแข็งถึง 890 HV ทำให้ลดความแข็งเปราะระหว่างเหล็กและรอยเชื่อมได้ แต่เกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากในกระบวนการจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างอลูมิเนียมในสถานะของเหลวกับเหล็กในสถานะของแข็งจึงยากต่อการแพร่ และสำหรับในโลหะพื้นอลูมิเนียมที่มีซิลิคอน (Si) ผสมอยู่จึงสามารถปรากฏชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Fe-Al-Si ได้ ซึ่งซิลิคอนที่ผสมอยู่หรือจากโลหะเติมสามารถควบคุมการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ อย่างไรก็ตามวิธีการเล่นประสานแบบ TIG จะใช้อุณหภูมิในการเล่นประสานสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียมและกระบวนการเชื่อมประสานมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจึงเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กในสถานะของแข็งกับโลหะเติมในสถานะของเหลว ซึ่งทำให้การเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นที่ระหว่างอลูมิเนียมและโลหะเติมได้ง่าย [8, 17, 18]

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเล่นประสานแบบมิก (Metal inert gas; MIG) ที่แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพบว่า มีการเผยแพร่ตีพิมพ์น้อยมาก ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ งานวิจัยของ Jin Park และคณะ [19] ได้นำอลูมิเนียม 6K21 เชื่อมประสานกับเหล็ก SPRC 440 โดยศึกษาความแตกต่างขั้วไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะ ของรอยเชื่อมประสาน ซึ่งพบว่า ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ปรากฏมีขนาดบาง เนื่องจากปริมาณความร้อนต่ำที่ตกกระทบบนโลหะพื้นจากการกำหนดขั้วอิเล็กโทรดแบบขั้วลบ ทำให้รอยเชื่อมประสานมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มมากขึ้น และงานวิจัยของ Muncut และคณะ [20] ได้ศึกษาตัวแปรในการเชื่อมประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กกล้าชุบสังกะสี ซึ่งผลพบว่า อิทธิพลของตัวแปรมีผลต่อ โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี และความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยระหว่างโลหะพื้นอลูมิเนียมกับโลหะเติมปรากฏชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Zn-Al ซึ่งมีช่องว่างและรอยแตกขนาดเล็กที่ระหว่างพื้นผิวเนื่องจากสังกะสีที่กระจายอยู่ในโครงสร้างจุลภาค และเกิดรอยแตกขยายตัวเนื่องจากการเย็นตัวโดยความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นจากการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ จากงานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ (Reliability) ของรอยเชื่อมประสานมีหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งโดยทั่วไปเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้จากกระบวนการ

ดังนั้นการศึกษาปัจจัยต่างๆในกระบวนการเล่นประสานแบบมิกที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกล ของการเล่นประสานอลูมิเนียมกับเหล็กแข็งแรงพิเศษจึงเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกที่มีต่อการเชื่อมประสาน อลูมิเนียมเข้ากับเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษสามารถแสดงกระบวนการและขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

1. การเตรียมอุปกรณ์และการทดลอง

สำหรับการเตรียมอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ นำเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ DP 590 และอลูมิเนียม 6061 มาตัดให้ได้ขนาด 10 x 10 cm ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 4 และ 5 สำหรับเหล็กและอลูมิเนียมตามลำดับ หลังจากทำการเตรียมชิ้นงานแล้วจึงนำเหล็ก (DP 590) และอลูมิเนียม 6061 มาทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) เพื่อทำความสะอาดพื้นผิว โลหะพื้น และก่อนการทดลองจะต้องทำการเตรียมเครื่องเชื่อมแบบ MIG/MAG ให้เหมาะกับการเล่นประสานซึ่งจะถูกกำหนดด้วยโลหะเติมที่มีความอ่อนนุ่มและมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ต่างๆให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยมีการเปลี่ยนอุปกรณ์ภายในเครื่อง ได้แก่ หัว ทิพเชื่อม ชุดขับเคลื่อนหรือโลหะเติมและสายประคองลวดหรือโลหะเติมเป็นต้น

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ (590 Y) [21]

องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ 590 Y								
C	Si	Mn	Al	P	S	Cu	Cr	N
0.09	0.35	0.89	0.04	0.015	0.008	0.025	0.022	0.0054

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของอลูมิเนียม 6061

องค์ประกอบทางเคมีของอลูมิเนียม 6061				
Si	Cu	Mg	Cr	Al
0.60	0.27	1.0	0.21	97.92

จากการกำหนดปรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 6 และลำดับการทดลองจากการแปลงค่าตัวแปรที่ใช้ในการเล่นประสานแสดงดังตารางที่ 7 เมื่อแปลงค่าเป็น -1, 0 และ 1 สำหรับการทดลองที่ระดับต่ำ ปานกลางและสูง โดยทำการเล่นประสานให้อลูมิเนียมอยู่ด้านบนเหล็กแสดงดังภาพที่ 19 ซึ่งในการจับยึดชิ้นงานจะต้องมีอุปกรณ์จับยึดเพื่อให้ชิ้นงานอยู่กับที่ โดยภายในอุปกรณ์จับยึดจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักด้วยกัน คือ (1) ฐานรองซึ่งทำมาจากเหล็กขนาด 10 x 300 x 200 mm และทำการเจาะรูเพื่อที่จะสามารถยึดติดลงบนแผ่นเหล็ก (2) ฐานรองทำมาจากทองแดงมีการเจาะรูเพื่อที่จะนำแก๊สมาทำการปกคลุมผิวด้านล่างและทำให้สามารถระบายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว (3) ตัว Toggle Clamp ใช้ในการจับชิ้นงานเพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการเคลื่อนที่ระหว่างรอยต่อ

ตารางที่ 6 ตัวแปรที่ใช้ในการเล่นประสาน

ปัจจัย	หน่วย	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (1)
1. ความเร็วในการเล่นประสาน (A)	mm/min	500	1,000	1,500
2. กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสาน (B)	A	25	50	75
3. อัตราการป้อนโลหะเติม (C)	m/min	4.0	6.0	8.0
4. ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ช (D)	mm	1.0	1.5	2.0
5. มุมที่ใช้ในการเล่นประสาน (E)	Degree	45	70	90

ตารางที่ 7 ลำดับการทดลอง

ลำดับ ที่	ความเร็วใน การเล่น ประสาน (mm/min)	กระแสไฟฟ้าใน การเล่น ประสาน (A)	อัตราการ ป้อนโลหะ เติม (m/min)	ระยะห่างระหว่างชิ้นงาน กับหัวทอร์ช (mm)	มุมที่ใช้ในการ เล่นประสาน (Degree)
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	-1	0
3	-1	-1	-1	-1	1
4	-1	0	0	0	-1
5	-1	0	0	0	0
6	-1	0	0	0	1
7	-1	1	1	1	-1
8	-1	1	1	1	0
9	-1	1	1	1	1
10	0	-1	0	1	-1
11	0	-1	0	1	0
12	0	-1	0	1	1
13	0	0	1	-1	-1
14	0	0	1	-1	0
15	0	0	1	-1	1
16	0	1	-1	0	-1

ตารางที่ 7 (ต่อ)

17	0	1	-1	0	0
18	0	1	-1	0	1
19	1	-1	1	0	-1
20	1	-1	1	0	0
21	1	-1	1	0	1
22	1	0	-1	1	-1
23	1	0	-1	1	0
24	1	0	-1	1	1
25	1	1	0	-1	-1
26	1	1	0	-1	0
27	1	1	0	-1	1

Al 6061

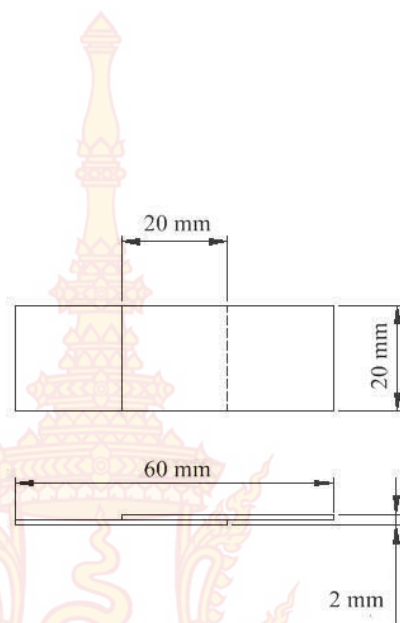
DP 590 steel

ภาพที่ 19 การต่อเคาะระหว่างอลูมิเนียมกับเหล็ก

หลังการแล่นประสานชิ้นงานจะถูกนำมาตรวจสอบความสมบูรณ์ด้วยสายตา เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยแล่นประสาน เช่น ความต่อเนื่องตลอดจนความสม่ำเสมอของแนวเชื่อม เป็นต้น และชิ้นงานอีกชุดหนึ่งจะนำมาตัดโดยใช้เครื่องตัดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดหรือ Wire - EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FA20S Advance แสดงดังภาพที่ 20 ซึ่งใช้ในการตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดกว้าง 20 mm และยาว 60 mm โดยออกแบบตามมาตรฐาน ASTM G31-72 แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 20 เครื่อง Wire - EDM



ภาพที่ 21 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงเหวี่ยง

หลังจากการแล่นประสานแล้วจะนำชิ้นงานที่ผ่านการตัดมาทดสอบความต้านทานแรงเหวี่ยง โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z020 แสดงดังภาพที่ 22 เพื่อหาค่าความต้านทานแรงเหวี่ยงของชิ้นงานที่ผ่านการแล่นประสาน ในการทดสอบจะทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบแรงเหวี่ยงโดยกำหนดความเร็วในการดึงคองที่ 0.5 mm/min



ภาพที่ 22 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์

จากนั้นนำชิ้นงานอีกชุดหนึ่งมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ก่อนตรวจสอบจะต้องมีการขัดผิวชิ้นงานซึ่งในขั้นตอนนี้จะนำตัวอย่างมาขัดด้วยกระดาษทรายโดยใช้เครื่องขัดแสดงดังภาพที่ 23 ในขณะที่ขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำตลอดเวลาเพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกและเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายเบอร์ต่อไปควรขัดชิ้นงานไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกัน หลังจากตัวอย่างมีผิวเรียบทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายเบอร์สุดท้าย ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้กระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 320, 600, 800, และ 1,200 ตามลำดับ และนำตัวอย่างที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายมาขัดด้วยผงอลูมินา (Al_2O_3) ขนาด 0.3 um บนผ้าสักหลาดและกัดด้วยสารละลายกรดประกอบด้วย 1 ml HF , 1.5 ml HCl , 2.5 ml

HNO_3 และ 95 ml H_2O กัดตัวอย่างโดยใช้เวลาประมาณ 3–5 s จึงนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในระดับมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ JENCO™ USA รุ่น V 203410 ดังภาพที่ 24 เช่นเดียวกันกับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายสูงขึ้น (ระดับจุลภาค) จะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX 60 M มีกำลังขยายตั้งแต่ 50 - 1,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 25



รูปที่ 23 เครื่องขัดชิ้นงาน

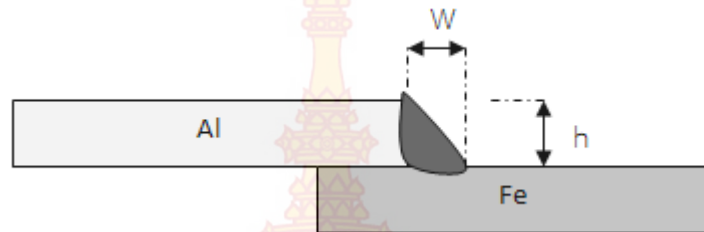


รูปที่ 24 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงระดับมหภาค



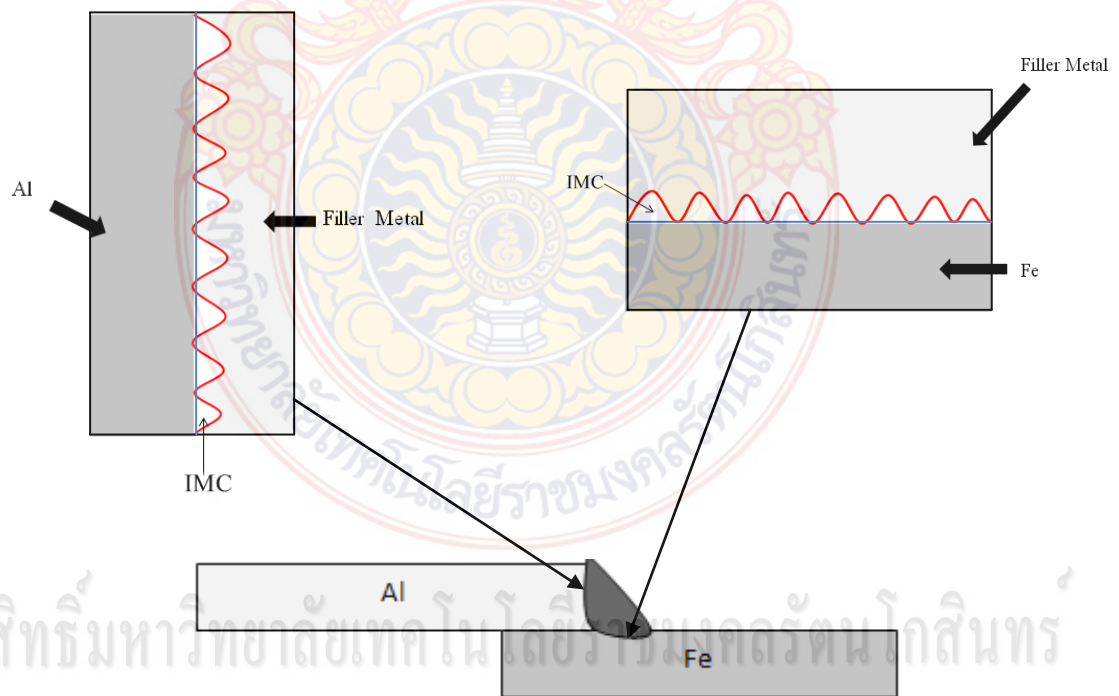
รูปที่ 25 กล้องจุลทรรศน์ระดับจุลภาค

ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ในระดับมหภาคแสดงตัวอย่างได้ดังภาพที่ 26 ทำให้สามารถทราบความกว้าง (w) และความสูงของ (h) จากการแล่นประสานได้เช่นกัน



ภาพที่ 26 การตรวจสอบขนาดความสูง (h) และความกว้าง (w) รอยแล่นประสานระดับมหภาค

ส่วนภาพถ่ายที่ได้จากการตรวจสอบในระดับจุลภาคสามารถแสดงให้เห็นโครงสร้างจุลภาค ลักษณะการกระจายตัวของเฟสและชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ดังภาพที่ 27 ตลอดจนขนาดเกรน



ภาพที่ 27 จำลองชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ระหว่างรอยต่อ

สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูงจะใช้ Scanning electron microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410 LV และใช้ Energy dispersive X-RAY Spectrometry (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น LINK ISIS 300 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแสดงดังภาพที่ 28 ในการศึกษาเฟสและตัวแปรโครงสร้างผลึกของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8-Discover แสดงดังภาพที่ 29



ภาพที่ 28 SEM และ EDS



ภาพที่ 29 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

2. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

หลังจากการทดลองและเก็บข้อมูลตามแผนการทดลองแล้วนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมกับการเล่นประสาน โดยใช้การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

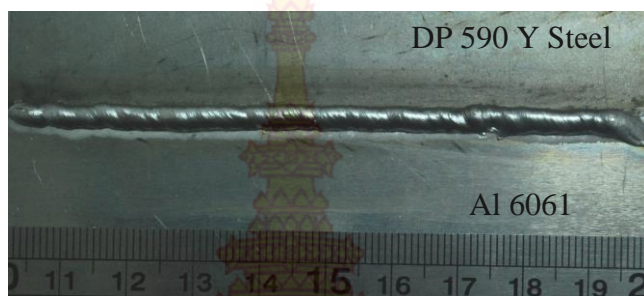
จากการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 5 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วในการเล่นประสาน กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสาน อัตราการป้อนโลหะเติม ระยะห่างหัวเทอร์ชและมุมในการเล่นประสาน โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลในกรณีค่าความต้านทานแรงเฉือนและโครงสร้างจุลภาคจากการเล่นประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

1. ชิ้นงานตัวอย่างหลังการเล่นประสาน

สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเล่นประสานลักษณะแนวเชื่อมประสานของรอยต่อแยกจากการกำหนดตัวแปรที่แตกต่างกันตามที่ออกแบบการทดลองไว้ ชิ้นงานตัวอย่างจากการทดลองแสดงดังภาพที่ 30 หลังการเล่นประสานในเบื้องต้นตรวจสอบรอยต่อจากการเล่นประสานแสดงดังภาพที่ 31 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีรอยต่อที่ค่อนข้างสมบูรณ์มีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองตัวแปรในกระบวนการที่ได้มาจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติจะทำให้มีบางสถานะของการเล่นประสานได้รอยต่อที่ไม่มีความต่อเนื่องและสมบูรณ์ซึ่งเกิดจากตัวแปรในกระบวนการ เช่น ภาพที่ 32 และจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อเช่นกัน



ภาพที่ 30 ชิ้นงานหลังการเล่นประสานโดยการกำหนดปัจจัยแตกต่างกัน

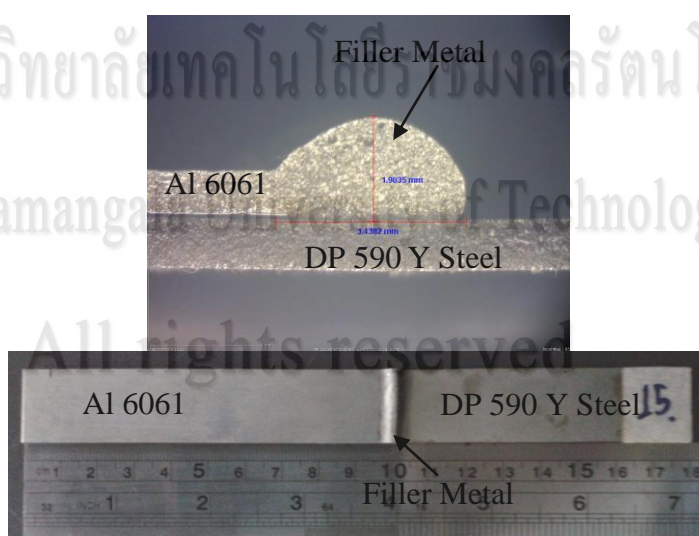


ภาพที่ 31 ตัวอย่างรอยต่อจากการแล่นประสานที่มีความต่อเนื่อง



ภาพที่ 32 ตัวอย่างรอยต่อจากการแล่นประสานที่ไม่ต่อเนื่อง

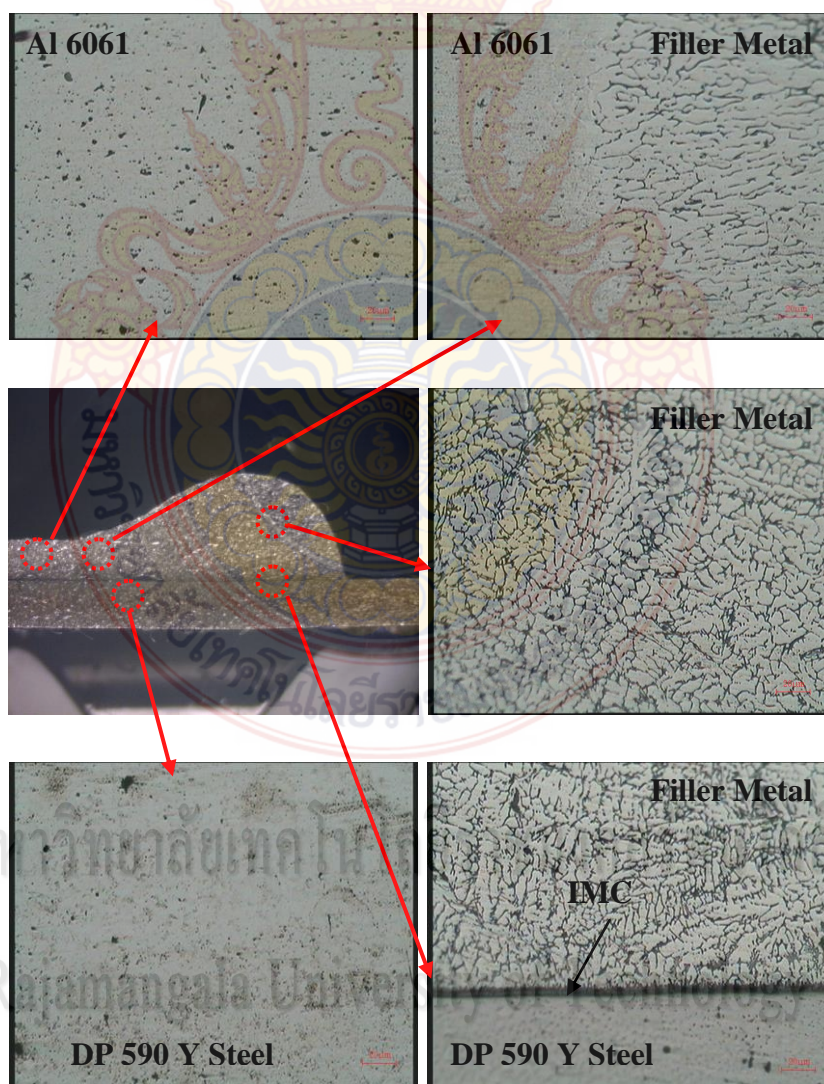
หลังการแล่นประสานชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดสำหรับนำไปใช้ทดสอบความต้านทานแรงเฉือนและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแสดงดังภาพที่ 33 โดยการตัดเตรียมตัวอย่างสำหรับนำไปใช้ทดสอบคุณสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะเลือกบริเวณส่วนกลางของตัวอย่างที่ได้จากการแล่นประสาน



ภาพที่ 33 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนและโครงสร้างจุลภาค

2. โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีหลังการแล่นประสาน

ในเบื้องต้นหลังการแล่นประสานเมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อจะแสดงให้เห็นลักษณะของรอยต่อจากการแล่นประสานของวัสดุที่เกิดซึ่งประกอบด้วย โลหะพื้นอลูมิเนียม 6061 (Al 6061 Substrate) โลหะพื้นเหล็ก DP 590 (DP 590 Steel Substrate) โลหะเติม (Filler Metal) และชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound; IMC) แสดงองค์ประกอบของรอยต่อดังภาพที่ 34



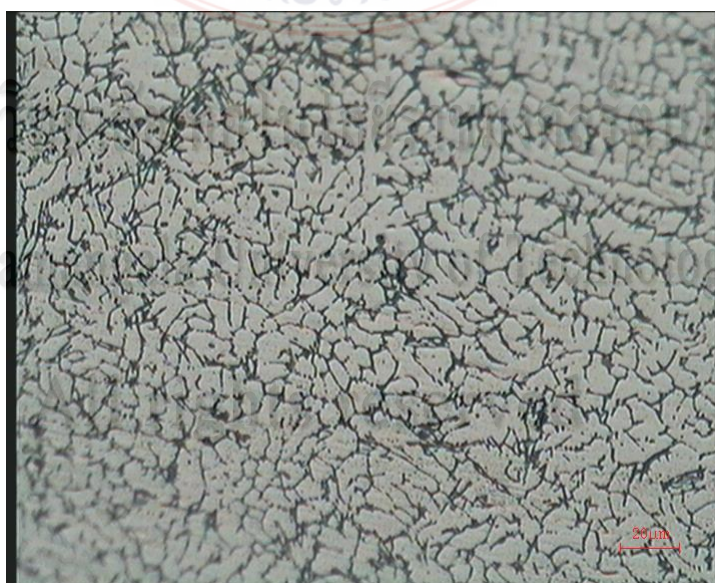
ภาพที่ 34 องค์ประกอบของรอยต่อจากการแล่นประสาน

สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างอลูมิเนียมและโลหะเติมเกิดการเชื่อมต่อกันได้ดีกว่าเหล็กและโลหะเติม เนื่องจากโลหะเติมมีส่วนผสมของอลูมิเนียมและซิลิคอนอยู่มากจึงทำให้เข้ากันง่ายกว่าเหล็ก การประสานเข้าด้วยกันของอลูมิเนียมและโลหะเติมแสดงดังภาพที่ 35 เกรนโลหะเติมมีทิศทางตั้งฉากกับอลูมิเนียมที่เกิดการละลายบางส่วนซึ่งแตกต่างกับในบริเวณโลหะเติมดังภาพที่ 36 ที่มีเกรน

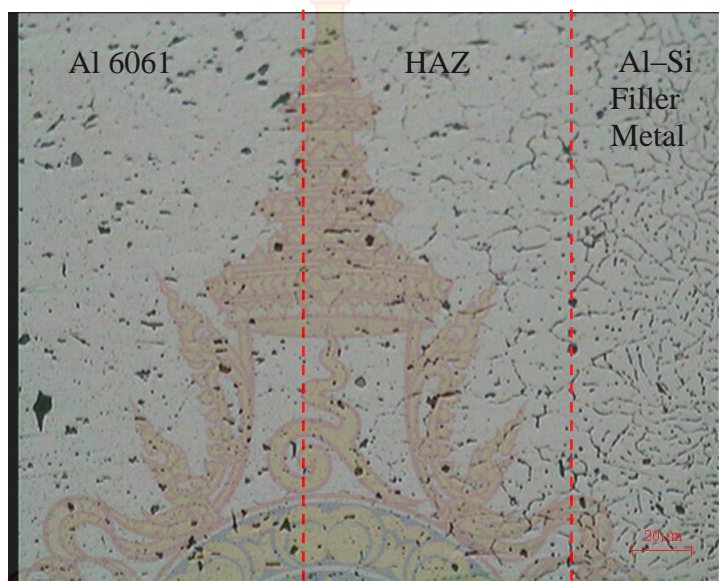
ละเอียดและมีทิศทางการเรียงตัวไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามก็ตามอิทธิพลของอุณหภูมิส่งผลให้บางตัวอย่างเกิดบริเวณกระทบร้อน (HAZ) สามารถเห็นได้ชัดเจนในเนื้ออลูมิเนียมซึ่งติดกับบริเวณที่มีการหลอมเหลวบางส่วนของอลูมิเนียมแสดงตัวอย่างดังภาพที่ 37 โดยบริเวณดังกล่าวจะเกิดการโตของเกรนเนื่องจากความร้อนในกระบวนการหล่อประสาน สำหรับการประสานเข้าด้วยกันระหว่างโลหะเติมและโลหะพื้นเหล็กที่ระหว่างพื้นผิวเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะที่ระหว่างพื้นผิวโลหะเติมและเหล็ก (Filler Metal/IMC/Steel) ตัวอย่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 38



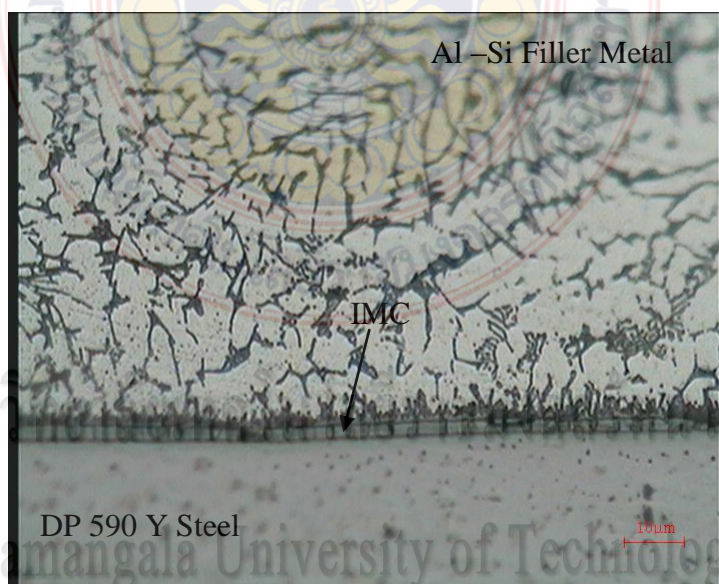
ภาพที่ 35 รอยต่ออลูมิเนียมและโลหะเติม



ภาพที่ 36 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเติม



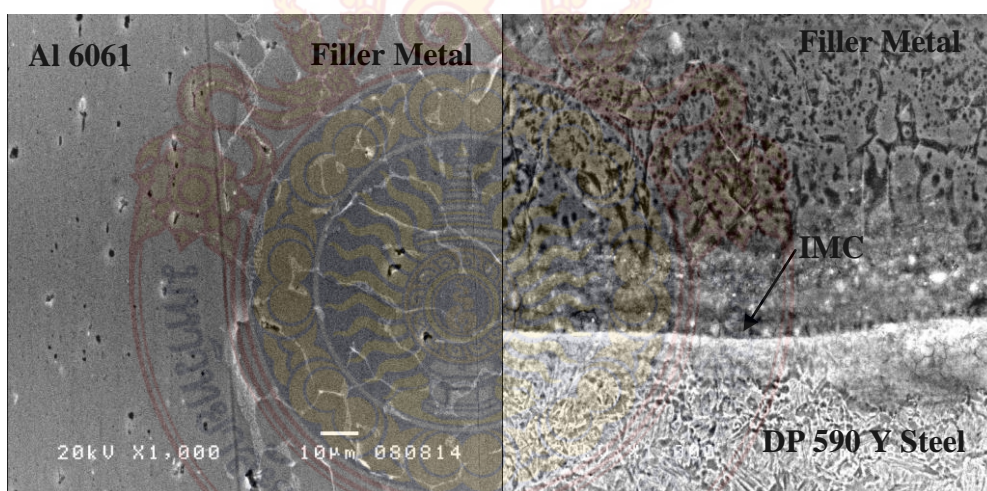
ภาพที่ 37 บริเวณกระตบร้อนบนโลหะพื้นอลูมิเนียม



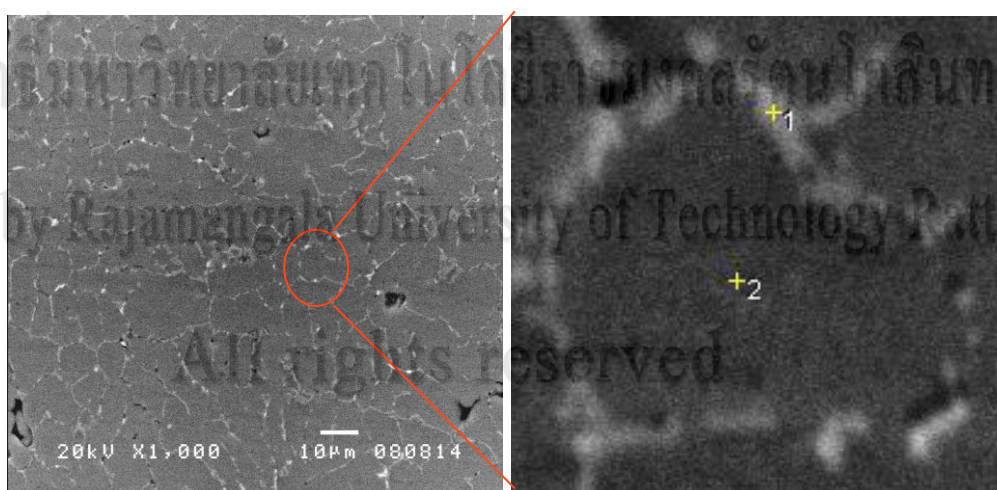
ภาพที่ 38 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะเต็มและเหล็ก

เมื่อนำตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดซึ่งได้มาจากการเลือกตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธีทางสถิติมาตรวจสอบซึ่งแสดงภาพถ่ายจากการทำ SEM ได้ดังภาพที่ 39 โดยในโลหะเต็มพบเฟสที่มีส่วนผสมของอลูมิเนียม ซิลิคอนและเหล็กบนปรากฏอยู่ทั่วพื้นผิวที่มีความเข้มข้นของอลูมิเนียมแสดงได้จากภาพถ่ายการทำ SEM ดังภาพที่ 40 เมื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ EDS ตำแหน่งที่ต่างกันแสดงดังภาพที่ 41 และ 42 สำหรับตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แสดงให้เห็นตำแหน่งที่ 1

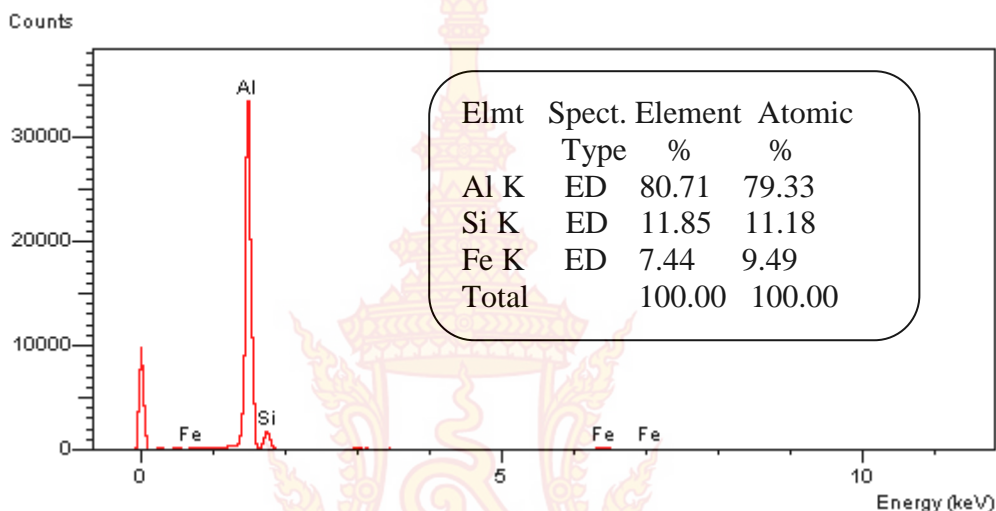
เกิดสารประกอบเชิงโลหะที่มีอัตราส่วนของอลูมิเนียม ซิลิคอนและเหล็ก เท่ากับ 80.71, 11.85 และ 7.44 wt. % ขณะที่ตำแหน่งที่ 2 เป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของอลูมิเนียมที่มีอยู่ถึง 97.76 wt. % และพบซิลิคอนเพียง 2.24 wt. % จากการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 43 สำหรับ Fe ที่พบในโลหะเติมเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่จากโลหะพื้นและจากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบสารประกอบเชิงโลหะ $FeAl_3Si_2$ ที่บริเวณรอยต่อจากการแล่นประสานผลการตรวจสอบแสดงดังภาพที่ 44 สำหรับซิลิคอนที่มีอยู่ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะทำให้รอยต่อมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นและซิลิคอนที่มีอยู่ในโลหะเติมช่วยให้การละลายของเหล็กในบริเวณที่หลอมละลายเพิ่มขึ้นและกลไกการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะถูกควบคุมโดยอะตอมของเหล็ก [18, 22]



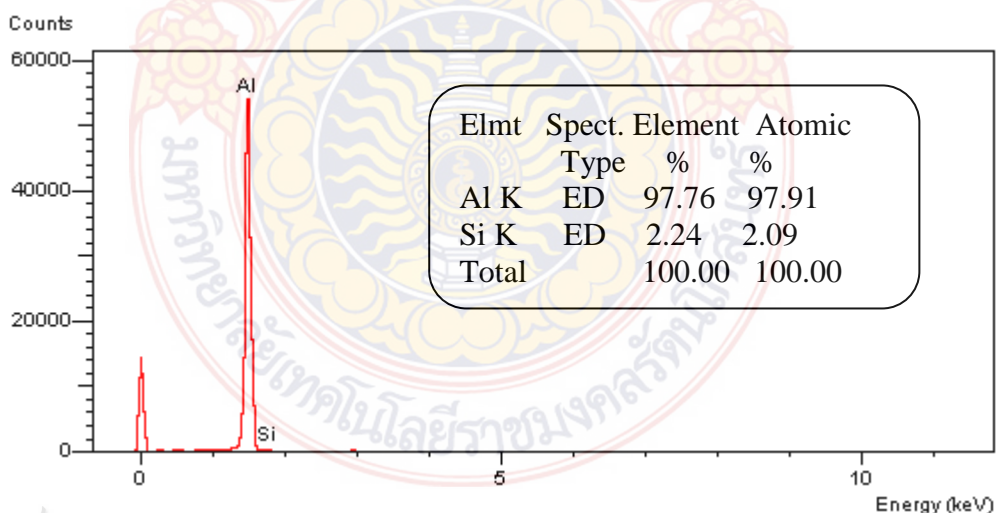
ภาพที่ 39 SEM รอยต่อจากการแล่นประสาน



ภาพที่ 40 SEM บริเวณโลหะเติม

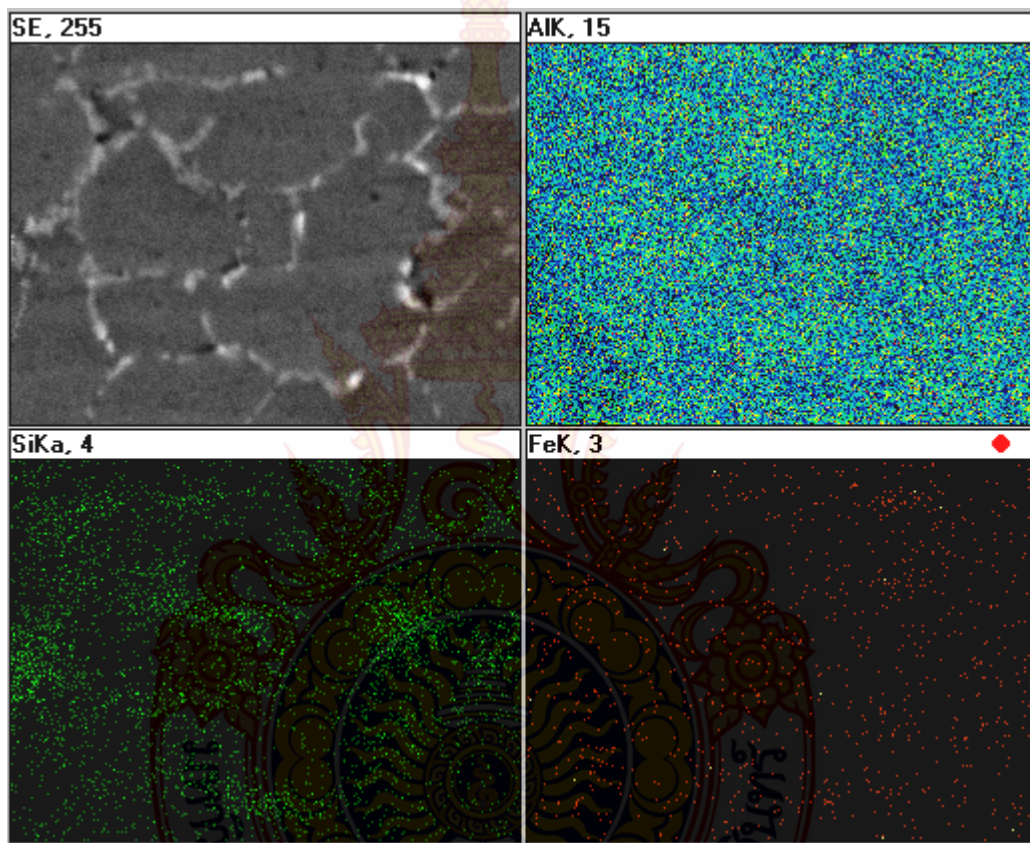


ภาพที่ 41 EDS ตำแหน่งที่ 1

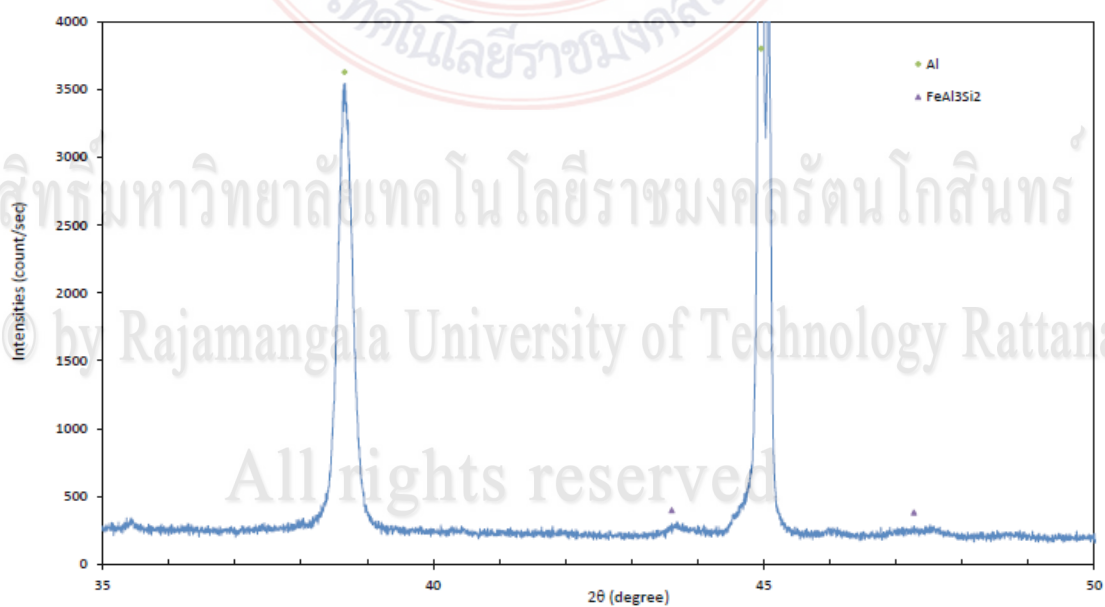


ภาพที่ 42 EDS ตำแหน่งที่ 2

จากแผนภาพสมมูลเฟสระหว่าง Fe และ Al จากภาพที่ 45 สามารถแสดงให้เห็นสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ของ α Fe และ Al โดยสารประกอบเชิงโลหะที่สามารถเกิดขึ้นได้ เช่น Fe_3Al , FeAl , Fe_2Al_3 , FeAl_2 , Fe_2Al_5 และ FeAl_3 ซึ่งจะพบมากสำหรับการต่ออลูมิเนียมและเหล็ก อย่างไรก็ตามโดยธรรมชาติชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงสูง โดย FeAl_3 มีความแข็งแรง 892 HV, Fe_2Al_5 มีความแข็งแรง 1013 HV, FeAl_2 มีความแข็งแรง 1060 HV, FeAl มีความแข็งแรง 470 HV และ Fe_3Al มีความแข็งแรง 350 HV [23] สำหรับ Fe_3Al และ FeAl จึงเป็นสารประกอบเชิงโลหะมีความต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานการกัดกร่อนได้ดีและมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงดีเป็นพิเศษ แต่สำหรับ FeAl_2 และ Fe_2Al_5 ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะที่มีอลูมิเนียมผสมอยู่สูงจะมีความเปราะ [24]

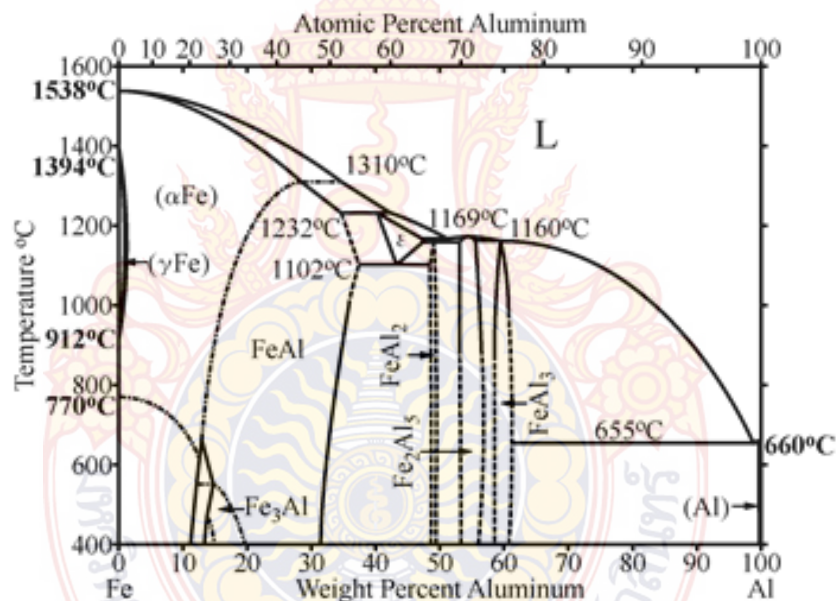


ภาพที่ 43 EDS แสดงการกระจายตัวของธาตุ Al, Si และ Fe

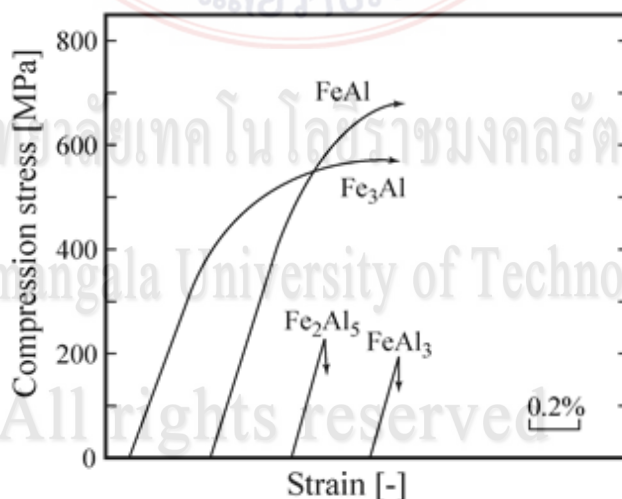


ภาพที่ 44 ผลการตรวจสอบ XRD

เมื่อเปรียบเทียบความเค้นและความเครียดของสารประกอบเชิงโลหะแสดงดังภาพที่ 46 สำหรับชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความเข้มข้นของอลูมิเนียมมีความแข็งและเปราะ ในขณะที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความเข้มข้นของเหล็กจะมีความเหนียวและมีความแข็งแรงสูง ดังนั้นการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความเหนียวมากจะทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงสูงด้วย [25]



ภาพที่ 45 แผนภาพสมดุลเฟสระหว่าง Fe-Al



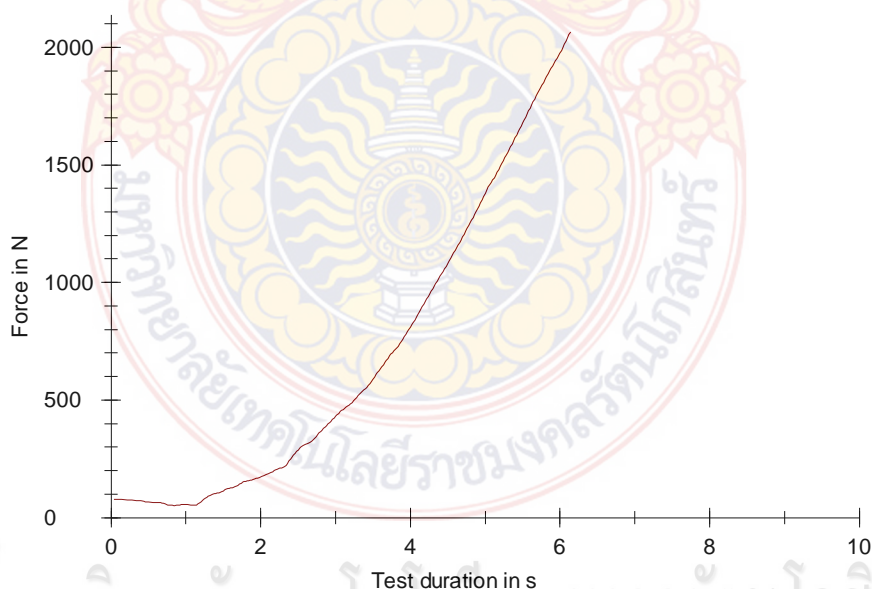
ภาพที่ 46 ความเค้นและความเครียดของสารประกอบเชิงโลหะระหว่าง Fe และ Al [25]

อย่างไรก็ตามที่ระหว่างรอยต่อเวลาการหลอมละลายของ Seem เป็นปัจจัยที่สำคัญของการควบคุมความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นที่ระหว่างรอยต่อ ซึ่งสามารถควบคุมได้โดย

กำหนดความเร็วในการเล่นประสาน โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะลดลงได้กับการเพิ่มความเร็วในการเล่นประสาน เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนที่ทำให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความร้อน [23]

3. ความต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อหลังการเล่นประสาน

ตัวอย่างผลการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อแสดงดังภาพที่ 47 จากการเก็บข้อมูลผลการทดลองที่ระดับต่างๆ ของแต่ละปัจจัย เมื่อกำหนดให้ A คือ ความเร็วในการเล่นประสาน B คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสาน C คือ อัตราการป้อนโลหะเติม D คือ ระยะห่างหัวทอร์ช และ E คือ มุมในการเล่นประสาน โดยกำหนดผลตอบสนองของค่าความต้านทานแรงเฉือนในหน่วยนิวตัน (N) และ MPa สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 8



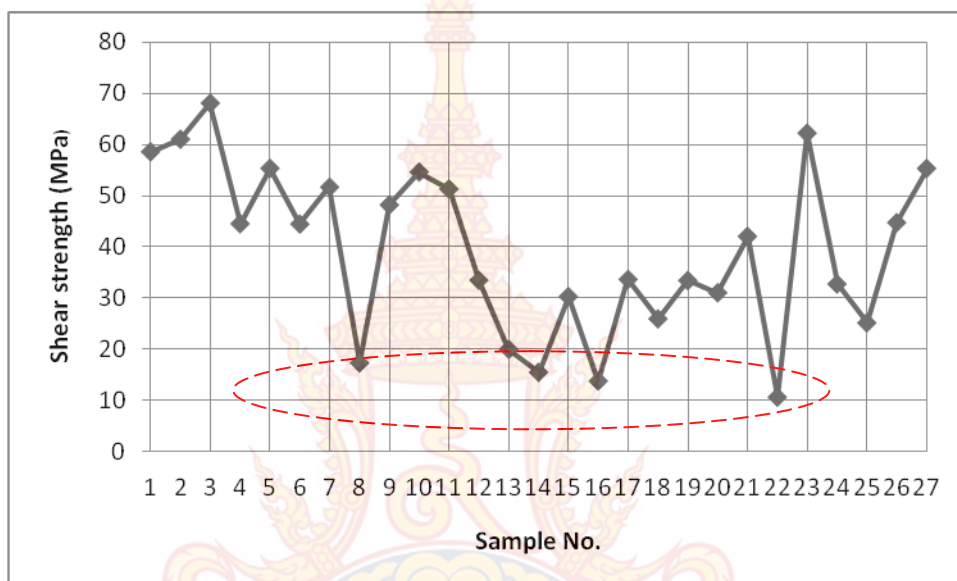
ภาพที่ 47 ผลการทดสอบความต้านทานแรงเฉือน

สำหรับผลการทดสอบความต้านทานแรงเฉือน ในกระบวนการทดลองซึ่งมีบางตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการที่ทำให้มีค่าความต้านทานแรงเฉือนค่อนข้างต่ำซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากภาพที่ 48 และ 49 บริเวณเส้นประซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีความแข็งแรงต่ำ

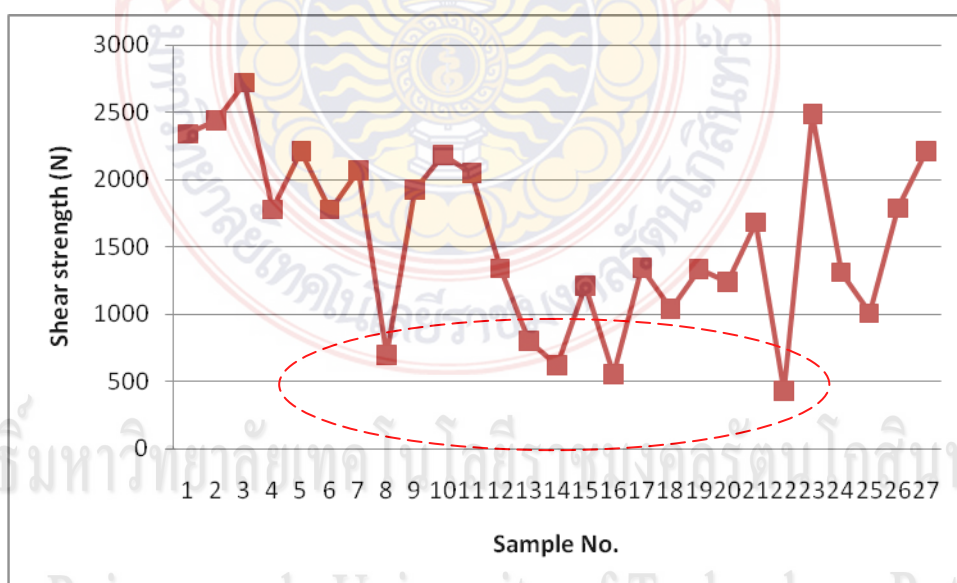
All rights reserved

ตารางที่ 8 ค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยแล่นประสาน

No.	A	B	C	D	E	Shear Strength(N)	Shear Strength (MPa)
1	-1	-1	-1	-1	-1	2340.31	58.51
2	-1	-1	-1	-1	0	2438.31	60.96
3	-1	-1	-1	-1	1	2719.35	67.98
4	-1	0	0	0	-1	1779.49	44.49
5	-1	0	0	0	0	2211.13	55.28
6	-1	0	0	0	1	1776.90	44.42
7	-1	1	1	1	-1	2065.33	51.63
8	-1	1	1	1	0	694.30	17.36
9	-1	1	1	1	1	1926.40	48.16
10	0	-1	0	1	-1	2183.10	54.58
11	0	-1	0	1	0	2050.28	51.26
12	0	-1	0	1	1	1338.88	33.47
13	0	0	1	-1	-1	800.05	20.00
14	0	0	1	-1	0	621.37	15.53
15	0	0	1	-1	1	1211.26	30.28
16	0	1	-1	0	-1	552.50	13.81
17	0	1	-1	0	0	1345.54	33.64
18	0	1	-1	0	1	1037.85	25.95
19	1	-1	1	0	-1	1336.81	33.42
20	1	-1	1	0	0	1241.33	31.03
21	1	-1	1	0	1	1681.05	42.03
22	1	0	-1	1	-1	427.30	10.68
23	1	0	-1	1	0	2485.99	62.15
24	1	0	-1	1	1	1309.54	32.74
25	1	1	0	-1	-1	1006.53	25.16
26	1	1	0	-1	0	1788.30	44.71
27	1	1	0	-1	1	2210.40	55.26



ภาพที่ 48 ความต้านทานแรงเฉือนในหน่วย MPa



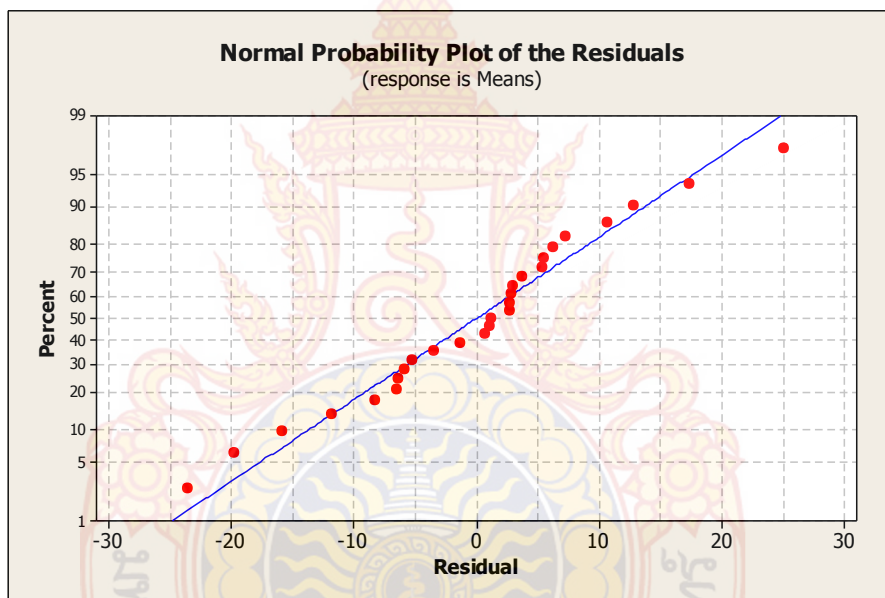
ภาพที่ 49 ความต้านทานแรงเฉือนในหน่วย N

4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าความต้านทานแรงเฉือน

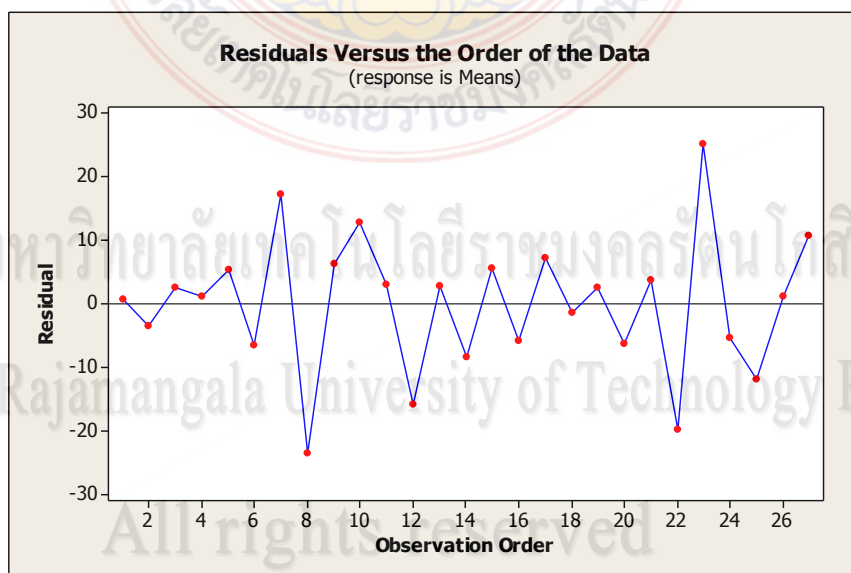
ในขั้นตอนนี้เมื่อนำผลค่าความต้านทานแรงเฉือนในหน่วย MPa มาตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้น ตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล (Model Adequa Checking) หาค่า S/N Ratio วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สามารถแสดงผลได้คือ

จากภาพที่ 50 การตรวจสอบข้อมูลจากผลการทดลอง สำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือน จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง จากภาพที่ 51 ค่า

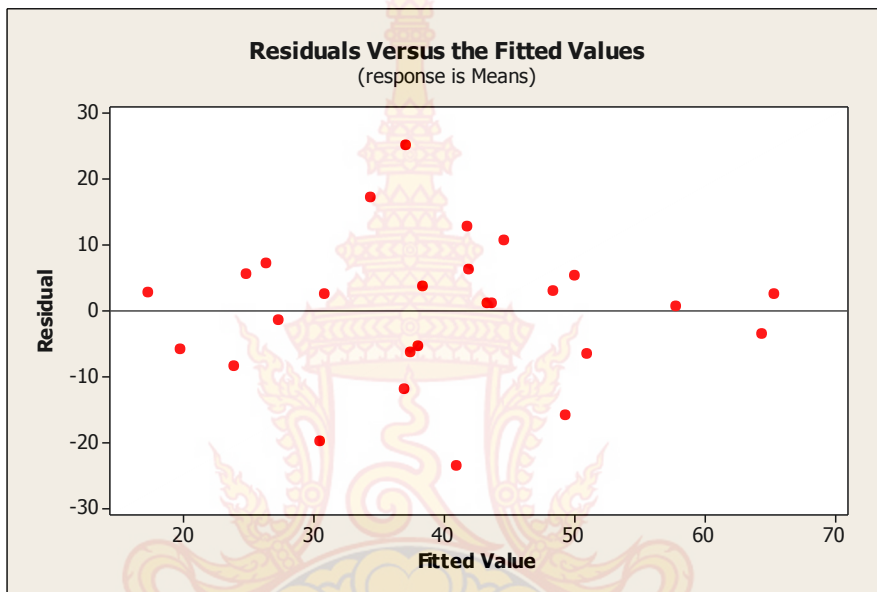
ส่วนตกค้างของค่าความต้านทานแรงเฉือนกับลำดับการเก็บข้อมูล เมื่อพิจารณาพบว่า ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใด ๆ ที่ผิดปกติ ข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกันและกระจายตัวแบบสุ่ม และจากภาพที่ 52 สรุปได้ว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูลและมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน



ภาพที่ 50 การแจกแจงของข้อมูลจากการพล็อตระหว่าง Percent และ Residual



ภาพที่ 51 การกระจายตัวของข้อมูลจากการพล็อตกราฟระหว่าง Residual และ Observation Order



ภาพที่ 52 ความเป็นอิสระของข้อมูล

ค่าอัตราส่วน S/N Ratio เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 8 มาใช้ในการหาค่า Taguchi คือ Larger the Better (S/N-Ratio) คำนวณได้จากสมการที่ (5) (ค่าตอบสนองที่มีค่ามากคือ ค่าที่ดีที่สุด) ได้ผลดังตารางที่ 9 และ 10 จากกฎของ Taguchi จุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/n-Ratio สูงสุด

$$S / N = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n [1 / y_i^2] / n \right) \tag{5}$$

เมื่อ S/N คือ อัตราส่วนของ S/N ในแต่ละ Experiment number, N คือ จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละ Experiment number และ y_j คือ ค่าตอบสนอง (Respond) ในแต่ละครั้งของการทดลองของแต่ละ Experiment number

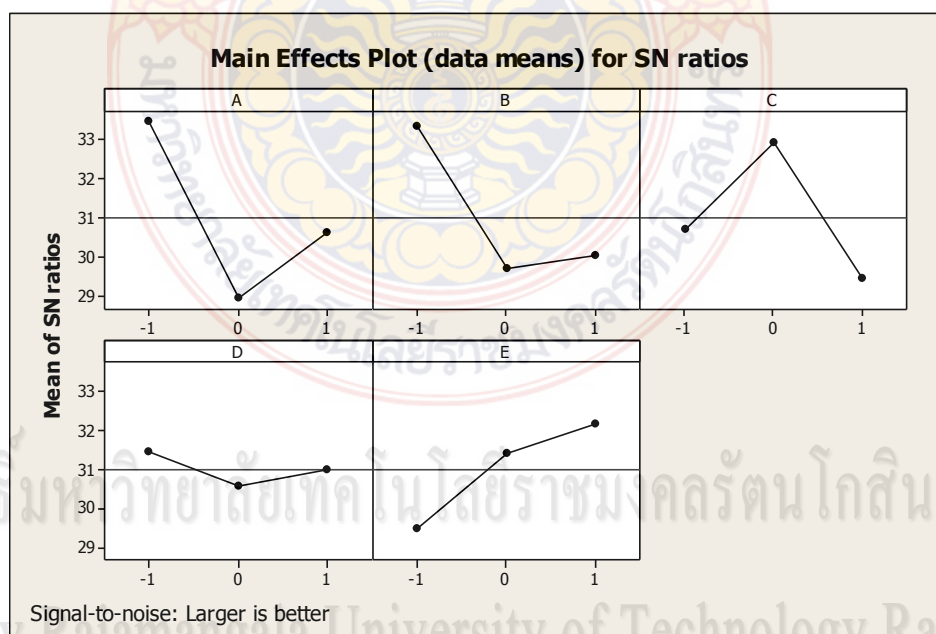
ตารางที่ 9 ค่า S/N Ratio และค่า Mean ของค่าแรงเฉือน

No.	A	B	C	D	E	Y (MPa)	S/N- Ratio	Mean
1	-1	-1	-1	-1	-1	58.51	35.3446	58.51
2	-1	-1	-1	-1	0	60.96	35.7009	60.96
3	-1	-1	-1	-1	1	67.98	36.6476	67.98
4	-1	0	0	0	-1	44.49	32.9652	44.49
5	-1	0	0	0	0	55.28	34.8514	55.28
6	-1	0	0	0	1	44.42	32.9516	44.42
7	-1	1	1	1	-1	51.63	34.2580	51.63
8	-1	1	1	1	0	17.36	24.7910	17.36
9	-1	1	1	1	1	48.16	33.6537	48.16
10	0	-1	0	1	-1	54.58	34.7407	54.58
11	0	-1	0	1	0	51.26	34.1956	51.26
12	0	-1	0	1	1	33.47	30.4931	33.47
13	0	0	1	-1	-1	20.00	26.0206	20.00
14	0	0	1	-1	0	15.53	23.8234	15.53
15	0	0	1	-1	1	30.28	29.6231	30.28
16	0	1	-1	0	-1	13.81	22.8039	13.81
17	0	1	-1	0	0	33.64	30.5371	33.64
18	0	1	-1	0	1	25.95	28.2827	25.95
19	1	-1	1	0	-1	33.42	30.4801	33.42
20	1	-1	1	0	0	31.03	29.8356	31.03
21	1	-1	1	0	1	42.03	32.4712	42.03
22	1	0	-1	1	-1	10.68	20.5714	10.68
23	1	0	-1	1	0	62.15	35.8688	62.15
24	1	0	-1	1	1	32.74	30.3016	32.74
25	1	1	0	-1	-1	25.16	28.0142	25.16
26	1	1	0	-1	0	44.71	33.0081	44.71
27	1	1	0	-1	1	55.26	34.8482	55.26

ตารางที่ 10 ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลองค่าแรงเฉือน

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย		
	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3
A; ความเร็วในการเล่นประสาน	<u>33.46</u>	28.95	30.60
B; กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสาน	<u>33.32</u>	29.66	30.02
C; อัตราการป้อนโลหะเติม	30.67	<u>32.90</u>	29.44
D; ระยะห่างหัวทอร์ช	<u>31.45</u>	30.58	30.99
E; มุมในการเล่นประสาน	29.47	31.40	<u>32.14</u>

จากภาพที่ 53 แสดงการเลือกค่า S/N-Ratio ที่มีค่ามากที่สุด คือ ความเร็วในการเล่นประสานที่ระดับ 1 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสานที่ระดับ 1 อัตราการป้อนโลหะเติมที่ระดับ 2 ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ชที่ระดับ 1 และมุมที่ใช้ในการเล่นประสานที่ระดับ 3 เป็นปัจจัยที่ให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด



ภาพที่ 53 ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับ S/N ratios

ดังนั้นจากการทำนายผลการทดลองด้วยวิธีทากูชิ โดยใช้ปัจจัยการทดลองที่ดีที่สุดคือ ความเร็วในการเล่นประสานที่ 500.0 mm/min กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสานที่ระดับ 25.0 A อัตราการป้อนโลหะเติมที่ 6.0 m/min ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ชที่ 1 mm และมุมที่ใช้ในการเล่นประสานที่ 90 ° ผลการทำนายปรากฏว่ามีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด 70.0022 MPa และเมื่อได้ทำการยืนยันผล (Confirmation Test) จากการทำนายโดยการทดลองที่ปัจจัยดังกล่าวทำ

ให้มีค่าความความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยเท่ากับ 68.4000 MPa ซึ่งลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทำนาย



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลในการเชื่อมประสานอลูมิเนียม 6061 เข้ากับเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ DP 590 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธีทาไกเพื่อพิจารณาหาตัวแปรที่เหมาะสมกับการเล่นประสาน พบว่า ตัวแปรที่เหมาะสมและให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด ได้จากการกำหนดตัวแปรในการทดลอง คือ ความเร็วในการเล่นประสานที่ 500.0 mm/min กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสานที่ระดับ 25.0 A อัตราการป้อนโลหะเติมที่ 6.0 m/min ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ชที่ 1 mm และมุมที่ใช้ในการเล่นประสานที่ 90 ° ผลการทำนายปรากฏว่ามีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด 70.0022 MPa และเมื่อทดลองยืนยันผลมีค่าความต้านทานแรงเฉือนเท่ากับ 68.4000 MPa

ผลการศึกษาพบว่าหลังการเล่นประสานแสดงให้เห็นโลหะพื้นอลูมิเนียมสามารถประสานเข้ากับโลหะเติมได้ดีกว่าโลหะพื้นเหล็ก ที่ระหว่างรอยต่อของอลูมิเนียมและโลหะเติมไม่แสดงให้เห็นการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ระหว่างรอยต่อแต่จะมีบริเวณกระตบร้อนเกิดขึ้นกับโลหะพื้นอลูมิเนียมที่บางสภาวะของการทดลอง สำหรับบริเวณโลหะเติมพบสารประกอบเชิงโลหะที่มีอัตราส่วนของอลูมิเนียม ซิลิคอนและเหล็ก เท่ากับ 80.71, 11.85 และ 7.44 wt. % กระจายอยู่บนพื้นผิวที่มีความเข้มข้นของอลูมิเนียมและระหว่างรอยต่อของเหล็กและโลหะเติมพบสารประกอบเชิงโลหะชนิด $FeAl_3Si_2$

2. ข้อเสนอแนะ

2.1 ผลจากการวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กับอุตสาหกรรมยานยนต์ การผลิตและประกอบที่เกี่ยวข้องกับการต่อวัสดุต่างชนิดเช่นเหล็กและอลูมิเนียม แต่ควรพิจารณาถึงสภาวะในการทดลองด้วยเนื่องจากเป็นตัวแปรสำคัญที่จะส่งผลต่อกระบวนการเล่นประสาน

2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้โลหะเติมชนิดต่างๆเพิ่มเติมเนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้เฉพาะ Al-Si ซึ่งจะเข้ากับอลูมิเนียมได้ดีแต่กับเหล็กความแข็งแรงสูงพิเศษยังเข้ากันได้ไม่ดีเท่าที่ควร

บรรณานุกรม

- [1] Advanced materials ในอุตสาหกรรมยานยนต์, <http://www.viboon.org>, (เข้าถึงข้อมูล 15/08/56).
- [2] <http://www.tsnc.in.th>
- [3] <http://www.isit.or.th>
- [4] Zhang, H.T. Feng, J.C. He, P. Hackl, H. **Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium–zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding–brazing process.** 2007; 58: 588–592.
- [5] Coelho, R.S. Kostka, A. Dos Santos, J.F. Kaysser-Pyzalla, A. Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure. **Materials Science and Engineering: A**, Available online 5 July 2012
- [6] Sodjit, S. and Uthaisangsuk, V. Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase steels. **Materials & Design.** 2012; 41: 370-379.
- [7] Mathieu, A. Shabadi, R. Deschamps, A. Suery, M. Mattei, S. Grevey, D. and Cicala, E. Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire). **Optics & Laser Technology.** 2007; 39: 652–661.
- [8] Song, J.L. Lin, S.B. Yang, C.L. Fan, C.L. Ma, G.C. Liu, H. Spreading behavior and microstructure characteristics of dissimilar metals TIG welding-brazing of aluminum alloy to stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, Volume 509, 2009; 509: 31-40.
- [9] ความปลอดภัยในการเชื่อม, www.spc-weldingandequipment.com, (เข้าถึงข้อมูล 15/08/56). [14]
- [10] ชนิดและหน้าที่ของแก๊สปกคลุมและหลักการเลือกวัสดุประสานงานเชื่อม, www.sipotec.ac.th, (เข้าถึงข้อมูล 15/08/56).
- [11] งานเชื่อม มิก&แม็ก, www.ismed.or.th, (เข้าถึงข้อมูล 11/09/56).
- [12] วรรณชัย กัลยาศิริ, **กรรมวิธีการผลิต**, กรุงเทพฯ: พิมพ์ที่ วีเจ หจก.วิ.เจ.พรินติ้ง, 2551.
- [13] งานเชื่อมแก๊ส, www.km.sukhothaitc.ac.th, (เข้าถึงข้อมูล 15/08/56).
- [14] เทคนิคการเชื่อมแก๊ส, www.kbtc.ac.th, (เข้าถึงข้อมูล 15/08/56).
- [15] American Welding Society, www.aws.org, (เข้าถึงข้อมูล 13/01/57).
- [16] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศชนัน เหลืองไพบุรณ์. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง.** สำนักพิมพ์ที่อป จำกัด.
- [17] Lin, S.B. Song, J.L. Yang, C.L. Fan, C.L. and Zhang, D.W. Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing, Between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal. **Materials and Design**, 2010; 2637-2642.

- [18] Song, J.L. Lin, S.B. Yang, C.L. and Fan, C.L. Effects of Si additions on intermetallic compound layer of aluminum–steel TIG welding–brazing joint. **Journal of Alloys and Compounds**, 2009; 20: 217-222.
- [19] Jin, H.J. Rhee, S. Kang, M.J. and Kim, D.C. Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding. **Materials Transactions**, 2009; 50: 2314-2317.
- [20] Muncut, S. Mortoiu, D. and Sima, G. TECHNOLOGY FOR HETEROGENEOUS JOINING OF THIN ZINC-PLATED STEEL SHEET WITH ALUMINUM. **Nonconventional Technologies Review**, 2011.
- [21] Paul, S.K. Real microstructure based micromechanical model to simulate microstructural level deformation behavior and failure initiation in DP 590 steel. **Materials and Design**, 2013; 44: 397–406.
- [22] Yongchao, S. Xueming, H. and Yixiong, W. Influence of alloy elements on microstructure and mechanical property of aluminum–steel lap joint made by gas metal arc welding. **Journal of Materials Processing Technology**, 2014; 214: 750–755.
- [23] Dharmendra, C. Rao, K.P. Wilden, J. and Reich, S. Study on laser welding–brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler. **Materials Science and Engineering: A**, 2011; 528: 1497–1503.
- [24] Dharmendra, C. Rao, K.P. Wilden, J. and Reich, S. Study on laser welding–brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler. **Materials Science and Engineering: A**, 2011; 528: 1497–1503.
- [25] Hitoshi, O. and Muneharu, K. **Dissimilar Metal Joining of Zinc Coated Steel and Aluminum Alloy by Laser Roll Welding**. [<http://www.intechopen.com/>].

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

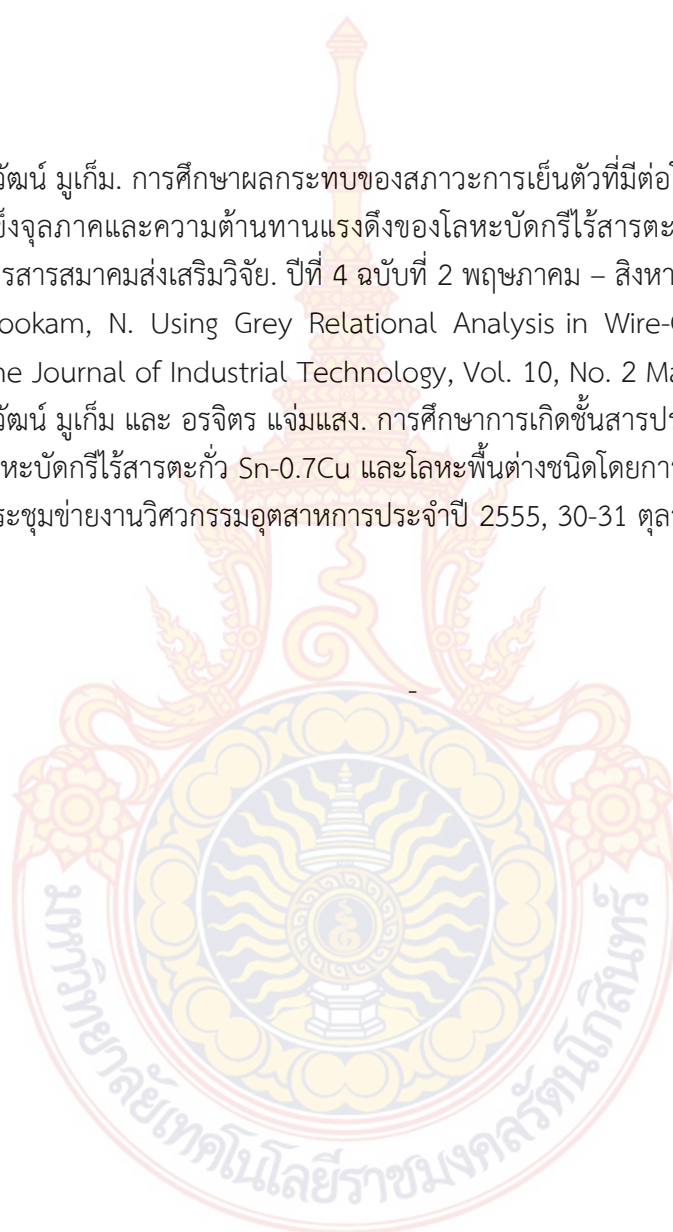
All rights reserved

1. ชื่อ สกุล นายนิวัฒน์ มูแก้ม
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ (หัวหน้าสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม)
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
4. ประวัติการศึกษา

2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
 - Joining of Materials (Welding, Soldering and Brazing).
 - Electric Discharge Machining (EDM) / Wire-EDM.
 - Design and Analysis of Experiments.
 - Non-Traditional Manufacturing Processes.
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย
 - Mookam, N. and Kanlayasiri, K. Effect of soldering condition on formation of intermetallic phases developed between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver lead-free solder and Cu substrate. Journal of Alloys and Compounds, 2011; 509: 6276-6279.
 - Mookam, N. and Kanlayasiri, K. Evolution of Intermetallic Compounds between Sn-0.3Ag-0.7Cu Low-silver Lead-free Solder and Cu Substrate during Thermal Aging. Journal of Materials Science & Technology. 2012; 28: 53-59.
 - นิวัฒน์ มูแก้ม. ผลกระทบของสภาวะการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และ Sn-0.3Ag-0.7Cu กับโลหะพื้นทองแดง. การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2554, 20-21 ตุลาคม 2554.
 - นิวัฒน์ มูแก้ม, ธิติพัทธ์ ลิ้มกุล และ กรรณชัย กัลยาศิริ. การเกิดปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่ม SnAgCu และโลหะพื้นทองแดง. วารสารการเชื่อมไทย, ฉบับที่ 54 มกราคม-เมษายน 2554. หน้า 36-46.
 - นิวัฒน์ มูแก้ม และ ปิยะวรรณ สุนาสวน. อิทธิพลของตัวแปรในการตัดด้วยวิธี EDM ต่อลักษณะเฉพาะของการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 61 การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2555, 17-19 ตุลาคม 2555.

- นิวัฒน์ มูแก้ม. การศึกษาผลกระทบของสภาวะการเย็นตัวที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรงจุลภาคและความต้านทานแรงดึงของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu. วารสารสมาคมส่งเสริมวิจัย. ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2556.
- Mookam, N. Using Grey Relational Analysis in Wire-Cutting of Titanium. The Journal of Industrial Technology, Vol. 10, No. 2 May – August 2014
- นิวัฒน์ มูแก้ม และ อรจิตร แจ่มแสง. การศึกษาการเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และโลหะพื้นต่างชนิดโดยการบัดกรีแบบรีโฟลว์. การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2555, 30-31 ตุลาคม 2557.



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved




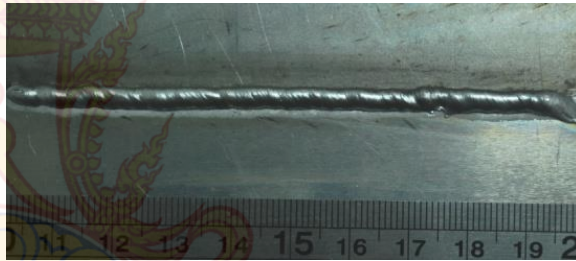



ภาคผนวก ก.

รอยต่อชิ้นงานจากการเล่นประสาน

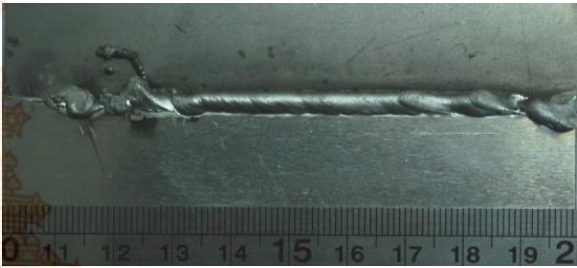




ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

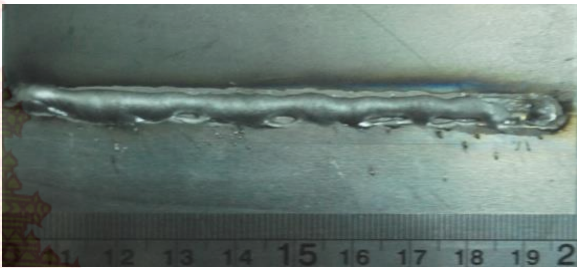
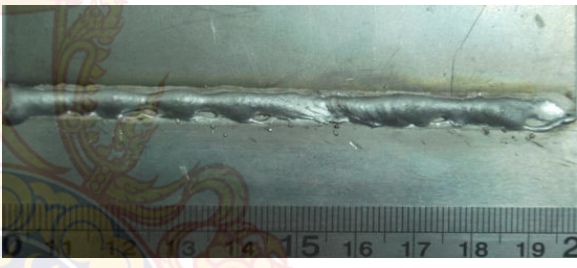


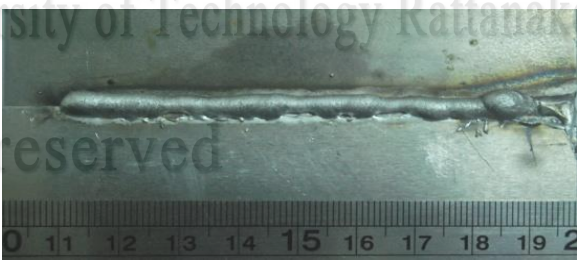
All rights reserved

ชั้นที่	ตัวแปร	รูปภาพ
1	A = 500 mm/min, B = 25 A, C = 4.0 m/min, D = 1.0 mm และ E = 45 degree	 A photograph showing a welded joint on a metal surface. The weld is a dark, textured line. A ruler is placed below the joint for scale, showing markings from 0 to 20 mm.
2	A = 500 mm/min, B = 25 A, C = 4.0 m/min, D = 1.0 mm และ E = 90 degree	 A photograph showing a welded joint on a metal surface. The weld is a dark, textured line. A ruler is placed below the joint for scale, showing markings from 0 to 20 mm.
3	A = 500 mm/min, B = 25 A, C = 4.0 m/min, D = 1.0 mm และ E = 70 degree	 A photograph showing a welded joint on a metal surface. The weld is a dark, textured line. A ruler is placed below the joint for scale, showing markings from 0 to 20 mm.
4	A = 500 mm/min, B = 50 A, C = 6.0 m/min, D = 1.5 mm และ E = 45 degree	 A photograph showing a welded joint on a metal surface. The weld is a dark, textured line. A ruler is placed below the joint for scale, showing markings from 0 to 20 mm.
5	A = 500 mm/min, B = 50 A, C = 6.0 m/min, D = 1.5 mm และ E = 70 degree	 A photograph showing a welded joint on a metal surface. The weld is a dark, textured line. A ruler is placed below the joint for scale, showing markings from 0 to 20 mm.


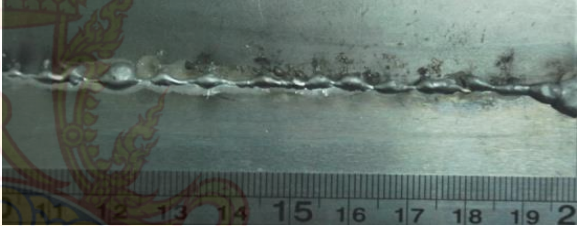


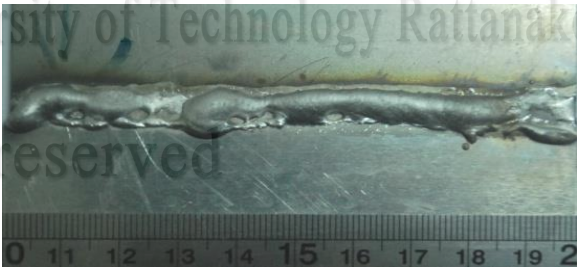
ภาพที่ ก.1 รอยต่อชิ้นงานที่ 1-5

ชั้นที่	ตัวแปร	รูปภาพ
6	A = 500 mm/min, B = 50 A, C = 6.0 m/min, D = 1.5 mm และ E = 90 degree	
7	A = 500 mm/min, B = 75 A, C = 8.0 m/min, D = 2.0 mm และ E = 45 degree	
8	A = 500 mm/min, B = 75 A, C = 8.0 m/min, D = 2.0 mm และ E = 70 degree	
9	A = 500 mm/min, B = 75 A, C = 8.0 m/min, D = 2.0 mm และ E = 90 degree	
10	A = 1,000 mm/min, B = 25 A, C = 6.0 m/min, D = 2.0 mm และ E = 45 degree	

ภาพที่ ก.2 รอยต่อชิ้นงานที่ 6-10

ชั้นที่	ตัวแปร	รูปภาพ
11	A = 1,000 mm/min, B = 25 A, C = 6.0 m/min, D = 2.0 mm และ E = 70 degree	 A photograph showing a longitudinal view of a welded joint. The weld bead is dark and has a slightly irregular, wavy appearance. A ruler is visible at the bottom of the image, showing markings from 0 to 20 cm.
12	A = 1,000 mm/min, B = 25 A, C = 6.0 m/min, D = 2.0 mm และ E = 90 degree	 A photograph showing a longitudinal view of a welded joint. The weld bead is dark and appears smoother than in condition 11. A ruler is visible at the bottom of the image, showing markings from 0 to 20 cm.
13	A = 1,000 mm/min, B = 50 A, C = 8.0 m/min, D = 1.0 mm และ E = 45 degree	 A photograph showing a longitudinal view of a welded joint. The weld bead is dark and has a distinct, slightly irregular appearance. A ruler is visible at the bottom of the image, showing markings from 0 to 20 cm.
14	A = 1,000 mm/min, B = 50 A, C = 8.0 m/min, D = 1.0 mm และ E = 70 degree	 A photograph showing a longitudinal view of a welded joint. The weld bead is dark and has a slightly irregular, wavy appearance. A ruler is visible at the bottom of the image, showing markings from 0 to 20 cm.
15	A = 1,000 mm/min, B = 50 A, C = 8.0 m/min, D = 1.0 mm และ E = 90 degree	 A photograph showing a longitudinal view of a welded joint. The weld bead is dark and appears smoother than in condition 14. A ruler is visible at the bottom of the image, showing markings from 0 to 20 cm.

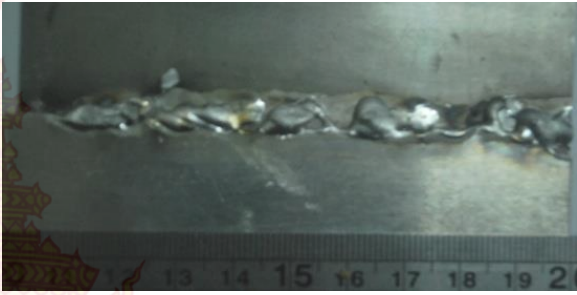

ภาพที่ ก.3 รอยต่อชิ้นงานที่ 11-15

ชั้นที่	ตัวแปร	รูปภาพ
16	A = 1,000 mm/min, B = 75 A, C = 4.0 m/min, D = 1.5 mm และ E = 45 degree	
17	A = 1,000 mm/min, B = 75 A, C = 4.0 m/min, D = 1.5 mm และ E = 70 degree	
18	A = 1,000 mm/min, B = 75 A, C = 4.0 m/min, D = 1.5 mm และ E = 90 degree	
19	A = 1,500 mm/min, B = 25 A, C = 8.0 m/min, D = 1.5 mm และ E = 45 degree	
20	A = 1,500 mm/min, B = 25 A, C = 8.0 m/min, D = 1.5 mm และ E = 70 degree	

ภาพที่ ก.4 รอยต่อชิ้นงานที่ 16-20

ชั้นที่	ตัวแปร	รูปภาพ
21	A = 1,500 mm/min, B = 25 A, C = 8.0 m/min, D = 1.5 mm และ E = 90 degree	
22	A = 1,500 mm/min, B = 50 A, C = 4.0 m/min, D = 2.0 mm และ E = 45 degree	
23	A = 1,500 mm/min, B = 50 A, C = 4.0 m/min, D = 2.0 mm และ E = 70 degree	
24	A = 1,500 mm/min, B = 50 A, C = 4.0 m/min, D = 2.0 mm และ E = 90 degree	
25	A = 1,500 mm/min, B = 75 A, C = 6.0 m/min, D = 1.0 mm และ E = 45 degree	

ภาพที่ ก.5 รอยต่อชิ้นงานที่ 21-25

ชั้นที่	ตัวแปร	รูปภาพ
26	A = 1,500 mm/min, B = 75 A, C = 6.0 m/min, D = 1.0 mm และ E = 70 degree	
27	A = 1,500 mm/min, B = 75 A, C = 6.0 m/min, D = 1.0 mm และ E = 90 degree	

ภาพที่ ก.6 รอยต่อชั้นงานที่ 26 และ 27

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved



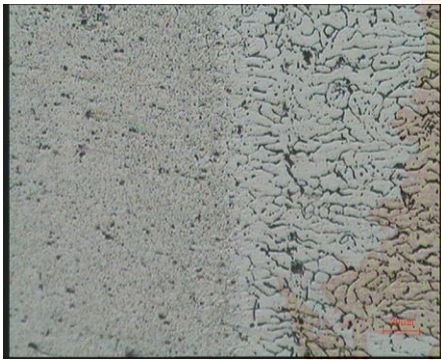
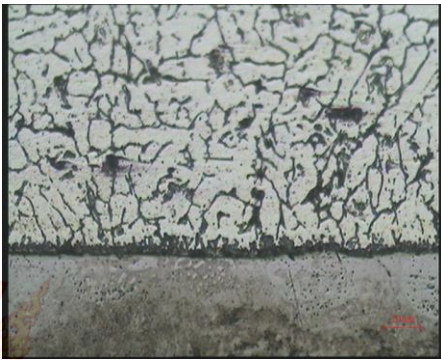
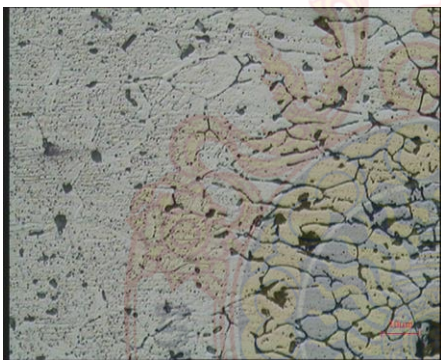
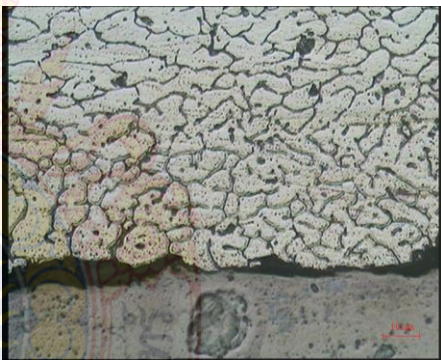
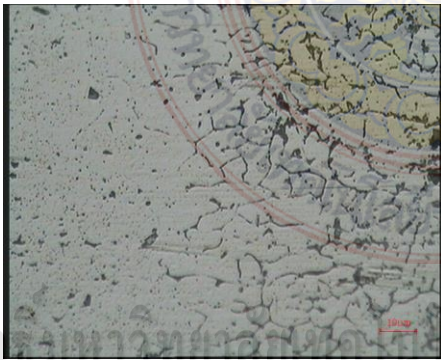

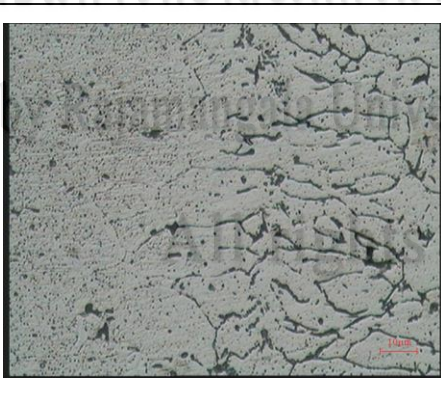
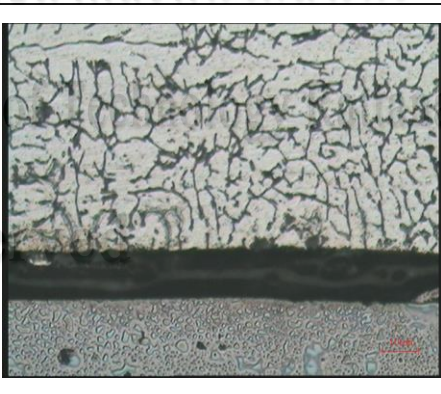
ภาคผนวก ข.

โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่กำลังขยาย 200 เท่า

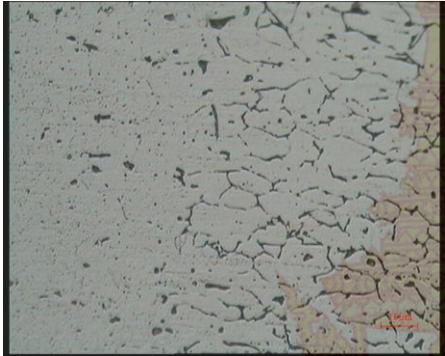
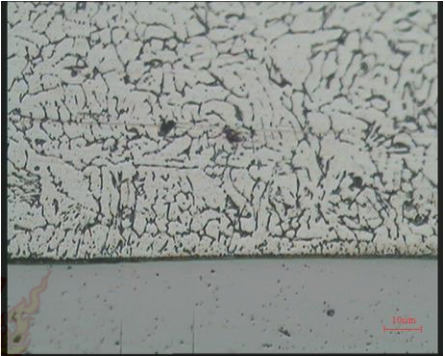
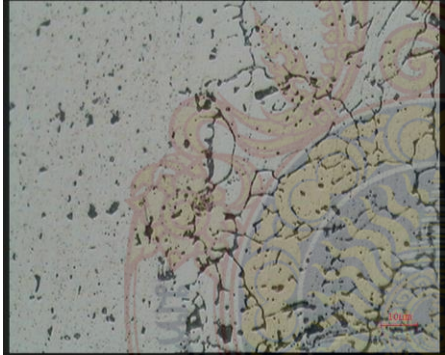
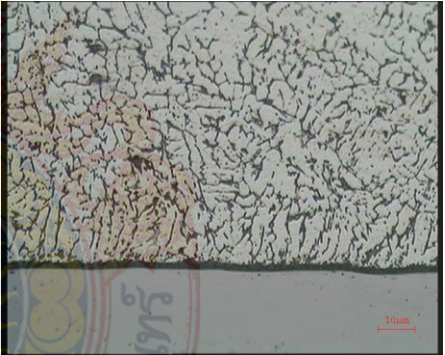
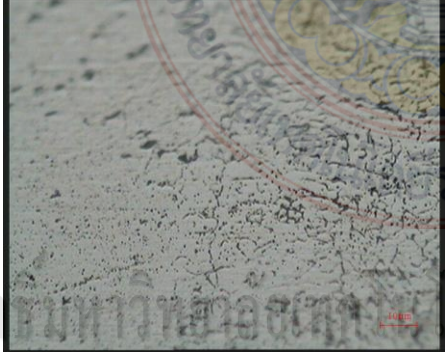

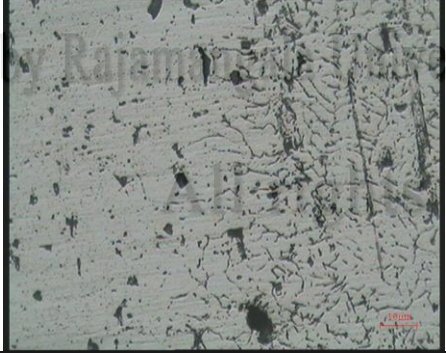

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

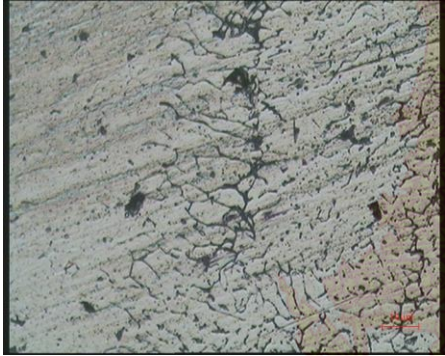

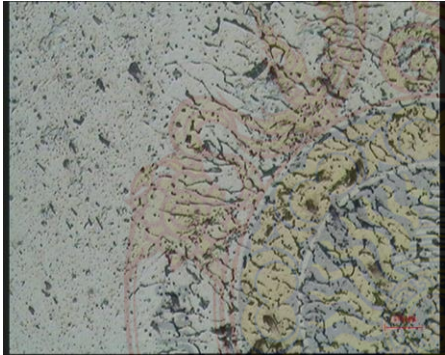

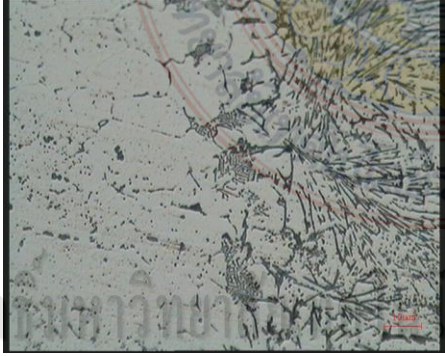
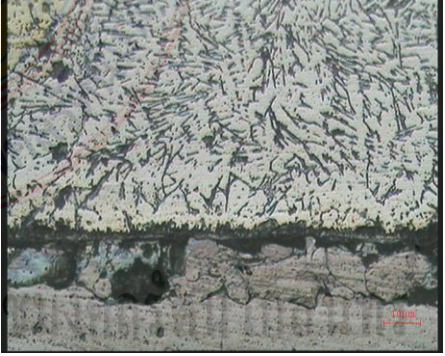


All rights reserved

ชั้นที่	อลูมิเนียม/โลหะเติม	เหล็ก/โลหะเติม
1		
2		
3		
4		


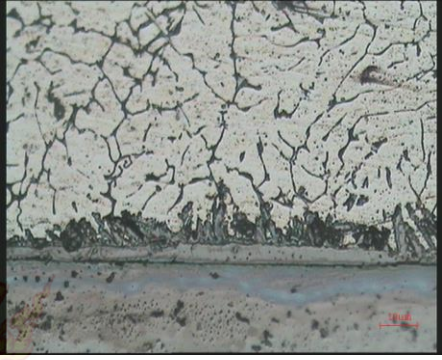

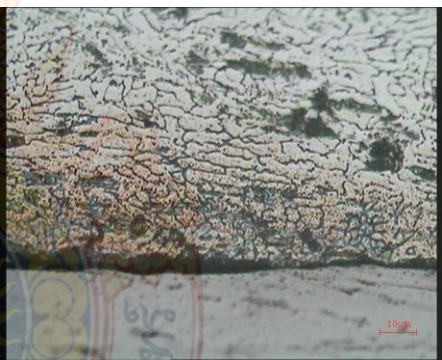
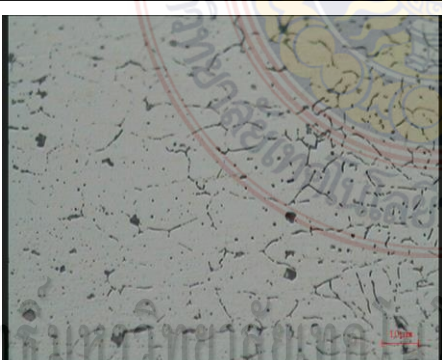

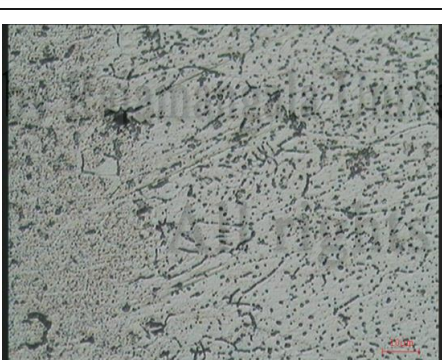
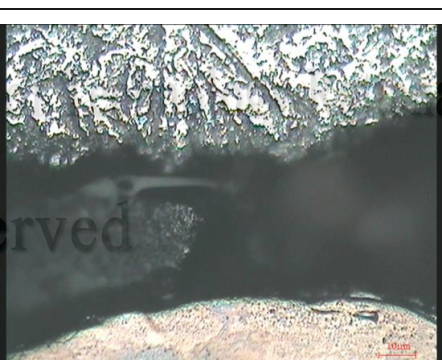
ภาพที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชั้นที่ 1-4

ชั้นที่	อลูมิเนียม/โลหะเติม	เหล็ก/โลหะเติม
5		
6		
7		
8		


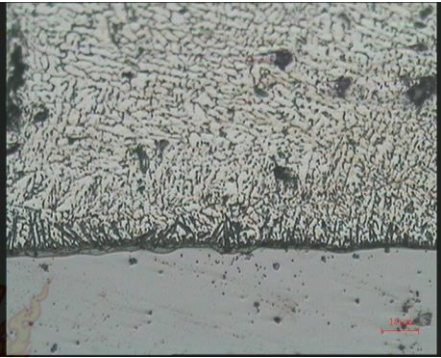
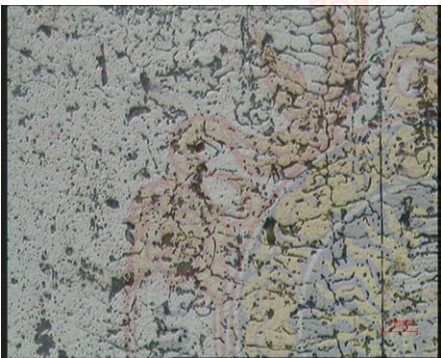
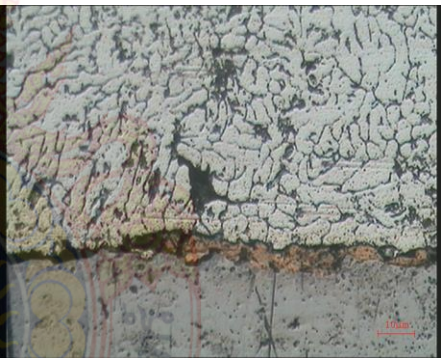


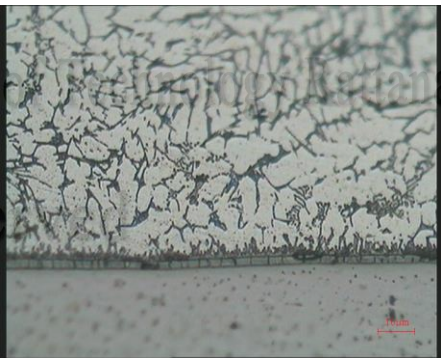
ภาพที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชั้นที่ 5-8

ชั้นที่	อลูมิเนียม/โลหะเติม	เหล็ก/โลหะเติม
9		
10		
11		
12		


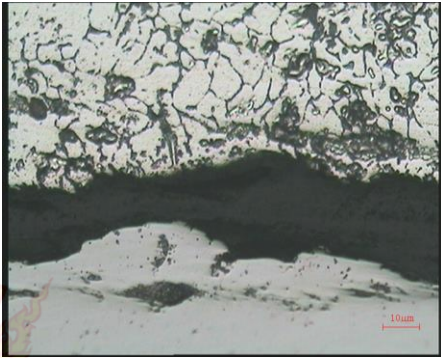
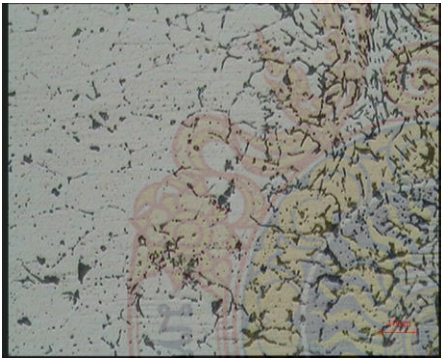

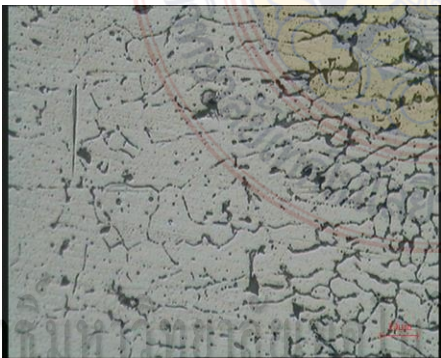

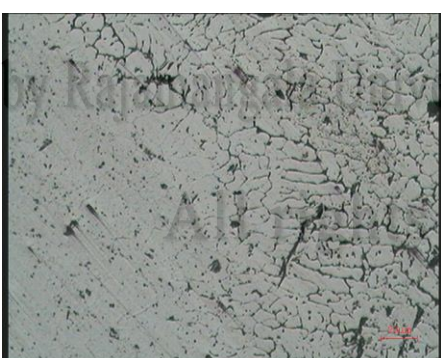
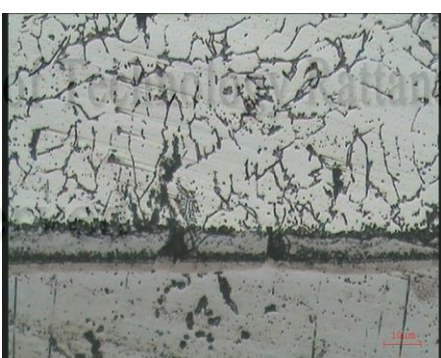
ภาพที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชั้นที่ 9-12

ชั้นที่	อลูมิเนียม/โลหะเติม	เหล็ก/โลหะเติม
13		
14		
15		
16		



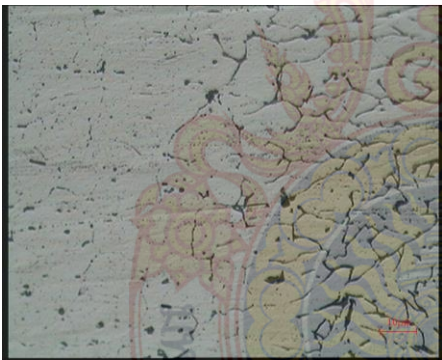
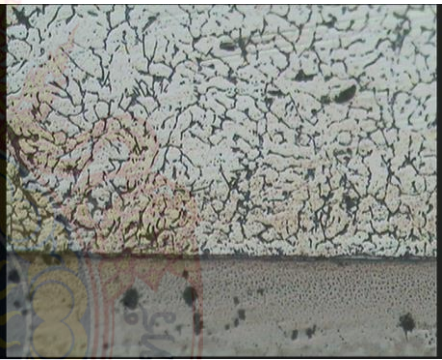
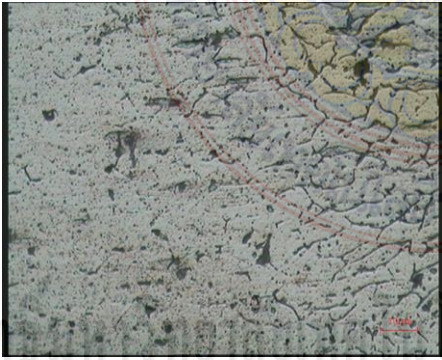

ภาพที่ ข.4 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชั้นที่ 13-16

ชั้นที่	อลูมิเนียม/โลหะเติม	เหล็ก/โลหะเติม
17		
18		
19		ชั้นงานมีระยะห่างมากในตำแหน่งที่ตรวจสอบ
20		

ภาพที่ ข.5 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชั้นที่ 17-20

ชั้นที่	อลูมิเนียม/โลหะเติม	เหล็ก/โลหะเติม
21	 Micrograph showing the interface between Al/Al alloy. The top half shows a relatively smooth surface with some small features, while the bottom half shows a more textured, porous-looking structure. A 10µm scale bar is visible in the bottom right corner.	 Micrograph showing the interface between Fe/Al alloy. The top half shows a highly porous, interconnected network of dark and light regions. The bottom half shows a smoother, more uniform surface. A 10µm scale bar is visible in the bottom right corner.
22	 Micrograph showing the interface between Al/Al alloy. The top half shows a porous, interconnected network of dark and light regions. The bottom half shows a smoother, more uniform surface. A 10µm scale bar is visible in the bottom right corner.	 Micrograph showing the interface between Fe/Al alloy. The top half shows a highly porous, interconnected network of dark and light regions. The bottom half shows a smoother, more uniform surface. A 10µm scale bar is visible in the bottom right corner.
23	 Micrograph showing the interface between Al/Al alloy. The top half shows a porous, interconnected network of dark and light regions. The bottom half shows a smoother, more uniform surface. A 10µm scale bar is visible in the bottom right corner.	 Micrograph showing the interface between Fe/Al alloy. The top half shows a highly porous, interconnected network of dark and light regions. The bottom half shows a smoother, more uniform surface. A 10µm scale bar is visible in the bottom right corner.
24	 Micrograph showing the interface between Al/Al alloy. The top half shows a porous, interconnected network of dark and light regions. The bottom half shows a smoother, more uniform surface. A 10µm scale bar is visible in the bottom right corner.	 Micrograph showing the interface between Fe/Al alloy. The top half shows a highly porous, interconnected network of dark and light regions. The bottom half shows a smoother, more uniform surface. A 10µm scale bar is visible in the bottom right corner.

ภาพที่ ข.6 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชั้นที่ 21-24

ชั้นที่	อลูมิเนียม/โลหะเติม	เหล็ก/โลหะเติม
25		
26		
27		

ภาพที่ ข.7 โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชั้นที่ 25-27

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved



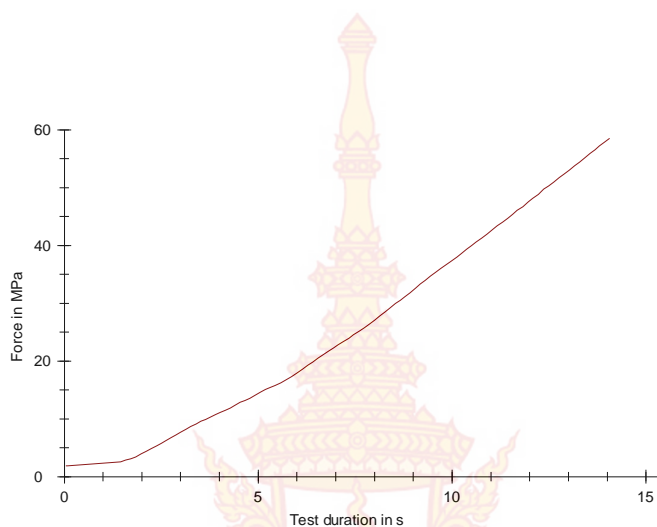
ภาคผนวก ค.

ผลความต้านทานแรงเฉือนของรอยแล่นประสานในหน่วย MPa

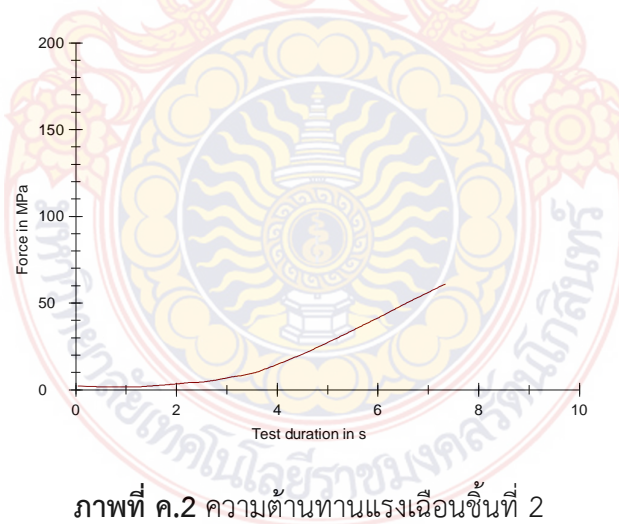
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved



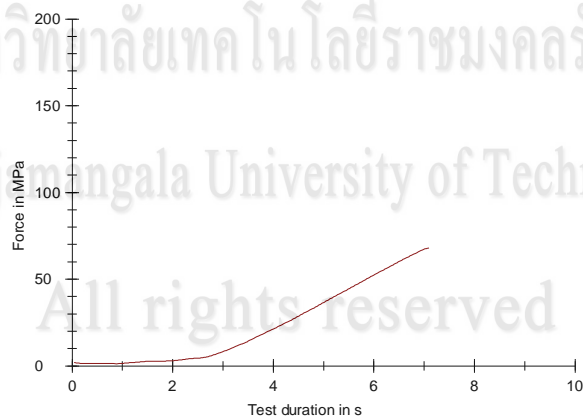
ภาพที่ ค.1 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 1



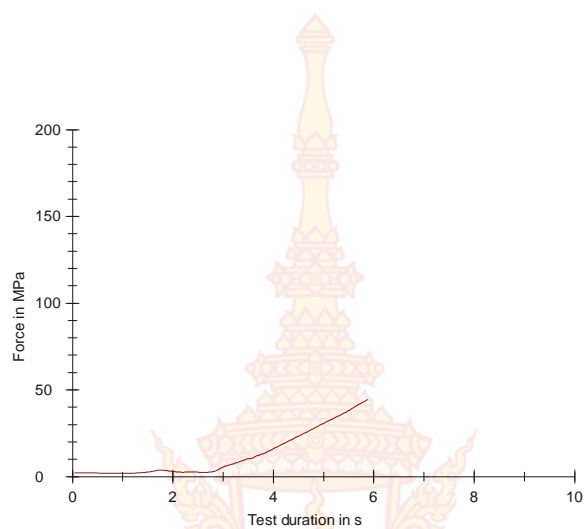
ภาพที่ ค.2 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

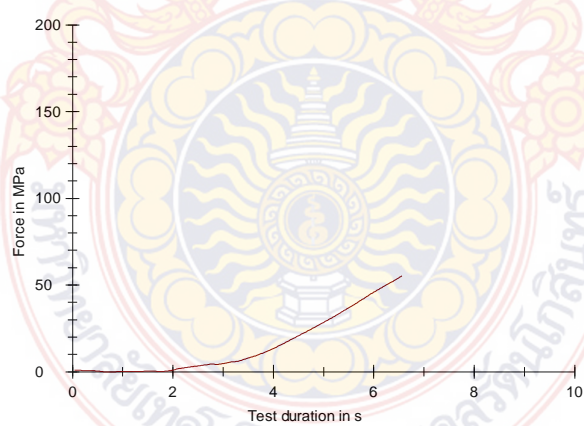
Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin



ภาพที่ ค.3 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 3



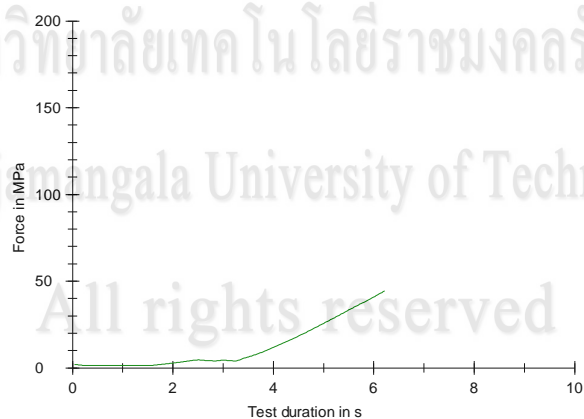
ภาพที่ ค.4 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 4



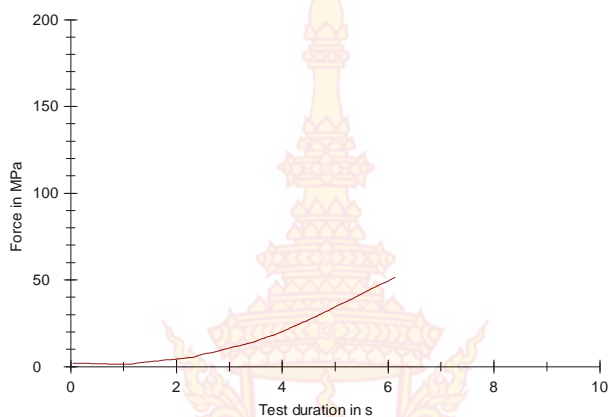
ภาพที่ ค.5 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 5

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

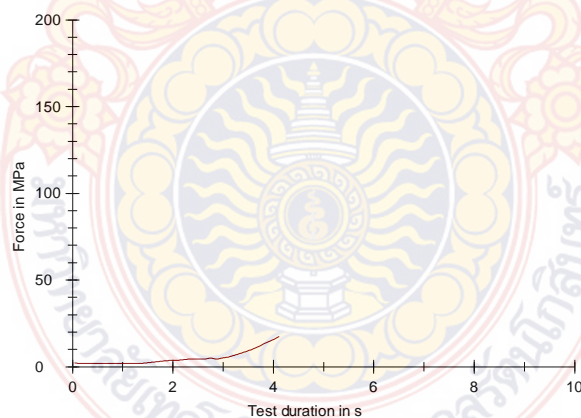
Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin



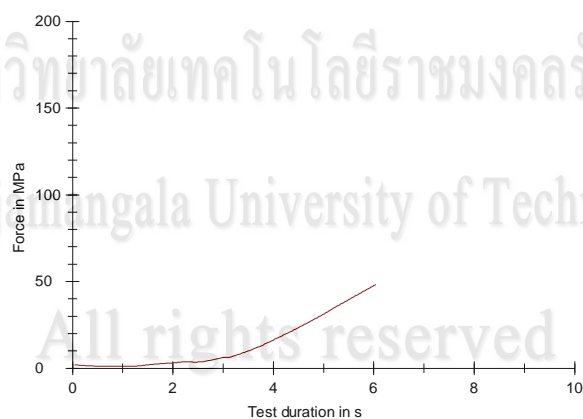
ภาพที่ ค.6 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 6



ภาพที่ ค.7 ความต้านทานแรงเฉือนชั้นที่ 7



ภาพที่ ค.8 ความต้านทานแรงเฉือนชั้นที่ 8

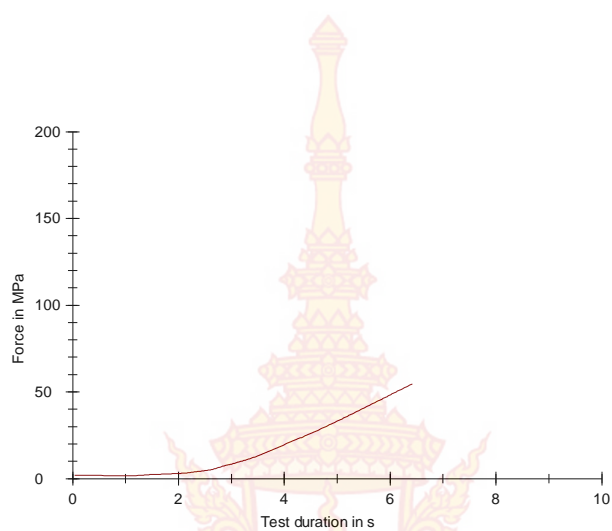


ภาพที่ ค.9 ความต้านทานแรงเฉือนชั้นที่ 9

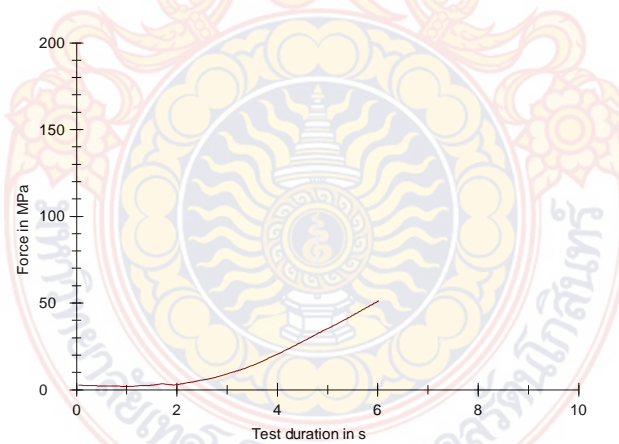
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajabhatngala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved



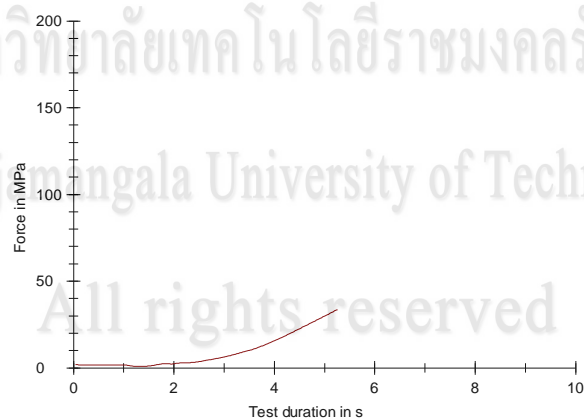
ภาพที่ ค.10 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 10



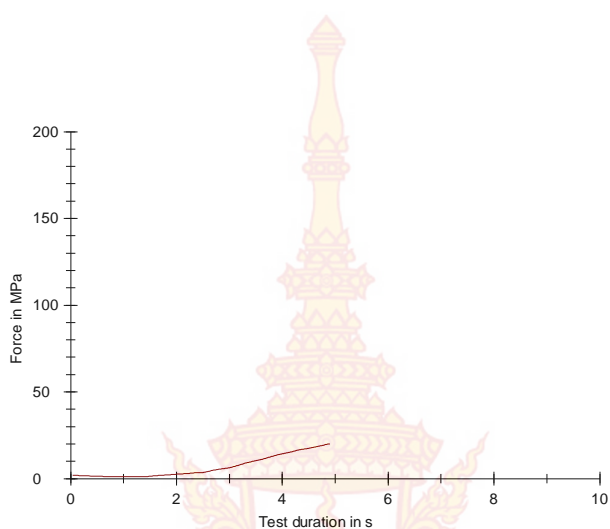
ภาพที่ ค.11 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 11

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

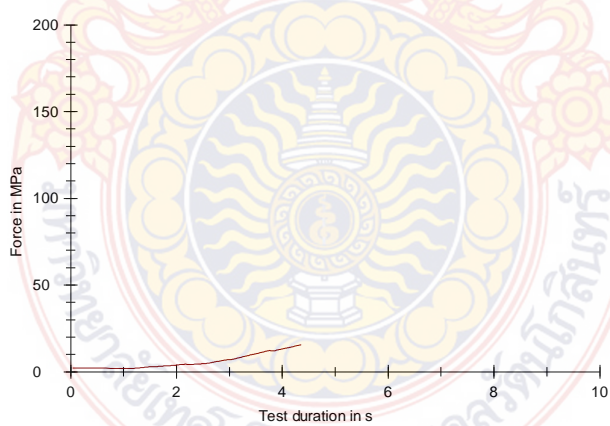
Copyright © by Rajmangala University of Technology Rattanakosin



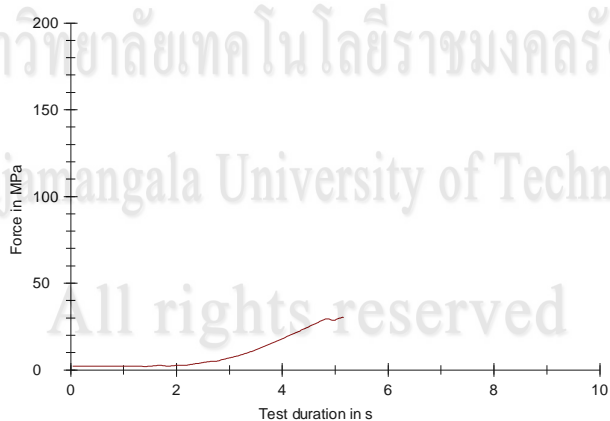
ภาพที่ ค.12 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 12



ภาพที่ ค.13 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 13



ภาพที่ ค.14 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 14

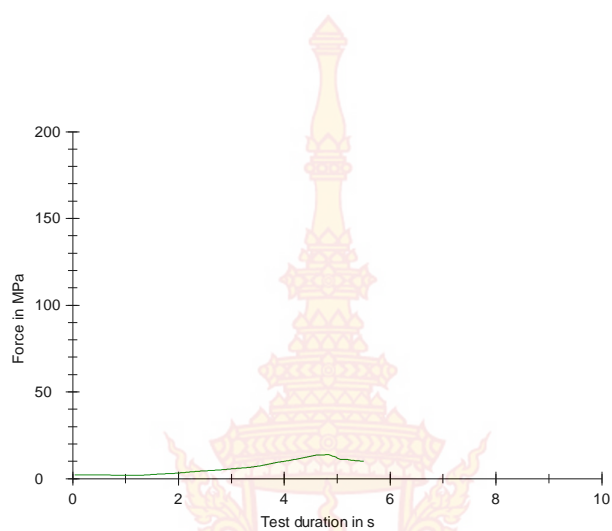


ภาพที่ ค.15 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 15

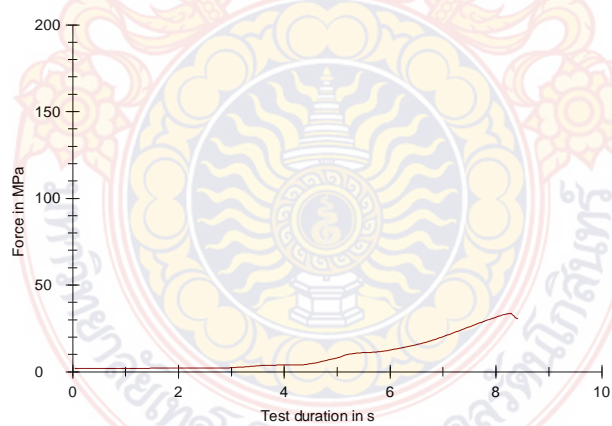
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved



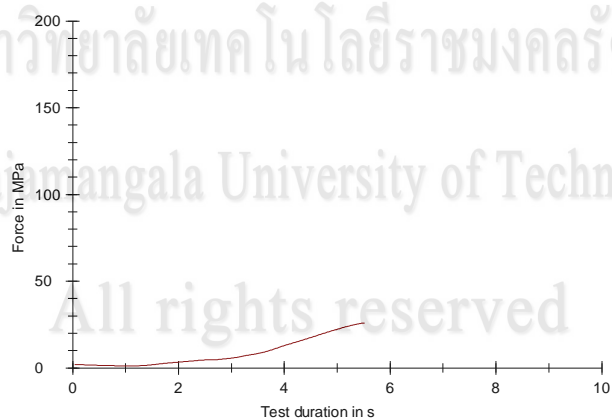
ภาพที่ ค.16 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 16



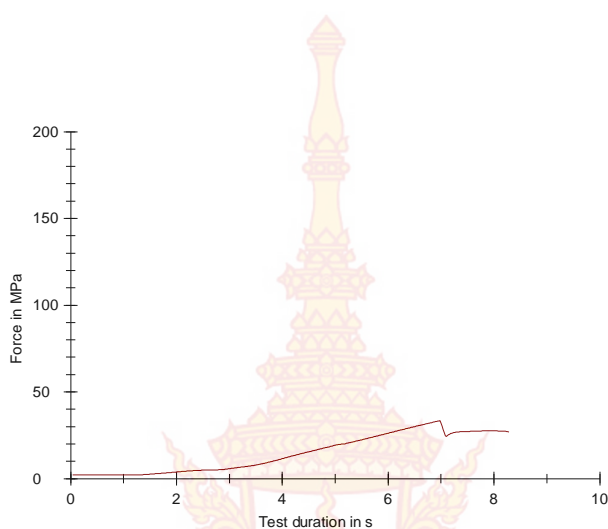
ภาพที่ ค.17 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 17

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

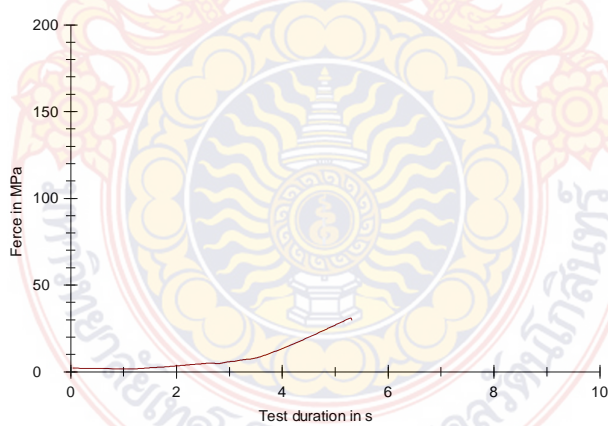
Copyright © by Rajabangala University of Technology Rattanakosin



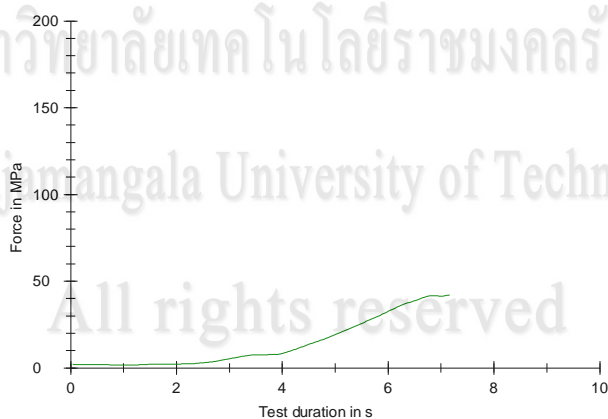
ภาพที่ ค.18 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 18



ภาพที่ ค.19 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 19



ภาพที่ ค.20 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 20

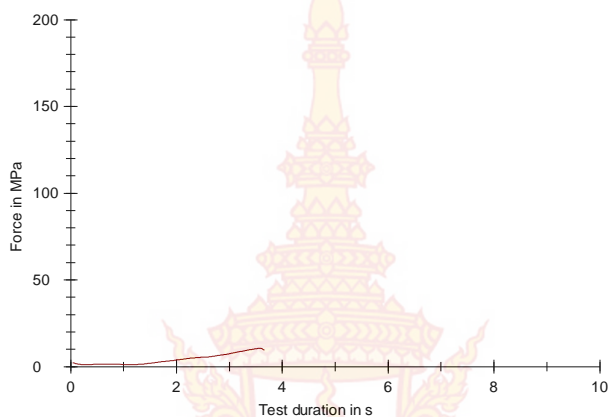


ภาพที่ ค.21 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 21

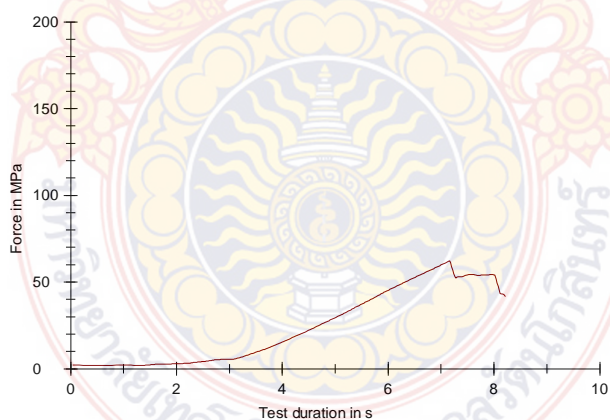
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

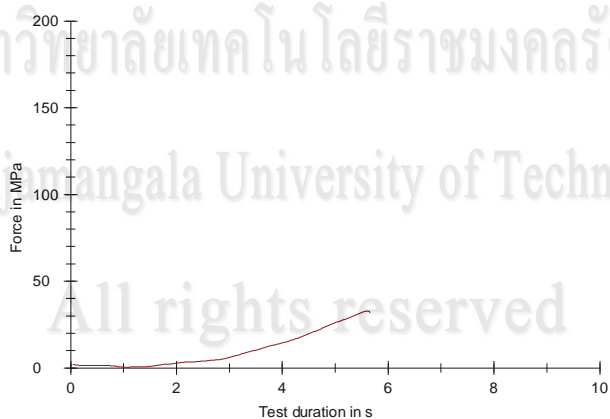
All rights reserved



ภาพที่ ค.22 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 22



ภาพที่ ค.23 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 23

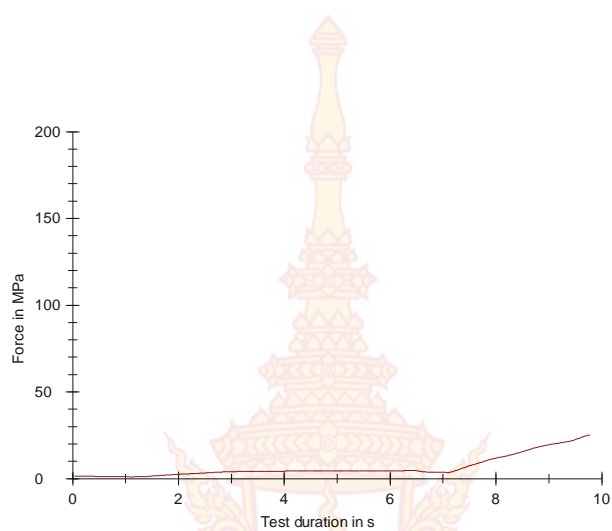


ภาพที่ ค.24 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 24

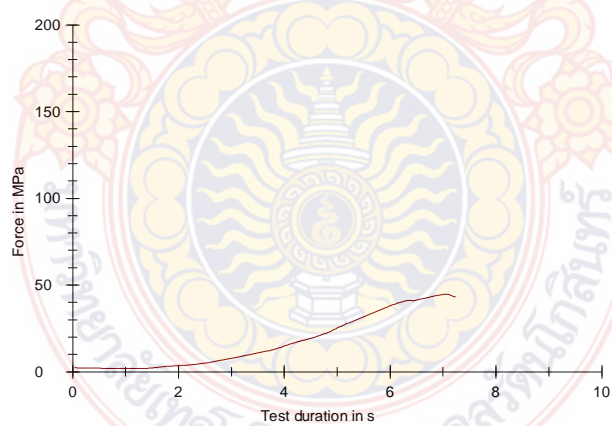
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved



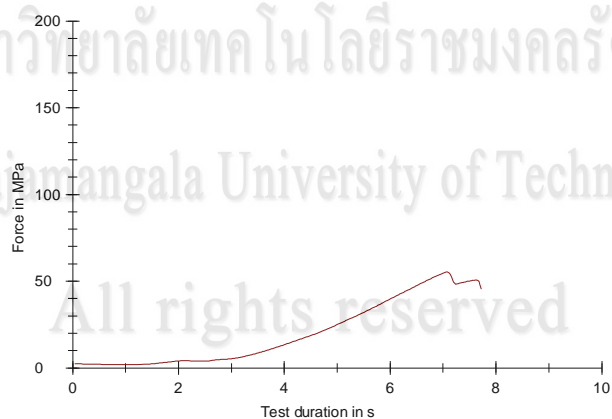
ภาพที่ ค.25 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 25



ภาพที่ ค.26 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 26

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

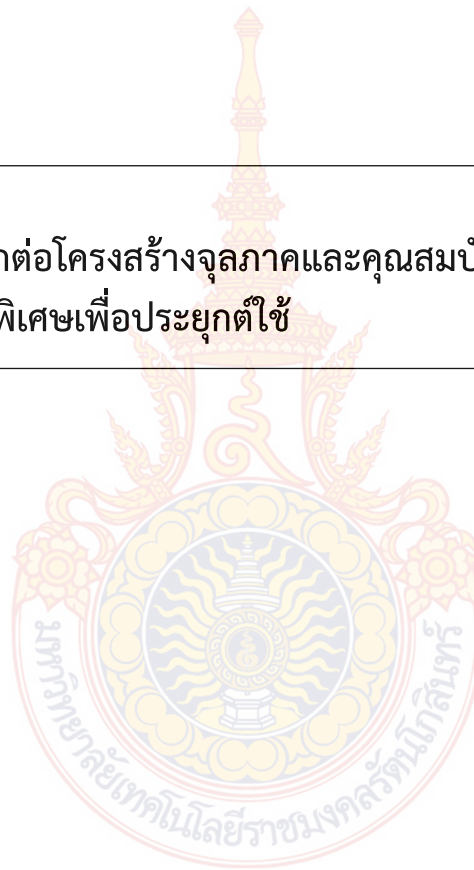
Copyright © by Rajabangala University of Technology Rattanakosin



ภาพที่ ค.27 ความต้านทานแรงเฉือนชิ้นที่ 27

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกล
ในการเชื่อมประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษเพื่อประยุกต์ใช้

นิวัฒน์ มูแก้ม
2557



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved