

อิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมและความหนาแน่นงานเชื่อมต่อลักษณะ
สารประกอบเชิงโลหะในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น
กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

นายภูษิต มิตรสมหวัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2552

**INFLUENCES OF MAGNESIUM AND THICKNESS
OF WELDED SHEET ON THE FEATURE OF
INTERMETALLIC REACTION LAYER
IN STEEL/ALUMINUM ALLOY
DISSIMILAR WELD**

Pusit Mitsomwang

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2009

อิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมและความหนาแน่นงานเชื่อมต่อลักษณะ
สารประกอบเชิงโลหะในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพิจารณาเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ฐาปนีย์ อุดมผล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.รัตน์ บริสุทธิ์กุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.อุษณีย์ กิตกัธกร)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตน์จันทร์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ภูษิต มิตรสมหวัง : อิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมและความหนาชิ้นงานเชื่อมต่อลักษณะ
สารประกอบเชิงโลหะในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

(INFLUENCES OF MAGNESIUM AND THICKNESS OF WELDED SHEET ON THE
FEATURE OF INTERMETALLIC REACTION LAYER IN STEEL/ALUMINUM
ALLOY DISSIMILAR WELD) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.รัตน บิริสุทธิกุล, 92 หน้า.

ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น
และอิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วย
กระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดิ่งร่วมกับเทคนิค Self-brazing นอกจากนี้ในการวิจัยนี้
ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับสนับสนุนการอธิบายอิทธิพล
ของธาตุแมกนีเซียมและอิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อลักษณะของ
ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อม

จากผลการวิจัยพบว่าธาตุแมกนีเซียมที่อยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นสามารถจัดวาง
การเป็ยของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวไปบนผิวของเหล็กกล้าแผ่น และธาตุแมกนีเซียม
ยังจัดวางการแพร่ร่วมกันของอะตอมเหล็กกับอะตอมอะลูมิเนียมในขณะทำการเชื่อม นอกจากนี้
ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมโลหะต่างชนิดนี้โดยใช้เหล็กกล้าแผ่นหรือโลหะผสม
อะลูมิเนียมแผ่นที่มีความหนามากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการเป็ยของโลหะผสมอะลูมิเนียม
หลอมเหลวไปบนผิวเหล็กกล้าแผ่นเพิ่มขึ้น ในกรณีการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นที่มีความหนา
แตกต่างกัน ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการถ่ายเท
ความร้อน ณ บริเวณรอยเชื่อมเป็นหลัก

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PUSIT MITSOMWANG : INFLUENCES OF MAGNESIUM AND
THICKNESS OF WELDED SHEET ON THE FEATURE OF
INTERMETALLIC REACTION LAYER IN STEEL/ALUMINUM
ALLOY DISSIMILAR WELD. THESIS ADVISOR : RATTANA
BORRISUTTHEKUL, Ph.D., 92 PP.

INTERMETALLIC REACTION LAYER/SELF-BRAZING/WETTABILITY

In this study, effects of magnesium in aluminum alloy sheet and thickness of welded sheet on the features of intermetallic reaction layer formed during GTAW steel/aluminum alloy dissimilar metal welding by a self-brazing technique were investigated. Moreover, finite element analysis of heat transfer in dissimilar metal welding was carried out in order to provide additional information used to explain the effects of magnesium and thickness of welded sheet on width and maximum thickness of the intermetallic reaction layer.

According to the results, it could be indicated that magnesium added in aluminum alloy reduced the wettability of molten aluminum alloy onto the steel surface. Moreover, the magnesium also suppressed the diffusion of iron and aluminum atoms during welding. Furthermore, an increase of thickness of welded sheets resulted in an increase in wettability of molten aluminum alloy onto steel surface. In case of the welding with different welded sheets, it was found that the maximum thickness of intermetallic reaction layer was mainly depended on the heat transfer behavior at welding zone.

School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและทางด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลต่าง ๆ ในโอกาสนี้ผู้วิจัย จึงขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

อาจารย์ ดร.รัตน บริสุทธิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ทางวิชาการในด้านต่าง ๆ และให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

อาจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตติคำธร อาจารย์ ดร.ฐาปนีย์ อุคมผล และ อาจารย์ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนากุล อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี บุคคลเหล่านี้เป็นผู้ให้ความรู้ทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยครั้งนี้

อาจารย์ ดร.เสกสรร ไชยจิตต์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมแมคคาทอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ซึ่งให้ความรู้ในด้านการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานทางวิศวกรรม ซึ่งเป็นส่วนสำคัญหนึ่งของการทำวิจัยครั้งนี้

เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (อาคารเครื่องมือ 1 และ อาคารเครื่องมือ 6) ซึ่งให้คำแนะนำในด้านการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ตลอดการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ตลอดจนญาติพี่น้องอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งบุคคลเหล่านี้เป็นผู้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้การทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ภูษิต มิตรสมหวัง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 สมมติฐานการวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น	7
2.2 ลักษณะของบ่อน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการเชื่อม	11
2.3 กลไกการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในขณะที่ทำการ เชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น	13
3 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี วิธีการทดลอง และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี	16
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	16
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	17
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2	วิธีการทดลอง 20
3.2.1	การเตรียมโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อม 21
3.2.2	การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น 22
3.2.3	การเตรียมชิ้นงานเชื่อมเพื่อตรวจสอบ โครงสร้าง จุลภาคและทดสอบสมบัติเชิงกล 23
3.2.4	การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคและทดสอบ สมบัติเชิงกล 24
3.3	การวิเคราะห์การเชื่อมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 24
3.3.1	การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 25
3.3.2	การทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม และการทำงานช่วงเวลาโลหะผสมอะลูมิเนียม อยู่ในสถานะของเหลวด้วยโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1 34
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 39
4.1	อิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 39
4.1.1	ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 39
4.1.2	ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 49
4.2	อิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นต่อลักษณะ ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 56
4.2.1	ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 57
4.2.2	ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 63
4.3	อิทธิพลของชั้นสารประกอบเชิงโลหะต่อความแข็งแรง ของชิ้นงานเชื่อม 68
5	สรุป 70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง	71
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก. การตรวจวัดความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและความหนา สูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	73
ภาคผนวก ข. การคำนวณความแข็งแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	76
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	78
ประวัติผู้เขียน	92



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนภาพการผลิตเหล็กแผ่นด้วยเทคโนโลยี Tailor rolled blank	2
1.2	เทคนิค Self-brazing ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่าง เหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น	4
2.1	การจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียม ด้วยกระบวนการเชื่อม Friction Stir Welding	7
2.2	การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น โดยกระบวนการ Brazing ด้วยโลหะเติมที่มี สังกะสีเป็นส่วนผสมหลัก	8
2.3	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นซึ่งเหล็กกล้าเกิดการหลอมเหลวร่วมกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว	9
2.4	การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นด้วยเทคนิค Self-brazing โดยใช้เหล็กกล้า เป็นโลหะแผ่นบน	9
2.5	ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมแสงเลเซอร์ และอาศัยเทคนิค Self-brazing	10
2.6	การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นด้วยเทคนิค Self-brazing โดยใช้โลหะผสม อะลูมิเนียมเป็นโลหะแผ่นบน	10
2.7	ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นจากการเชื่อมโดยอาศัยเทคนิค Self-brazing	11
2.8	แผนภูมิสมดุระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียม	14
3.1	ภาพรวมวิธีการดำเนินการวิจัย	20

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2	ลักษณะและขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อม 21
3.3	ลักษณะการจัดวางชิ้นงานเชื่อมบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน 22
3.4	ลักษณะชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึง 23
3.5	แผนผังแสดงขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 26
3.6	โมเดลที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม 27
3.7	โมเดลที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่าง ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม 28
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 จากการทดลอง และการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 29
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 จากการทดลอง 30
3.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 31
3.11	โมเดลที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่าง แท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม 32
3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแท่งเหล็ก ทรงใต้ชิ้นงานเชื่อม จากการทดลอง 33
3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อม จากการทดลองและ จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 33
3.14	โมเดลที่ใช้ในการทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม และเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลว 34
3.15	โมเดลที่ถูกกำหนดทิศทางในการเชื่อม 35
3.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่ง 37
3.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา 38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วยปริมาณ ความร้อนต่าง ๆ (a) 18.4 กิโลจูล (b) 24.5 กิโลจูล และ (c) 30.6 กิโลจูล	40
4.2 ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วยปริมาณ ความร้อน 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 และ (b) เหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น เกรด 5052-H32	41
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม	41
4.4 ความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมจากการเชื่อมด้วย ปริมาณความร้อนต่าง ๆ (a) 18.4 กิโลจูล (b) 24.5 กิโลจูล และ (c) 30.6 กิโลจูล	42
4.5 ความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมจากการเชื่อมด้วยปริมาณ ความร้อน 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 และ (b) เหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น เกรด 5052-H32	43
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม	44
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อม	45
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อมในกรณี ทำนายด้วยค่าการนำความร้อนของโลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นที่แตกต่างกัน	46

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อม กับความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมในกรณี ทำนายด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่าง ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม ที่แตกต่างกัน	47
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะ กับระยะทางจากกึ่งกลางแหล่งกำเนิดความร้อน	48
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะ ของเหลวกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อม	50
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะ ของเหลวกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อมในกรณี ค่าการนำความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมแตกต่างกัน	51
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะ ของเหลวกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อมในกรณี ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อม กับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมแตกต่างกัน	52
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อม	53
4.15 ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วย ปริมาณความร้อนต่าง ๆ (a) 18.4 กิโลจูล (b) 24.5 กิโลจูล และ (c) 30 กิโลจูล	54
4.16 ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อม ด้วยปริมาณความร้อนเท่ากับ 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 และ (b) เหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32	54

สารบัญรูป (ต่อ)

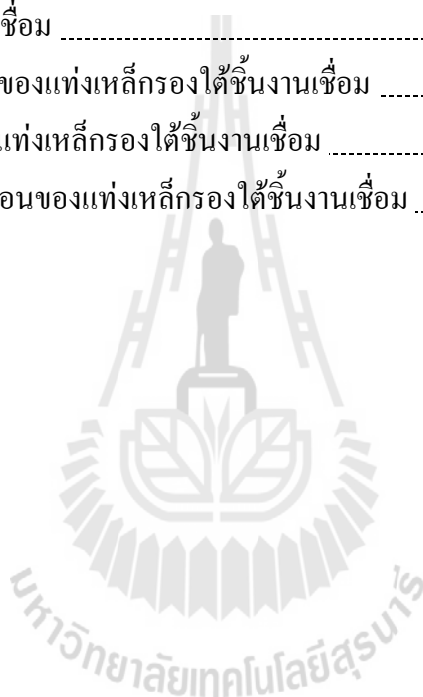
รูปที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม	55
4.18 ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อน เท่ากับ 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม. (b) เหล็กกล้าแผ่น หนา 1 มม.กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1.5 มม. และ (c) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มม.กับโลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม.	56
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม	57
4.20 ความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมจากการเชื่อมด้วยความร้อน เท่ากับ 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม. (b) เหล็กกล้าแผ่น หนา 1 มม.กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1.5 มม. และ (c) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มม.กับโลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม.	58
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม	59
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อม	60
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะ กับระยะทางจากกึ่งกลางแหล่งกำเนิดความร้อน	61
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาที่ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม อยู่ในสถานะของเหลวกับปริมาณความร้อนที่ใช้ ในการทำนายการเชื่อม	64
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อม	65

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.26	ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อนเท่ากับ 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มม.กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม. (b) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มม.กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1.5 มม. และ (c) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มม.กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม.	66
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม	67
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานแรงดึง ณ จุดแตกหักกับความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	69
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	69
ก.1	บริเวณต่าง ๆ ในแนวตัดขวางรอยเชื่อมที่ทำการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	74
ข.1	พื้นที่รับแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	77

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุต่าง ๆ	16
3.2	สมบัติเชิงกลของวัสดุต่าง ๆ	16
3.3	สมบัติทางความร้อนของวัสดุต่าง ๆ	16
3.4	สมบัติของเครื่องเชื่อม	17
3.5	ส่วนผสมทางเคมีของแท่งเหล็กกรองใต้ชิ้นงานเชื่อม	18
3.6	สมบัติเชิงกลของแท่งเหล็กกรองใต้ชิ้นงานเชื่อม	18
3.7	สมบัติทางความร้อนของแท่งเหล็กกรองใต้ชิ้นงานเชื่อม	18



บทที่ 1

บทนำ

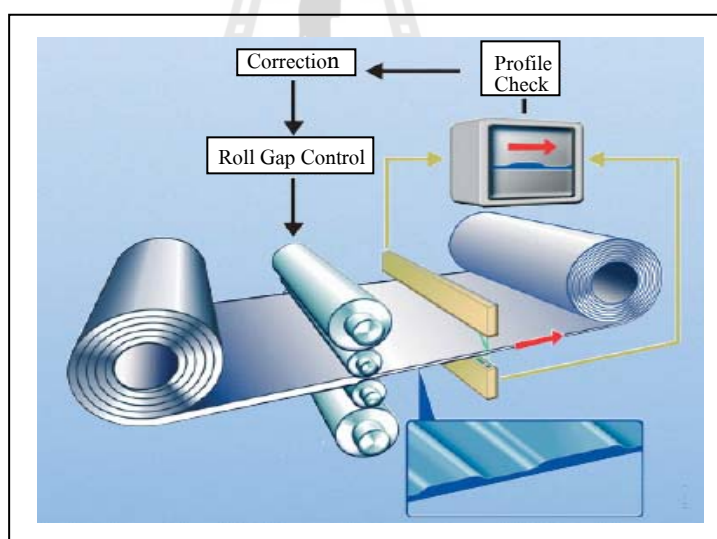
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหาสภาวะโลกร้อนได้ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งมีต้นเหตุมาจากก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ฯลฯ โดยในบรรดาก๊าซเรือนกระจกเหล่านั้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมาจากกิจกรรมของมนุษย์ในปริมาณมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น ๆ จากการศึกษาพบว่า ในปีพุทธศักราช 2547 ประชากรไทยหนึ่งคนปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศประมาณ 2.73 ตันต่อปี และได้มีการคาดการณ์ว่าถ้าปราศจากการรณรงค์อย่างจริงจังในปีพุทธศักราช 2554 และ 2558 ประชากรไทยหนึ่งคนจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศเพิ่มขึ้นเป็น 3.64 และ 4.34 ตันต่อปี (อาริสา ปานเทวัน, 2551)

กิจกรรมหลักกิจกรรมหนึ่งของมนุษย์ซึ่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากนั้น คือการขนส่ง จากการศึกษาพบว่าการขนส่งภายในประเทศไทยเป็นกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสัดส่วนถึงประมาณร้อยละ 26 ของกิจกรรมทั้งหมด (Timilsina, G. R. and Shrestha, A., 2009) และยิ่งไปกว่านั้นยังมีผลการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าการขนส่งทางบกเป็นภาคการขนส่งที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การขนส่งแบบอื่น ๆ (Karl., 2007) ปัจจุบันหลายประเทศได้ออกกฎหมายซึ่งมีผลบังคับในการควบคุมปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากยานยนต์ เช่น กลุ่มประเทศในทวีปยุโรป ได้ออกกฎหมาย anti-pollution and energy saving laws (Mathieu, A. et al., 2007) ด้วยเหตุเหล่านี้ส่งผลให้ผู้ผลิตรถยนต์จำเป็นต้องผลิตรถยนต์ที่มีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเป็นไปตามข้อกำหนดเหล่านี้ และวิธีการที่ผู้ผลิตรถยนต์เลือกในการผลิตรถยนต์ดังกล่าว คือการผลิตรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบา

ในการผลิตรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบานั้น ผู้ผลิตรถยนต์ได้มีการนำเทคโนโลยีที่หลากหลายเข้ามาประยุกต์ใช้ โดยเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับและถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในการลดน้ำหนัก รถยนต์คือ เทคโนโลยี Tailor blank ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นำเหล็กกล้าแผ่นมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนรถยนต์และใช้ทดแทนชิ้นส่วนรถยนต์ที่ผลิตจากเหล็กกล้าที่มีรูปทรงตัน จากการที่เทคโนโลยี Tailor blank เป็นที่ยอมรับจากผู้ผลิตรถยนต์จึงทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าว

อย่างต่อเนื่อง อาทิเช่น ในปี 2001 กลุ่มบริษัท Mubea ประเทศเยอรมัน ได้พัฒนาเทคโนโลยี Tailor rolled blank ที่สามารถขึ้นรูปชิ้นส่วนรถยนต์หนึ่งชิ้นให้มีความหนาต่างกันได้ (Muhr. and Bender, KG., 2007) ดังรูปที่ 1.1 แม้การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Tailor blank จะสามารถผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่มีน้ำหนักลดลงได้อย่างมาก แต่ด้วยความต้องการของผู้ผลิตรถยนต์ในการลดน้ำหนักรถยนต์นั้นยังมีอยู่อย่างไม่สิ้นสุด ส่งผลให้ในปัจจุบันมีการนำโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ และมีรูปทรงเป็นแผ่นมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคโนโลยี Tailor blank โลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ และถูกนำมาผลิตชิ้นส่วนรถยนต์เพื่อทดแทนชิ้นส่วนรถยนต์ที่ผลิตจากเหล็กกล้าแผ่นนั้นมีด้วยกันหลายชนิดเช่น โลหะผสมอะลูมิเนียม โลหะผสมแมกนีเซียม หรือโลหะผสมไทเทเนียม ในบรรดาโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำดังกล่าว โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์มากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการเช่น มีความแข็งแรงเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นสูง สามารถทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่าย มีความสามารถในการต้านทานต่อการผุกร่อนในสภาพบรรยากาศปกติได้ดี และมีราคาไม่สูงมาก



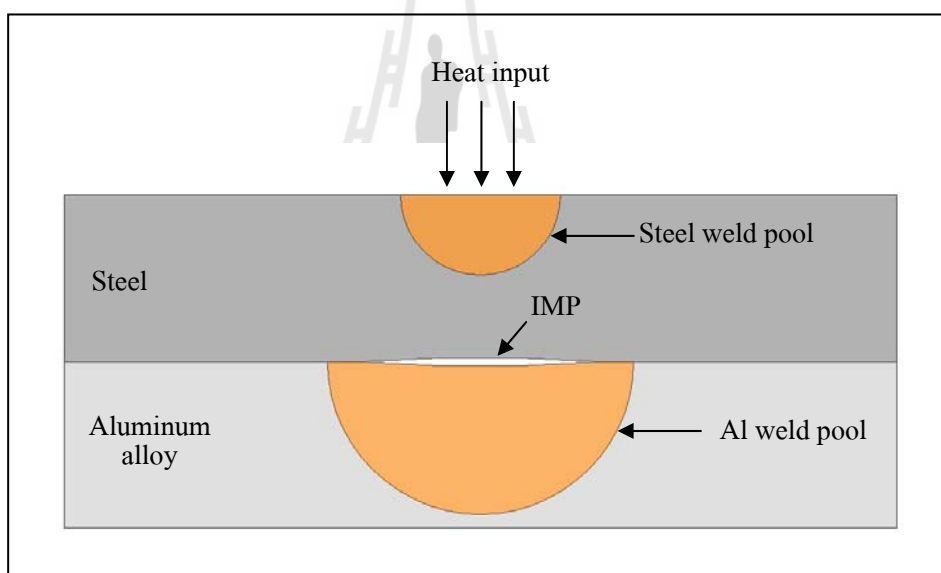
รูปที่ 1.1 แผนภาพการผลิตเหล็กแผ่นด้วยเทคโนโลยี Tailor rolled blank

เมื่อผู้ผลิตรถยนต์เริ่มประยุกต์ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเพื่อทดแทนการใช้เหล็กกล้าแผ่นนั้น ในขั้นตอนการประกอบรถยนต์ที่ต้องทำการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เทคโนโลยีการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นจึงจำเป็นต้องได้รับการพัฒนา จากการศึกษาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นให้ได้อย่างเชื่อมต่อกันที่มีคุณภาพดีนั้นกระทำได้ยาก อันเป็นผลมาจากการก่อตัว

ของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียม ณ บริเวณรอยเชื่อมซึ่งสารประกอบเชิงโลหะดังกล่าวมีสมบัติเปราะแตกง่าย (Katayama, S., 2002) แต่จากการศึกษาและการทดลองอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปัจจุบันสามารถทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นได้สำเร็จโดยใช้กระบวนการเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์ร่วมกับเทคนิค Self-brazing (Borrisutthekul, R. et al., 2007) การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นโดยอาศัยเทคนิค Self-brazing นั้นกระทำโดยจัดวางโลหะแผ่นในลักษณะซ้อนเกยและใช้เหล็กกล้าแผ่นเป็นโลหะแผ่นบน ขณะทำการเชื่อมความร้อนจากแหล่งกำเนิดจะถ่ายเทลงสู่เหล็กกล้าแผ่น ซึ่งในขณะที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นบนนี้จะถูกควบคุมให้เกิดการหลอมเหลวขึ้นเพียงบางส่วนเท่านั้น จากนั้นเมื่อความร้อนถ่ายเทต่อลงสู่โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้านล่างจนกระทั่งอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นสูงขึ้นถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะผสมอะลูมิเนียม โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้านล่างจะหลอมเหลวแล้วเกิดการเป็ยกไปบนผิวของเหล็กกล้าแผ่นด้านบนซึ่งยังอยู่ในสถานะของแข็งเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียม (IMP) ขึ้น ดังรูปที่ 1.2 ด้วยลักษณะเฉพาะของกระบวนการเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์ซึ่งสามารถให้ความเข้มของความร้อนลงสู่ชิ้นงานในปริมาณสูงมาก ทำให้สามารถควบคุมการหลอมเหลวของเหล็กกล้าให้เกิดขึ้นเพียงบางส่วนได้ง่าย ซึ่งการควบคุมการหลอมเหลวบางส่วนเป็นกุญแจสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิค Self-brazing ยิ่งไปกว่านั้นกระบวนการเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์ยังสามารถควบคุมให้โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้านล่างเกิดการหลอมเหลวเพียงช่วงเวลาสั้น ๆ ส่งผลให้สารประกอบเชิงโลหะ ณ บริเวณรอยเชื่อมก่อตัวขึ้นเป็นเพียงชั้นบาง ๆ ซึ่งเป็นลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงขึ้น (Borrisutthekul, R. et al., 2007) แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์ภายในประเทศไทย เนื่องจากเครื่องเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์สำหรับใช้ในการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ยังมีราคาค่อนข้างสูง ในขณะที่กระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดิ่ง เป็นกระบวนการเชื่อมหนึ่งที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ของประเทศไทย และเป็นกระบวนการเชื่อมที่น่าจะนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นร่วมกับเทคนิค Self-brazing ได้ (Sierra, G. et al., 2008)

จากที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ การก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเป็นสาเหตุของการด้อยลงของสมบัติรอยเชื่อมอย่างมาก แต่ด้วยเทคนิค Self-brazing ทำให้สามารถควบคุมการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะให้มีลักษณะเป็นชั้นบางอยู่ระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นได้ ถึงแม้ว่าการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะที่ควบคุมได้ แต่อย่างไรก็ตามชั้นสารประกอบเชิงโลหะยังคงส่งผลต่อความแข็งแรง

ของรอยเชื่อม ดังเช่น จากผลการศึกษาพบว่า ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร จะมีความสามารถในการต้านทานต่อการแตกหักเสียหายเนื่องจากแรงดึงได้เพิ่มขึ้นเมื่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีความกว้างเพิ่มขึ้น (ภูษิต มิตรสมหวัง และ รัตน์ บริสุทธิ์กุล, 2010) นอกจากนี้มีผลการศึกษาจำนวนมากแสดงให้เห็นว่า ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่บางจะแสดงสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่หนา (Albright, C. E., 1981; Yasuyama, M. et al., 1996) ด้วยเหตุนี้ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น หากสามารถเข้าใจถึงสถานะที่ทำการควบคุมความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ ย่อมทำให้สามารถเลือกสถานะการเชื่อมและวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นได้



รูปที่ 1.2 เทคนิค Self-brazing ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

สำหรับตัวแปรที่ผู้วิจัยส่วนใหญ่ยังไม่ค่อยให้ความสำคัญในการศึกษา คือ ประเภทของโลหะผสมอะลูมิเนียมและรูปทรงของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อม ซึ่งตัวแปรทั้งสองเป็นสิ่งที่มีการปรับเปลี่ยนบ่อยครั้งในการเลือกใช้ชิ้นส่วนรถยนต์ อนึ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมที่นิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์มักมีการเติมธาตุแมกนีเซียม ด้วยเหตุนี้เพื่อให้เข้าใจถึงอิทธิพลของประเภทโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้และรูปทรงของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อคุณภาพของรอยเชื่อม

การศึกษาอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นและอิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดึงโดยอาศัยเทคนิค Self-brazing

2) เพื่อศึกษาอิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดึงโดยอาศัยเทคนิค Self-brazing

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1) ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดึงโดยอาศัยเทคนิค Self-brazing นั้น การใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นที่มีการเจือธาตุแมกนีเซียมในปริมาณไม่เท่ากัน อาจส่งผลต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อม เนื่องจากธาตุแมกนีเซียมที่เจือลงในโลหะผสมอะลูมิเนียมส่งผลให้โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นมีค่าความสามารถในการนำความร้อนต่ำลง นอกจากนี้ในขณะที่ทำการเชื่อมโดยใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีการเจือธาตุแมกนีเซียมยังอาจเกิดสารประกอบออกไซด์ชนิดที่อาจส่งผลต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Shih, T. S. and Tu, S. H., 2006; Shinozaki, N. et al., 2001)

2) ความหนาที่แตกต่างกันของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมน่าจะส่งผลต่อลักษณะของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดึงโดยอาศัยเทคนิค Self-brazing เนื่องจากความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมซึ่งแตกต่างกันทำให้รูปทรงของรอยเชื่อมแตกต่างกัน และความแตกต่างกันของรูปทรงรอยเชื่อมนี้ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในบริเวณรอยเชื่อมและการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในการศึกษาอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เจือในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นนั้น กระทำโดยอาศัยการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร และการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตรเท่านั้น สำหรับการศึกษาค่าความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นนั้น จะทำโดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมสามลักษณะ ดังนี้ (1) เชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร (2) เชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และ (3) ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร ในการศึกษาลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นครั้งนี้ มุ่งศึกษาไปที่ความกว้างและความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเท่านั้น โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดึงร่วมกับเทคนิค Self-brazing นอกจากนี้ได้มีการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม และทำนายช่วงเวลาโลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลว ในขณะที่ทำการเชื่อมโดยอาศัยโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

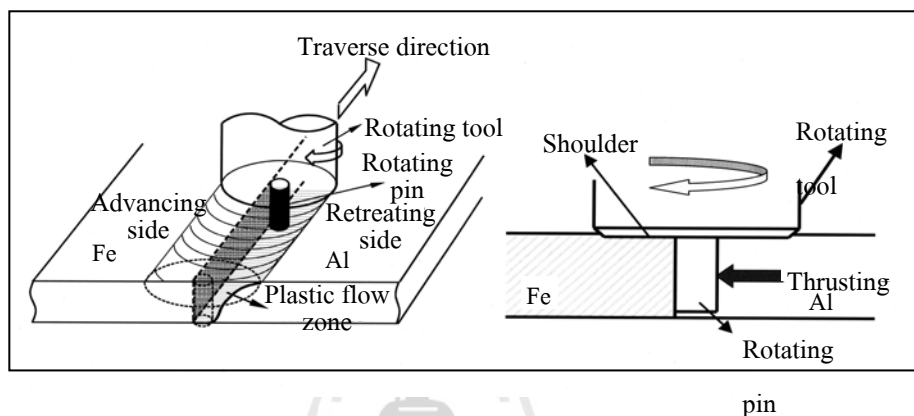
1) เข้าใจอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

2) เข้าใจถึงลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ซึ่งความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมแตกต่างกัน

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

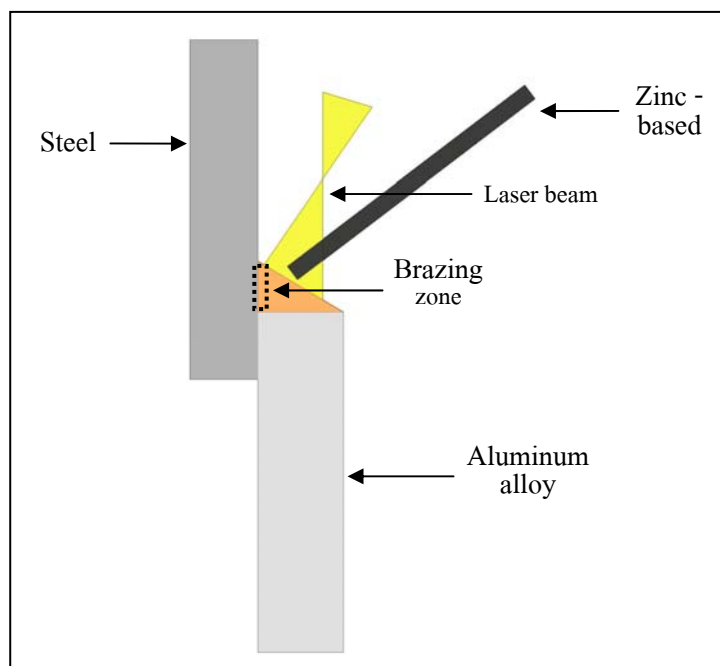
2.1 การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น



รูปที่ 2.1 การจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม ด้วยกระบวนการเชื่อม Friction Stir Welding

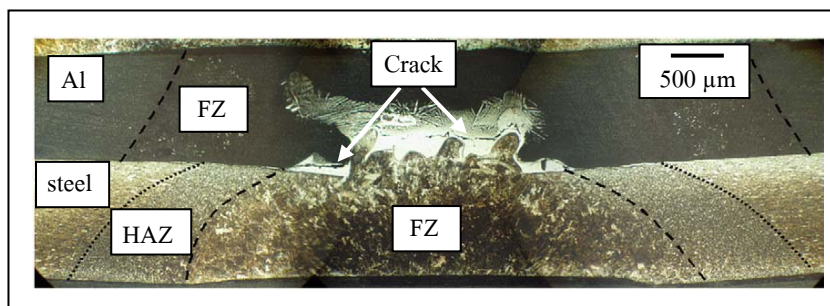
ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกันหลากหลายเทคโนโลยี อาทิเช่น การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเกรด SS400 หนา 2 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด A5083 หนา 2 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการเชื่อม Friction Stir Welding ซึ่ง Rotating pin ที่ใช้สำหรับการเชื่อมนี้ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ โดยขณะทำการเชื่อมจัดวางชิ้นงานเชื่อมแบบต่อชน ลักษณะการจัดวางชิ้นงานขณะทำการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 2.1 (Kimapong, K. and Watanabe, T., 2004) หรือการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด GXES กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 6061 T4 ด้วยกระบวนการ Brazing โดยใช้โลหะเติมที่มีสังกะสีเป็นส่วนผสมหลัก เติมลงบริเวณรอยเชื่อม และใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนสำหรับการเชื่อม ซึ่งลักษณะการจัดวางชิ้นงานเชื่อมและตำแหน่งการกราดลำแสงเลเซอร์แสดงดังรูปที่ 2.2 (Mathieu, A. et al., 2007) หรือการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเกรด DC04 หนา 1.2 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 6016-T4 หนา 1 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดิ่ง ขณะทำการเชื่อมทำการจัดวางชิ้นงานโลหะแผ่นในลักษณะซ้อนเกยโดยใช้เหล็กกล้า

แผ่นเป็นโลหะแผ่นบน ในการเชื่อมนี้จะกระทำในลักษณะที่ทำให้เหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหลอมเหลวรวมกัน หลังจากการเชื่อมพบว่า มีสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นในปริมาณมาก ณ บริเวณรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 นอกจากนี้ยังพบว่า มีรอยแตกเกิดขึ้นบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นด้วย ชิ้นงานเชื่อมจึงมีสมบัติเชิงกลไม่ดี (Sierra, G. et al., 2008)

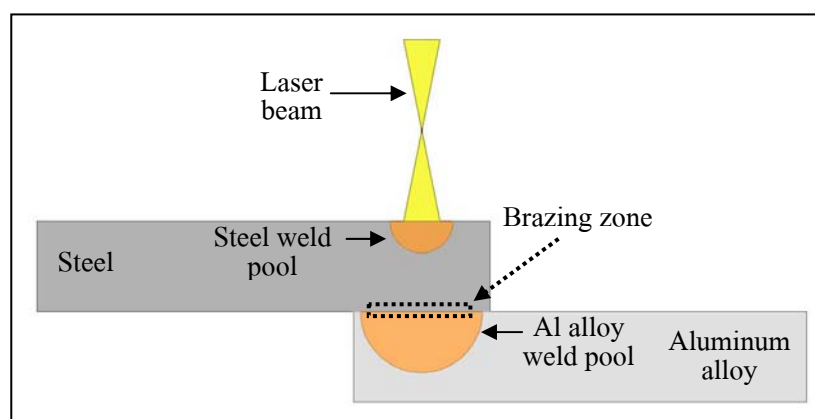


รูปที่ 2.2 การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นโดยกระบวนการ Brazing ด้วยโลหะเติมที่มีสังกะสีเป็นส่วนผสมหลัก

นอกจากเทคนิคต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว หนึ่งในเทคนิคที่ถูกนิยมใช้สำหรับทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นคือเทคนิค Self-brazing เนื่องจากเทคนิคนี้มีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น ไม่จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบอย่างเป็นพิเศษ ไม่มีการใช้โลหะเติมลงในบริเวณรอยเชื่อมส่งผลให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ และที่สำคัญขณะทำการเชื่อมไม่เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกล้าหลอมเหลวกับโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยตรง ส่งผลให้สารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งมีสมบัติเปราะ และเกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะเป็นเพียงชั้นบาง ๆ ทำให้อายุการใช้งานที่มีสมบัติเชิงกลดี ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เทคนิค Self-brazing เป็นเทคนิคหนึ่งที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายร่วมกับกระบวนการเชื่อมประเภทต่าง ๆ เพื่อทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

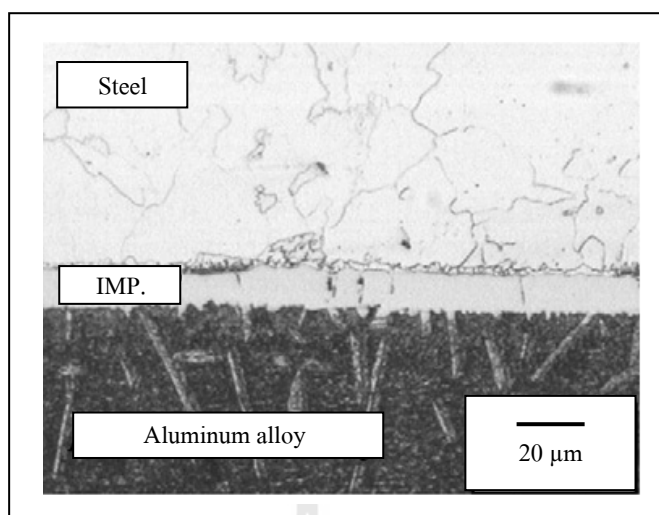


รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ซึ่งเหล็กกล้าเกิดการหลอมเหลวร่วมกับโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว

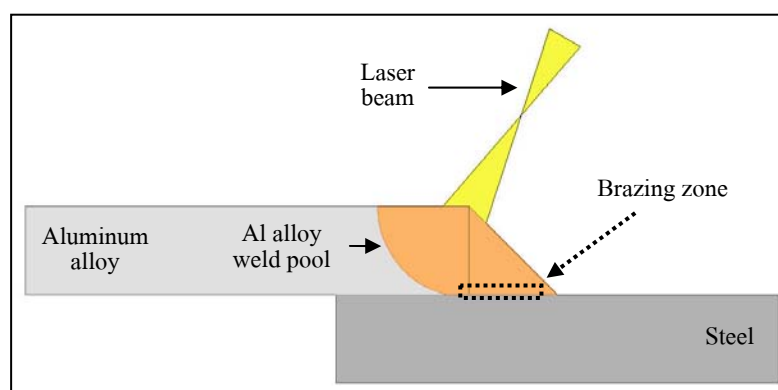


รูปที่ 2.4 การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ด้วยเทคนิค Self-brazing โดยใช้เหล็กกล้าเป็นโลหะแผ่นบน

(Borrisutthekul, R. et al., 2007) ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่น (Dual-Ten 590 steel) หนา 1.2 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด A6022-O หนา 1.6 มิลลิเมตร โดยใช้กระบวนการเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์ และอาศัยเทคนิค Self-brazing ขณะทำการเชื่อมจัดวางชิ้นงานเชื่อมในลักษณะซ้อนเกยโดยใช้เหล็กกล้าแผ่นเป็นโลหะแผ่นบน และกราดลำแสงเลเซอร์ลงบนเหล็กกล้าแผ่นด้านบนด้วยลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในขณะที่ทำการเชื่อมเมื่อความร้อนถ่ายเทจากแหล่งกำเนิดลงสู่เหล็กกล้าแผ่นบนและถ่ายเทต่อลงสู่โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้านล่างจะทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้านล่างเกิดการหลอมเหลวและทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าแผ่นด้านบนเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound Phase, IMP) ที่มีลักษณะเป็นเพียงชั้นบาง ๆ ณ รอยต่อระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.5



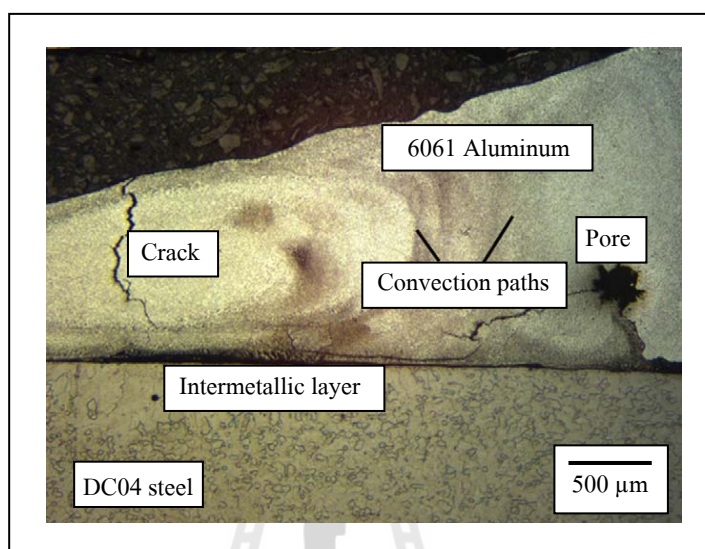
รูปที่ 2.5 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมแสงเลเซอร์ และอาศัยเทคนิค Self-brazing



รูปที่ 2.6 การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยเทคนิค Self-brazing โดยใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะแผ่นบน

นอกจากนี้ (Peyre, P. et al., 2007) ได้ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด DC 04 หนา 1.2 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 6061-T4 หนา 1 มิลลิเมตร โดยกระบวนการเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์และอาศัยเทคนิค Self-brazing ในขณะที่ทำการเชื่อมจัดวางโลหะแผ่นในลักษณะซ้อนเกยโดยใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะแผ่นบน และทำการกราดลำแสงเลเซอร์ไปยังบริเวณขอบของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อโลหะผสม

อะลูมิเนียมแผ่นนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหลอมเหลวของโลหะผสมอะลูมิเนียม จะหลอมเหลว และเกิดการไหลลงมาทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าแผ่นด้านล่าง เกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นจากการเชื่อมโดยอาศัยเทคนิค Self-brazing

2.2 ลักษณะของบ่อน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในขณะทำการเชื่อม

ลักษณะของบ่อน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในขณะทำการเชื่อมนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน จากผลการวิจัยจำนวนหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่า ในกระบวนการเชื่อมโดยอาศัยความร้อนจากปรากฏการณ์อาร์คนั้น การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมซึ่งส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่ส่งสู่ชิ้นงานเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น จะทำให้ลักษณะของบ่อน้ำโลหะที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยตัวแปรการเชื่อมดังกล่าวนี้ อาจประกอบไปด้วย กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม หรือระยะห่างระหว่างปลายอิเล็กโทรดถึงผิวชิ้นงานเชื่อม เป็นต้น (Bonifaz, E. A., 2000; Pierce S. W. et al., 1999)

อนึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภทระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเข้ามาช่วยในการแก้ปัญหาทางความร้อน ซึ่งหนึ่งในโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทำงานโดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเป็นที่ได้รับความนิยมใช้ในการแก้ปัญหาทางความร้อนคือ โปรแกรม MARC MENTAT และในปัจจุบันได้มีผู้ประยุกต์ใช้โปรแกรมดังกล่าว

นี้เพื่อทำนายการกระจายตัวของความร้อนในขณะที่ทำการเชื่อมด้วยกันหลายงาน เช่น การประยุกต์ใช้โปรแกรม MARC MENTAT เพื่อศึกษาความเครียดตกค้างในชิ้นงานเชื่อมโลหะไทเทเนียม (Liu, X.S. et al., 2004) หรือการประยุกต์โปรแกรม MARC MENTAT สำหรับทำนายการกระจายตัวของความร้อนในขณะที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น (Kerstens, N.F.H. and Richardson, I.M., 2009) เป็นต้น ในกระบวนการเชื่อมที่อธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.1 (Messler, R. W., 2004) ในขณะที่ทำการเชื่อมที่เนื่องจกมีทั้งความร้อนจากภายนอกส่งสู่ชิ้นงาน และมีความร้อนจากชิ้นงานสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม ด้วยลักษณะการถ่ายเทความร้อนในชิ้นงานเชื่อมดังกล่าว การกำหนดปัญหาขอบเขตในการแก้สมการทางความร้อนดังสมการที่ 2.1 สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.2 และ 2.3 ซึ่งโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1 ได้ถูกพัฒนาให้สามารถแก้ปัญหาขอบเขตเหล่านี้แล้ว

$$\begin{aligned}
 & \text{(พจน์ที่ 1)} \quad \text{(พจน์ที่ 2)} \\
 \rho C(T) \frac{dT}{dx} &= \frac{d}{dx} \left[k(T) \frac{dT}{dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[k(T) \frac{dT}{dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[k(T) \frac{dT}{dz} \right] \\
 & + \rho C(T) \left(v_x \frac{dT}{dx} + v_y \frac{dT}{dy} + v_z \frac{dT}{dz} \right) + Q \quad \text{(พจน์ที่ 3)} \quad \text{(พจน์ที่ 4)}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

โดยที่	พจน์ที่ 1	คือ	อัตราการไหลของความร้อนภายในชิ้นงานเชื่อมต่อหน่วยปริมาตร
	พจน์ที่ 2	คือ	การไหลของความร้อนภายในชิ้นงานเชื่อมเนื่องจากการนำความร้อน
	พจน์ที่ 3	คือ	การไหลของความร้อนภายในชิ้นงานเชื่อมเนื่องจากการพาความร้อน
	พจน์ที่ 4	คือ	อัตราความร้อนต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งความร้อนปริมาณนี้เกิดขึ้นภายในชิ้นงานเชื่อมในขณะที่ทำการเชื่อม

$$q(x, y, z) = \frac{3Q}{\pi r^2} \exp\left(\frac{-3x^2}{r^2}\right) \exp\left(\frac{-3z^2}{r^2}\right) \tag{2.2}$$

โดยที่	q	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนต่อหน่วยพื้นที่
--------	-----	-----	---

โดยที่ Q	คือ	กำลังการให้ความร้อนของแหล่งกำเนิดความร้อน
r	คือ	รัศมีการกระจายตัวของความร้อน บริเวณผิวชิ้นงานเชื่อม
x, y, z	คือ	ตำแหน่งอ้างอิงต่าง ๆ ในขณะทำการเชื่อม

$$q = h(T_{surface} - T_{environment}) \quad (2.3)$$

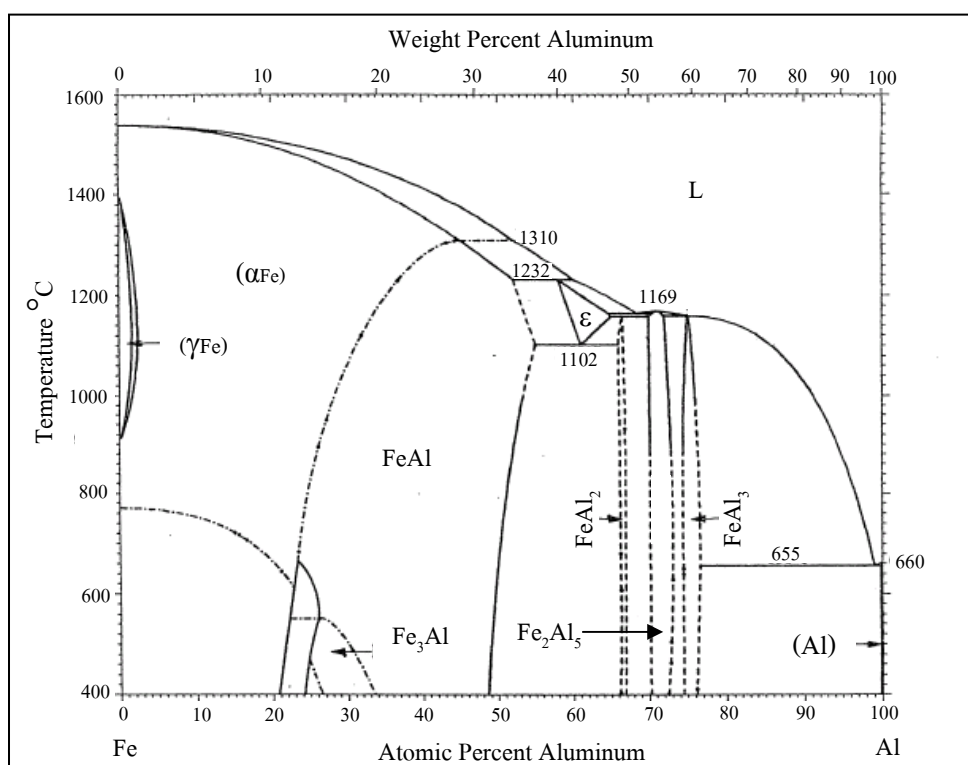
โดยที่ q	คือ	อัตราความร้อนที่ถ่ายเทออกจากผิวชิ้นงาน
h	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่าง ผิวชิ้นงานเชื่อมกับสิ่งแวดล้อม
$T_{surface}$	คือ	อุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานเชื่อม
$T_{environment}$	คือ	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

2.3 กลไกการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในขณะทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นนั้น ในขณะทำการเชื่อมจะมีการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียม ขึ้นบริเวณรอยเชื่อม โดยจากแผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมดังรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่า สารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมดังกล่าวมีด้วยกันห้าประเภทได้แก่ Fe_3Al $FeAl$ $FeAl_2$ Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ (Kobayashi, S. and Yakou, T., 2001) โดยมีผู้ได้พยายามอธิบายกลไก การเกิดสารประกอบเชิงโลหะดังกล่าว ตัวอย่างเช่น (Rathod, M.J. and Kutsuna, M., 2004) ได้เสนอ กลไกการเกิดสารประกอบเชิงดังกล่าว โดยกลไกนี้แบ่งเป็นสองขั้นดังนี้

$$E_{IMC} = E_{Sol} + E_{Eff} \quad (2.4)$$

โดยที่ E_{IMC}	คือ	พลังงานกระตุ้นทั้งหมดในการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ
E_{Sol}	คือ	พลังงานกระตุ้นให้เกิดสารละลายของแข็งอิมตัวยังยวด
E_{Eff}	คือ	พลังงานกระตุ้นให้สารละลายของแข็งอิมตัวยังยวด เปลี่ยนเป็นสารประกอบเชิงโลหะ



รูปที่ 2.8 แผนภูมิสมมูลระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียม

1) การเคลื่อนที่ของอะตอม โลหะสองชนิดเข้าหากันจนกระทั่งเกิดสารละลายของแข็งอัมตั่วยิ่งยวดขึ้น ณ บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะทั้งสอง ซึ่งในการเกิดสารละลายของแข็งอัมตั่วยิ่งยวดนี้ ต้องอาศัยพลังงานจำนวนหนึ่ง โดยพลังงานนี้จะมีค่าคงที่สำหรับการเกิดสารละลายของแข็งอัมตั่วยิ่งยวดใด ๆ

2) จากนั้นสารละลายของแข็งอัมตั่วยิ่งยวดที่เกิดขึ้น จึงจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งต้องอาศัยพลังงานอีกจำนวนหนึ่ง

โดยพลังงานทั้งหมดในการเกิดสารประกอบเชิงโลหะด้วยกลไกสองขั้นดังกล่าว แสดงดังสมการที่ 2.4 นอกจากนี้ผู้เสนอกลไกนี้ยังได้กล่าวว่า พลังงานกระตุ้นที่ทำให้สารละลายของแข็งอัมตั่วยิ่งยวดเปลี่ยนเป็นสารประกอบเชิงโลหะนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ อาทิเช่น ความดัน ณ บริเวณที่โลหะสองชนิดสัมผัสกัน ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้น ณ ผิวของโลหะ เป็นต้น

สำหรับชั้นสารประกอบเชิงที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นนั้น เกิดขึ้นจากการที่โลหะผสมอะลูมิเนียมเกิดการหลอมเหลว และทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าแผ่นซึ่งอยู่ในสถานะของแข็ง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้คือปฏิกิริยา

การแพร่ร่วมกันของอะตอมเหล็กกับอะตอมอะลูมิเนียม (Borrisutthekul, R. et al., 2007) และเนื่องจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการเชื่อมนี้เกิดขึ้นจากการแพร่ จึงทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมมีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่เกิดการแพร่ (Borrisutthekul, R. et al., 2007; Kobayashi, S. and Yakou T., 2001) ดังสมการที่ 2.5 และค่าคงที่ (K) ในสมการที่ 2.5 นี้ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในขณะที่เกิดการแพร่ ดังสมการที่ 2.6

$$X = K\sqrt{t} \quad (2.5)$$

โดยที่	X	คือ	ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
	K	คือ	ค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ
	t	คือ	ช่วงเวลาที่เกิดการแพร่

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.6)$$

โดยที่	K	คือ	ค่าคงที่ในของการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
	K_0	คือ	ค่าคงที่ของการเกิดการแพร่
	Q	คือ	พลังงานกระตุ้นให้เกิดการแพร่
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ
	T	คือ	อุณหภูมิขณะเกิดการแพร่

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี วิธีการทดลอง และการวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟฟ้าในเตาอิเล็กโทรไลต์

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุต่าง ๆ (ACI., 2010)

Material	Chemical Composition (wt %)							
	Fe	C	Mn	Cu	Si	Mg	Zn	Al
Low carbon steel sheet	Bal.	0.077	0.277	<0.005	0.016	0.001	-	0.052
1100-H12 Al	0.581	-	-	0.073	0.110	<0.001	0.018	Bal.
5052-H32 Al	0.40	-	0.10	0.10	0.25	2.5	0.10	Bal.

ตารางที่ 3.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุต่าง ๆ (ACI., 2010)

Material	Mechanical Property		
	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Low carbon steel sheet	275	380	21
1100-H12 Al	105	110	12
5052-H32 Al	195	230	12

ตารางที่ 3.3 สมบัติทางความร้อนของวัสดุต่าง ๆ (ACI., 2010)

Material	Thermal property			
	Thermal Conductivity (W/m-K)	Specific Heat Capacity (W/kg-K)	Melting Point (K)	Thermal Expansion ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)
Low carbon steel sheet	65.2	481	1811	13.7
1100-H12 Al	222	904	930	25.5
5052-H32 Al	138	904	922	25.7

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ด้วยวัตถุประสงค์ของการทำวิจัยที่ต้องการศึกษาอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นและความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อลักษณะ

ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อม ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้วัสดุต่าง ๆ อันประกอบไปด้วยเหล็กกล้ารีดร้อนคาร์บอนต่ำชนิดแผ่นความหนา 1 และ 1.5 มิลลิเมตร โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 ความหนา 1 มิลลิเมตร และโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 ความหนา 1 และ 1.5 มิลลิเมตร โดยส่วนผสมทางเคมี สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามลักษณะการใช้งานได้ ดังนี้

ก) อุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงาน โลหะแผ่นที่ใช้ในการเชื่อม

- เครื่องตัดโลหะแผ่นโดยอาศัยแรงเฉือน ใช้สำหรับตัดโลหะแผ่นซึ่งมีขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.2

- หินเจียรใช้สำหรับกำจัดครีบของชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อมซึ่งเกิดจากการตัดด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่นโดยอาศัยแรงเฉือน

- แผ่นให้ความร้อน กระบอกตวง บีกเกอร์ เทอร์โมมิเตอร์ หลอดหยด และแท่งแก้วกวนสารใช้สำหรับเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกอุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในการกำจัดชั้นออกไซด์ออกจากผิวของเหล็กกล้าแผ่นรีดร้อน

ข) อุปกรณ์สำหรับการเชื่อม

- เครื่องเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดึง ยี่ห้อ HOBART รุ่น TIGWAVE 350 AC/DC ใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในขณะทำการเชื่อมโดยเครื่องเชื่อมที่ใช้มีสมบัติและความสามารถในการใช้งานดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของเครื่องเชื่อม

Item	Specification
Rated Output Amperage	350A
Rated Output Voltage	34 V
Rated Duty Cycle	40%
Rated Input Voltage	380 V
Input kW	17 kW
Input Frequency	50/60 Hz
Input Phase	Single
Pre flow Gas Time	0.1-5 sec
Post flow Gas Time	3-50 sec
Crater Fill Time	0.5-15 sec
Spot Time	0.25-6 sec

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมทางเคมีของแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อม (ACI., 2010)

Material	Chemical Composition (wt %)							
	Fe	C	Mn	Cu	Si	Mg	Zn	Al
Carbon steel backing block	Bal.	0.75	0.753	0.116	0.116	0.002	-	<0.001

ตารางที่ 3.6 สมบัติเชิงกลของแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อม (ACI., 2010)

Material	Mechanical Property		
	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Carbon steel backing block	585	965	12

ตารางที่ 3.7 สมบัติทางความร้อนของแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อม (ACI., 2010)

Material	Thermal Property			
	Thermal conductivity (W/m-K)	Specific heat capacity (W/kg-K)	Melting Point (K)	Thermal Expansion ($\mu\text{m/m-}^{\circ}\text{C}$)
Carbon steel backing block	47.7	490	1811	13.7

- อุปกรณ์จับยึดหัวเชื่อมพร้อม Dial Gauge ใช้สำหรับจับยึดหัวเชื่อม และควบคุมระยะห่างระหว่างปลายอิเล็กโทรดกับผิวของชิ้นงานเชื่อม

- อุปกรณ์เลื่อนชิ้นงานแกนเดียวแบบกึ่งอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ใช้ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานเชื่อมและควบคุมความเร็วในการเชื่อม

- อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม ทำจากโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ใช้สำหรับจับยึดชิ้นงานขณะทำการเชื่อม โดยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมนี้ผ่านการเจาะเป็นช่อง ในตำแหน่งด้านล่างของแนวการเชื่อมสำหรับใส่แท่งโลหะรองใต้ชิ้นงาน โดยแท่งโลหะรองใต้ชิ้นงานนี้ทำหน้าที่ป้องกันชิ้นงานเชื่อมไม่ให้เกิดการหลอมทะลุได้ง่ายในขณะที่ทำการเชื่อม

- แท่งโลหะรองใต้ชิ้นงานเชื่อม ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด 1080 มีขนาด 15 x 20 x 170 มิลลิเมตร มีส่วนผสมทางเคมี สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 3.5 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

ค) อุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงานเชื่อมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติเชิงกล

- เครื่องตัด โลหะ EDM WIRECUT รุ่น CHARMILLS TECHNOLOGIES ROBOFIL 190 พร้อมด้วยลวดตัดทำด้วยโลหะทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ใช้สำหรับตัดชิ้นงานหลังการเชื่อมให้มีลักษณะเป็นชิ้นงานตัดขวางแนวรอยเชื่อมเพื่อนำไป

ตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค และใช้สำหรับตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึงซึ่งมีลักษณะดังแสดง ในรูปที่ 3.4

- ชุดทำตัวเรือนแบบเรซินหล่อใส ใช้สำหรับทำตัวเรือนชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการตัดขวางแนวรอยเชื่อมเพื่อความสะดวกในการเตรียมผิวและการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

- เครื่องขัดชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อ BUEHLER รุ่น ECOMET6 ใช้เป็น อุปกรณ์ช่วยขัดหยาบและขัดละเอียดชิ้นงานเชื่อมที่ทำตัวเรือนแล้ว

- กระดาษทราย ฟ้ายัดกลาด ผงอะลูมินา วัสดุสำหรับการขัดหยาบและขัดละเอียดชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการทำตัวเรือนแล้ว

ง) อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติเชิงกลของ ชิ้นงานเชื่อม

- กล้องจุลทรรศน์แบบแสง รุ่น ZEISS AX10 พร้อมด้วยโปรแกรม Image Analysis ใช้ในการตรวจสอบ โครงสร้างบริเวณรอยเชื่อม โลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

- เครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 100 kN รุ่น INSTRON 5528 ใช้สำหรับการทดสอบแรงดึงชิ้นงานเชื่อม

จ) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์

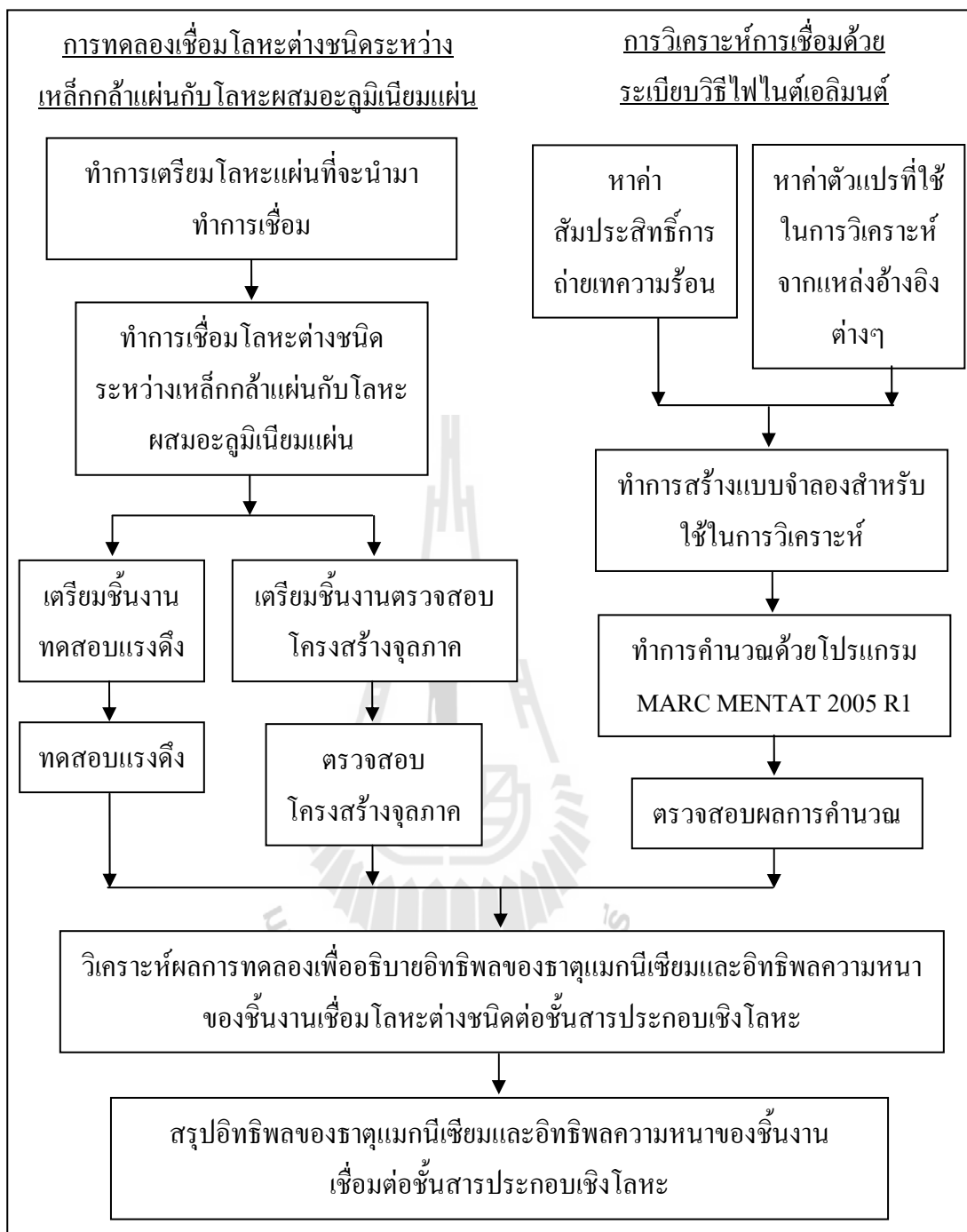
- เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้ง เทอร์โมคัปเปิล

- เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น MW 100 ร่วมกับคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ยี่ห้อ Compaq รุ่น Compaq Presario CQ 45 พร้อมโปรแกรม MW 100 software ใช้สำหรับบันทึกผลการวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง เทอร์โมคัปเปิล

- เตาอบอุณหภูมิสูง รุ่น CARBOLITE TYPE CWF 12/13 ใช้สำหรับอบ ชิ้นงานให้มีอุณหภูมิสูงก่อนการบันทึกข้อมูลการเย็นตัวของชิ้นงานเพื่อนำข้อมูลมาประยุกต์ หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- น้ำกลั่น กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 37% กรดไฮโดรฟลูออริก เข้มข้น 40% กรดไนตริก เข้มข้น 65% และ เอทานอล 95 ดีกรี สารเคมีเหล่านี้ใช้เพื่อเตรียมสารละลายสำหรับ กำจัดชั้นออกไซด์ออกจากผิวเหล็กกล้าแผ่นรีดร้อน และใช้สำหรับการกัดผิวโลหะในการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.1 ภาพรวมวิธีการดำเนินการวิจัย

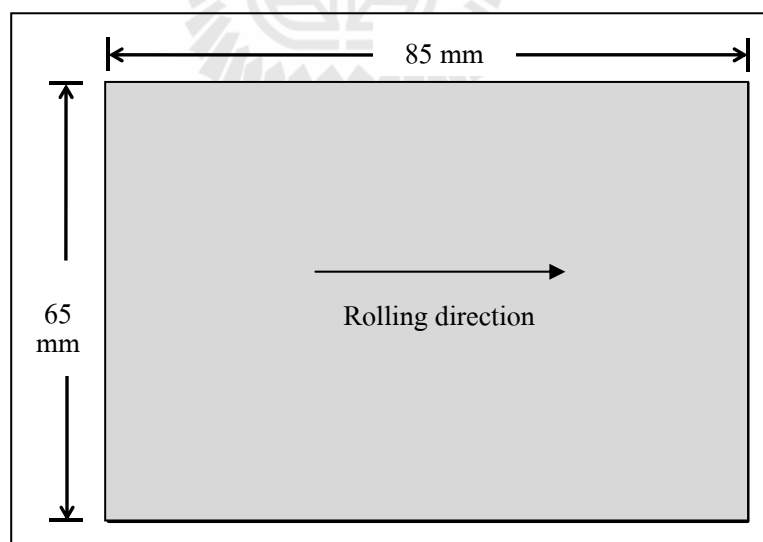
3.2 วิธีการทดลอง

ด้วยวิธีการดำเนินการวิจัยนี้มีหลายขั้นตอน เริ่มตั้งแต่การเตรียมโลหะแผ่นที่จะนำมาทำการเชื่อม การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อม และยังมีการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยวิเคราะห์การเชื่อมด้วย ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกในการเข้าใจภาพรวมของวิธีการดำเนินการวิจัยผู้วิจัยจึงได้สร้างแผนผังการทำวิจัยทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยวิธีการอย่างละเอียดในขั้นตอนต่าง ๆ ของการวิจัยจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

3.2.1 การเตรียมโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อม

การเตรียมโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมกระทำโดยนำเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นที่ได้จากการสั่งซื้อตามท้องตลาดซึ่งมีขนาด 4 ฟุต ยาว 8 ฟุต มาทำการตัดด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น โดยอาศัยแรงเฉือนให้มีขนาดกว้าง 65 มิลลิเมตร ยาว 85 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 หลังจากตัดโลหะแผ่นนำโลหะแผ่นที่ได้นี้มากำจัดครีบทที่เกิดจากการตัดโดยใช้หินเจียร จากนั้นนำโลหะแผ่นที่ใช้ในการเชื่อมซึ่งเป็นเหล็กกล้าแผ่นมาทำการกำจัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรีดร้อนโดยการจุ่มลงในสารละลายที่ได้จากการผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 12 มิลลิตรกับน้ำกลั่น ปริมาตร 88 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2-3 นาที ก่อนการเชื่อมขัดผิวเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 ในบริเวณที่จะทำการเชื่อม จากนั้นเช็ดทำความสะอาดผิวโลหะแผ่นอีกครั้งด้วยผ้าสะอาด

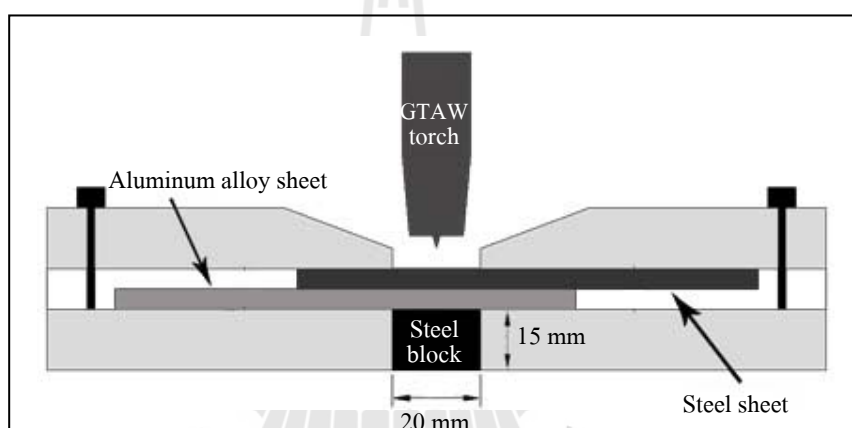


รูปที่ 3.2 ลักษณะและขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อม

3.2.2 การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นนั้นกระทำโดยใช้กระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดิ่ง และอาศัยเทคนิค Self-brazing ซึ่งทำการจัดวางโลหะแผ่นที่ต้องการเชื่อมบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และก่อนการเชื่อมทำการปรับตั้งเครื่องเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดิ่งดังนี้

- (1) ปรับขั้วไฟฟ้าโดยให้อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบและชิ้นงานเป็นขั้วบวก (DCEN)
- (2) ปรับเวลาในการปล่อยก๊าซปกคลุมรอยเชื่อมก่อนการอาร์คเป็นเวลา 0.5 วินาที
- (3) ปรับเวลาในการปล่อยก๊าซปกคลุมรอยเชื่อมหลังการอาร์คเป็นเวลา 5 วินาที
- (4) ปรับอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมรอยเชื่อมในอัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 3.3 ลักษณะการจัดวางชิ้นงานเชื่อมบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

สำหรับอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมเป็นชนิด EWTh-2 (เจือ 2% ทอเรียมออกไซด์) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ทำการเหลาปลายอิเล็กโทรดให้มีลักษณะเป็นกรวยที่มีมุมปลายเท่ากับ 60 องศา ใช้หัวฉีดก๊าซปกคลุมรอยเชื่อมซึ่งทำจากเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12.55 มิลลิเมตร จากนั้นทำการตั้งระยะห่างระหว่างปลายอิเล็กโทรดถึงผิวชิ้นงานเท่ากับ 2.4 มิลลิเมตรโดยการวัดระยะด้วย Dial Gauge เนื่องจากในการทำวิจัยนี้ต้องการศึกษาอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ใน โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นและอิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาเชื่อมต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ดังนั้นจึงได้ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกัน 4 ลักษณะดังนี้

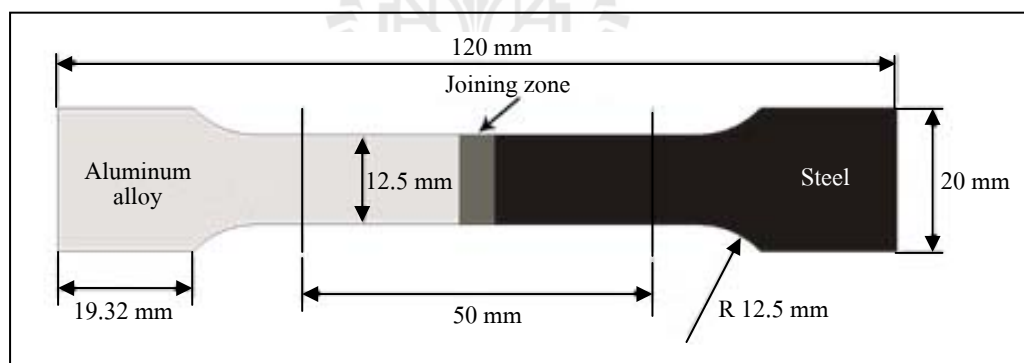
(1) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12
หนา 1 มิลลิเมตร

(2) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32
หนา 1 มิลลิเมตร

(3) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด
5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร

(4) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32
หนา 1.5 มิลลิเมตร

ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น
ทั้ง 4 ลักษณะดังกล่าว ทำการเชื่อมด้วยความเร็วสามค่าดังนี้ 0.55 0.6 และ 0.65 เมตรต่อนาที
ในแต่ละความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมจะใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมตั้งแต่ช่วงกระแสไฟฟ้าต่ำ
ในระดับที่ไม่สามารถทำให้ชิ้นงานเกิดการเชื่อมติดได้ จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าสูงถึงระดับที่
ทำให้ชิ้นงานเชื่อมเกิดการหลอมทะลุ โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมถูกปรับเปลี่ยน
ครั้งละ 10 แอมแปร์



รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึง

3.2.3 การเตรียมชิ้นงานเชื่อมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติเชิงกล

ภายหลังจากการเชื่อม นำชิ้นงานเชื่อมไปทำการตัดด้วยเครื่องตัดโลหะ EDM WIRECUT เพื่อนำชิ้นงานที่ได้มาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางรอยเชื่อม
ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางรอยเชื่อม
คือ นำชิ้นงานตัดขวางรอยเชื่อมที่ได้จากการตัดด้วยเครื่องตัดโลหะ EDM WIRECUT ไปทำการ
หล่อเป็นตัวเรือนด้วยเรซินหล่อใสเพื่อความสะดวกในการเตรียมผิวและการตรวจสอบโครงสร้าง

จุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ภายหลังจากเรซินหล่อใส่แข็งตัวอย่างสมบูรณ์นำชิ้นงานไปทำการขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 180 320 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด และนำชิ้นงานไปขัดละเอียดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินา ขนาด 0.5 และ 0.03 ไมครอนตามลำดับ นำชิ้นงานที่ได้ล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างด้วยเอทานอล เช็ดให้แห้งด้วยกระดาษชำระ จากนั้นนำชิ้นงานไปกัดผิวเพื่อให้สามารถตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคได้ โดยชิ้นงานที่จะทำการตรวจสอบโครงสร้างบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะนำไปจุ่มลงในสารละลายที่ได้จากการผสมกรดไนตริกเข้มข้น 65 เปอร์เซ็นต์ 4 มิลลิลิตร และเอทานอล 95 ดีกรี 96 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 นาที สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นจะทำการกัดผิวโลหะด้วยสารละลายที่ได้จากการผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์ 60 มิลลิลิตร กรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ 5 มิลลิลิตร กรดไนตริกเข้มข้น 65 เปอร์เซ็นต์ 30 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร หลังจากการกัดผิวโลหะด้วยสารละลายดังกล่าวแล้ว นำชิ้นงานล้างด้วยเอทานอล และเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าแห้ง

สำหรับการเตรียมชิ้นงานเชื่อมเพื่อทดสอบแรงดึงมีวิธีการเตรียมคือ นำชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากการเชื่อมมาทำการตัดด้วยเครื่องตัดโลหะ EDM WIRECUT ให้มีขนาดและลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.4

3.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติเชิงกล

ภายหลังจากเตรียมผิวชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานที่ได้ไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโดยการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้นทำการตรวจสอบจากชิ้นงานในแนวตัดขวางรอยเชื่อม ซึ่งการตรวจสอบนี้เน้นไปที่การวัดความกว้าง และความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อม โดยวิธีการตรวจวัดความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมแสดงดังภาคผนวก ก.

สำหรับการทดสอบแรงดึงชิ้นงานเชื่อม กระทำโดยนำชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องตัดโลหะ EDM WIRECUT ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 แล้วไปทำการทดสอบแรงดึง โดยในการทดสอบแรงดึงนั้นใช้เครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 100 kN และทำการดึงด้วยอัตราการยืดตัวเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที หลังจากชิ้นงานเชื่อมเกิดการแตกหักเสียหายจากการทดสอบแรงดึงทำการตรวจสอบลักษณะการแตกหักด้วยตาเปล่า

3.3 การวิเคราะห์การเชื่อมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสม

อะลูมิเนียม ณ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยากับเหล็กกล้าแผ่นขณะทำการเชื่อม และทำนายช่วงเวลาที่ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการทำนายความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น จากนั้นนำผลที่ได้จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้มาช่วยในการวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นและอิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น โดยแผนผังขั้นตอนทั้งหมดในการวิเคราะห์การเชื่อมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.1

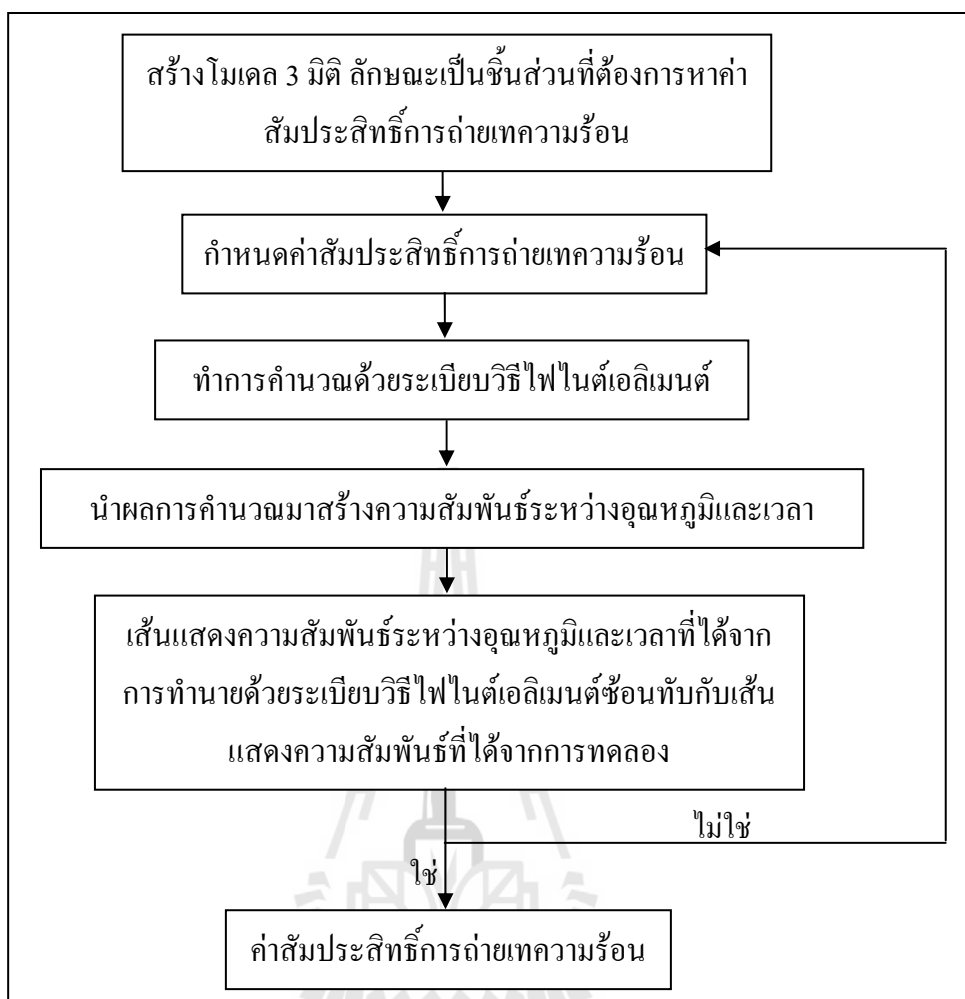
3.3.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่บ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของระบบที่สนใจกับสิ่งแวดล้อมที่อยู่โดยรอบ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีนิยามดังสมการที่ 3.1

$$h = \frac{\Delta Q}{\Delta T \times A \times \Delta t} \quad (3.1)$$

โดยที่	h	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
	ΔQ	คือ	ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม
	ΔT	คือ	ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกสุดของระบบกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม
	A	คือ	พื้นที่ที่เกิดการถ่ายเทความร้อน
	Δt	คือ	ช่วงเวลาที่เกิดการถ่ายเทความร้อน

สำหรับการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายกระบวนการเชื่อมนั้น การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดย่อมส่งผลให้การทำนายปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนในกระบวนการเชื่อมมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการทำนายกระบวนการเชื่อม การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการวิจัยนี้หาได้ด้วยวิธีการทางอ้อม ดังแสดงในรูปที่ 3.5

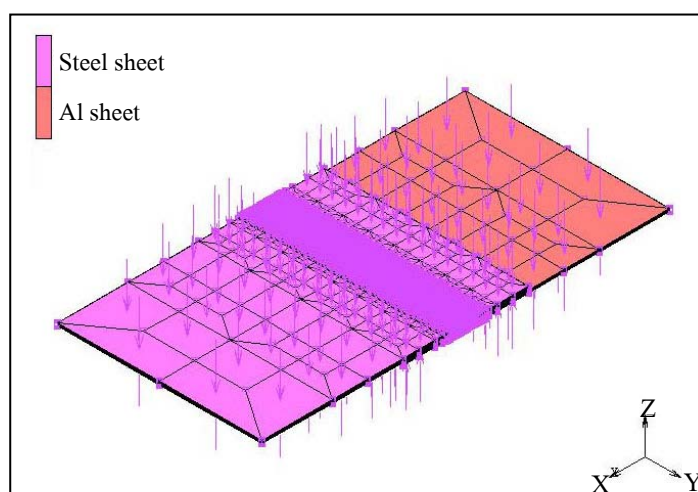


รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมมีวิธีการดังนี้ นำเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นที่ผ่านการเชื่อมแล้วไปทำการติดเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ณ ตำแหน่งกึ่งกลางรอยเชื่อม โดยการเชื่อมด้วย Resistance spot welding จากนั้นนำขั้วของเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองขั้วต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ซึ่งต่อพ่วงอยู่กับคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงจนกระทั่งชิ้นงานเชื่อมมีอุณหภูมิ 873 K หลังจากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมออกจากเตาเผาอุณหภูมิสูงแล้ววางลงบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมซึ่งปราศจากแท่งเหล็กสำหรับรองได้ชิ้นงานเชื่อมอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการจับยึดชิ้นงานด้วยอุปกรณ์จับยึด

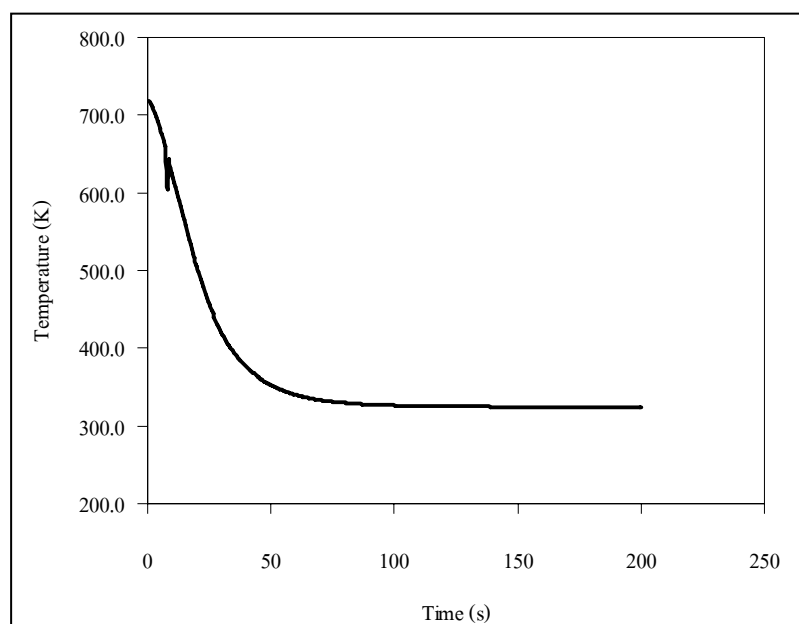
ชิ้นงานเชื่อมเรียบร้อย ทำการบันทึกอุณหภูมิเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบมาเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง นำข้อมูลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในแกนนอนและอุณหภูมิในแกนแกนตั้ง หลังจากนั้นทำการสร้างโมเดล 3 มิติ เป็นรูปชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นและชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1 จากนั้นทำการกำหนดสมบัติทางความร้อนให้กับโลหะทั้งสองด้วยค่าสมบัติทางความร้อนของวัสดุดังตารางที่ 3.3 และนำโลหะแผ่นทั้งสองมาประกอบกันในลักษณะซ้อนเกยโดยบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะแผ่นทั้งสองกำหนดให้เป็นรอยต่อสมบูรณ์ (Perfect Interface) โมเดลที่ใช้ในการทำยานี้มีจำนวนเอลิเมนต์และจำนวนโหนดทั้งหมดเท่ากับ 24656 และ 28097 ตามลำดับ และเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม จึงได้ทำการแบ่งเอลิเมนต์บริเวณแนวรอยเชื่อมให้มีขนาดเล็กเท่ากับ 0.625 มิลลิเมตร จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไปที่พื้นผิวทั้งหมดของชิ้นงานเชื่อมยกเว้นบริเวณรอยเชื่อมทั้งด้านบนและด้านล่าง และกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 319 K ทำการกำหนด time step ให้เท่ากับ time step ที่ได้จากการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลกล่าวคือ แต่ละ time step เวลาเพิ่มขึ้น 0.5 วินาที ใช้เวลาในการเย็นตัวทั้งหมด 200 วินาที โดยโมเดลที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โมเดลที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม

จากนั้นให้โปรแกรมทำการคำนวณ เมื่อการคำนวณเสร็จจึงสืบนำผลการคำนวณ ตำแหน่งบนโมเดลการเชื่อมซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ทำการติดเทอร์โมคัปเปิลบนชิ้นงานเชื่อมมาทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในแนวแกนนอน และอุณหภูมิอุณหภูมิ

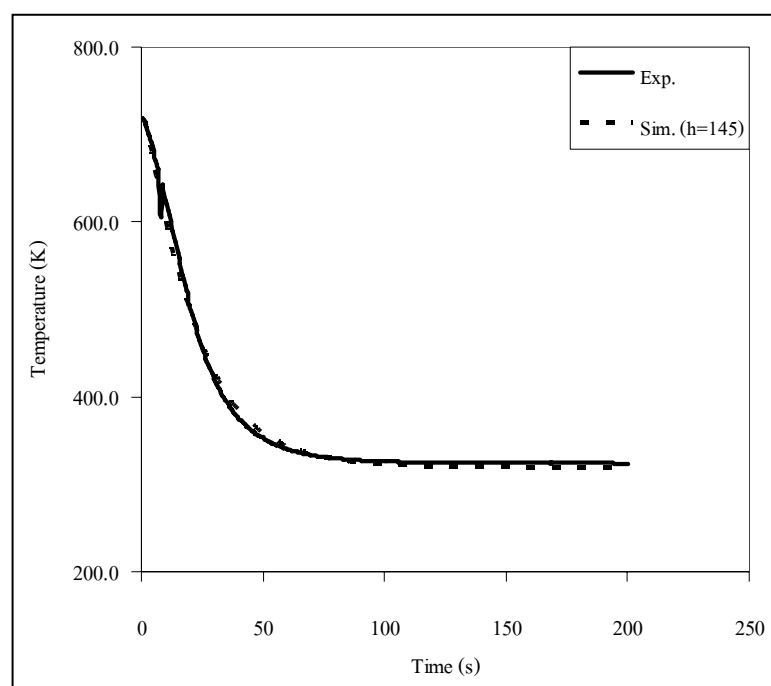
ในแนวแกนตั้งเช่นเดียวกับ การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง นำความสัมพันธ์ที่ได้จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง ทำการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในโมเดลที่ใช้ในการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จนกระทั่งเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ได้จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซ้อนทับกับเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ได้จากการทดลอง นั้นแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม ซึ่งมีความใกล้เคียงกับในการเชื่อมชิ้นงานจริง



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 จากการทดลอง

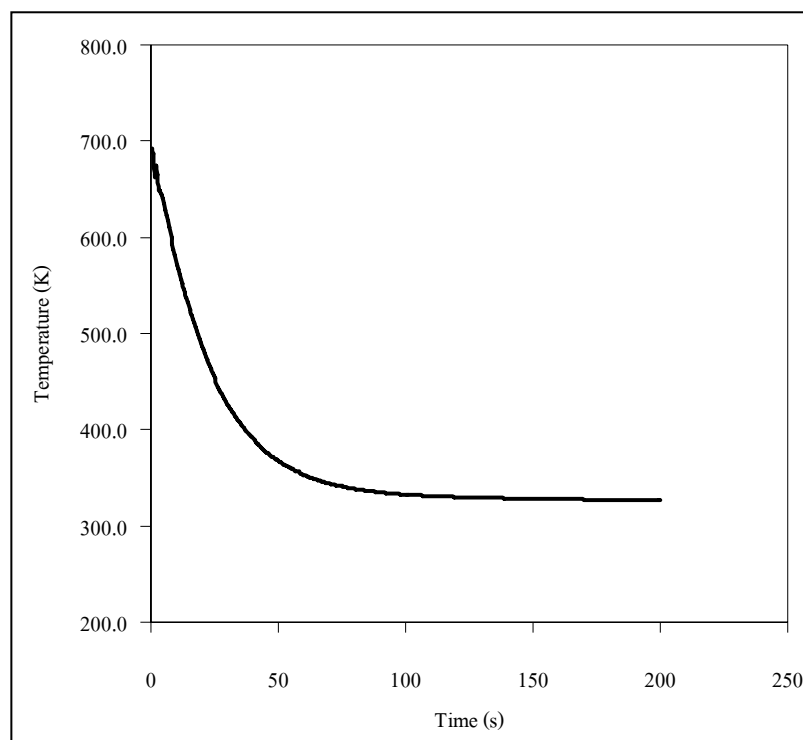
จากผลการบันทึกข้อมูลเวลาและอุณหภูมิในการเ็นตัวของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หลังนำออกจากเตาเผาอุณหภูมิสูง มาวางบนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม ได้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 3.7 จากนั้นเมื่อนำความสัมพันธ์นี้ไปเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ ซึ่งได้จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าในการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หากกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมนี้กับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเท่ากับ $145 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ จะทำให้เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา

กับอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซ้อนทับกับเส้นกราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองมากที่สุดดังรูปที่ 3.8 นั้นแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อม โลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 1100-H12 กับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานมีค่าประมาณ $145 \text{ W/m}^2 \text{ K}$



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 จากการทดลอง และการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

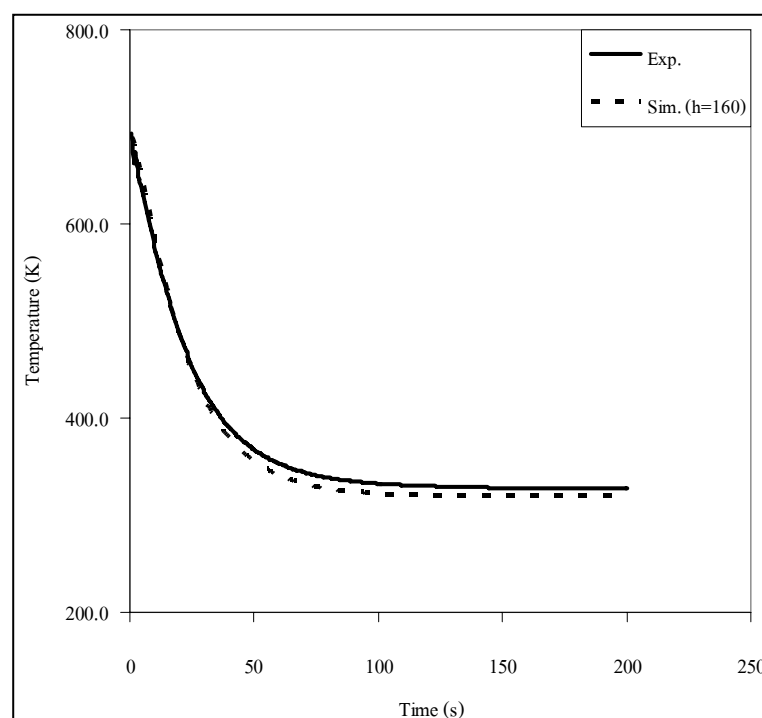
และเนื่องจากในการทำวิจัยครั้งนี้มีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 ซึ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นที่มีธาตุผสมแตกต่างกันอาจส่งผลให้ การถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงานเชื่อมแตกต่างกันด้วย ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการหาค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อม โลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 ด้วย จากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิของชิ้นงานเชื่อม โลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น เกรด 5052-H32 มีลักษณะดังรูปที่ 3.9 และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อม กับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมมีค่าเท่ากับ $160 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ดังการเปรียบเทียบลักษณะความสัมพันธ์ ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 จากการทดลอง

สำหรับทำนายนการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และในการทำนายนการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ $160 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมในกรณีการเชื่อมทั้งสองเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 นอกจากนี้ในขณะที่ทำการเชื่อมทำการจับยึดชิ้นงานเชื่อมในลักษณะเดียวกันกับในกรณีทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร และในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ด้วยการจับยึดชิ้นงานในลักษณะเดียวกันนี้ จึงทำให้พื้นผิวสัมผัสของชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมมีลักษณะเหมือนกัน ด้วยเหตุนี้พฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงานเชื่อมในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร ไปสู่อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมจึงมีลักษณะคล้ายคลึงกับในการเชื่อมโลหะ

ต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ดังนั้นในการทำนายการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และในการทำนายการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร

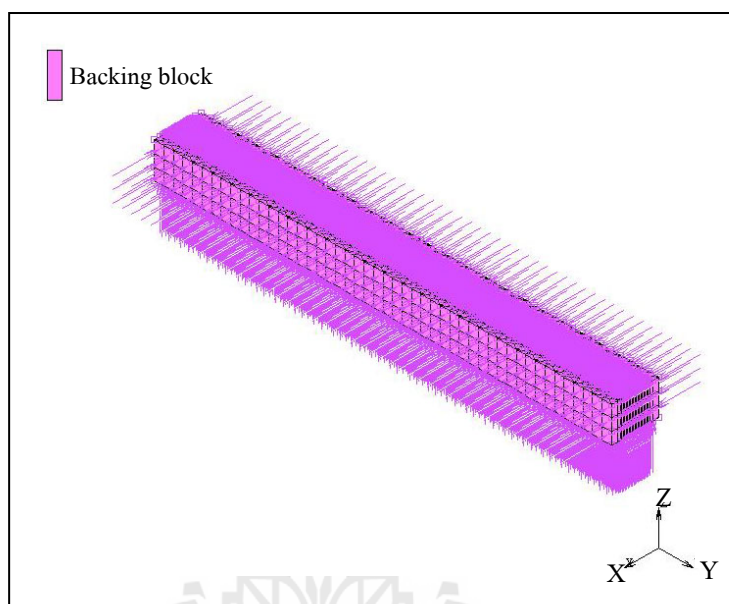


รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 จากการทดลองและจากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม

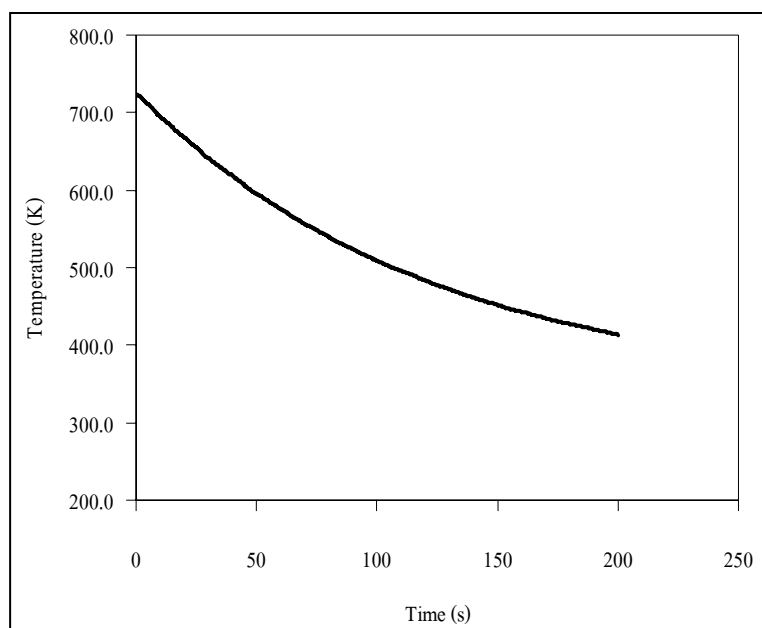
วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม นั้น กระทำในลักษณะเดียวกันกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมดังกล่าวไว้แล้ว แต่ในกรณีนี้จะเป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึด

ชิ้นงานแทน ในการกำหนด time step นั้นยังใช้เวลาทั้งหมดเป็น 200 วินาที โดยแต่ละ time step ยังกำหนดให้เวลาห่างกัน 0.5 วินาที โดยโมเดลที่ใช้มีจำนวนเอลิเมนต์และจำนวน โหนด เท่ากับ 26784 และ 36004 ตามลำดับ และโมเดลที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ระหว่างแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมแสดงดังรูปที่ 3.11

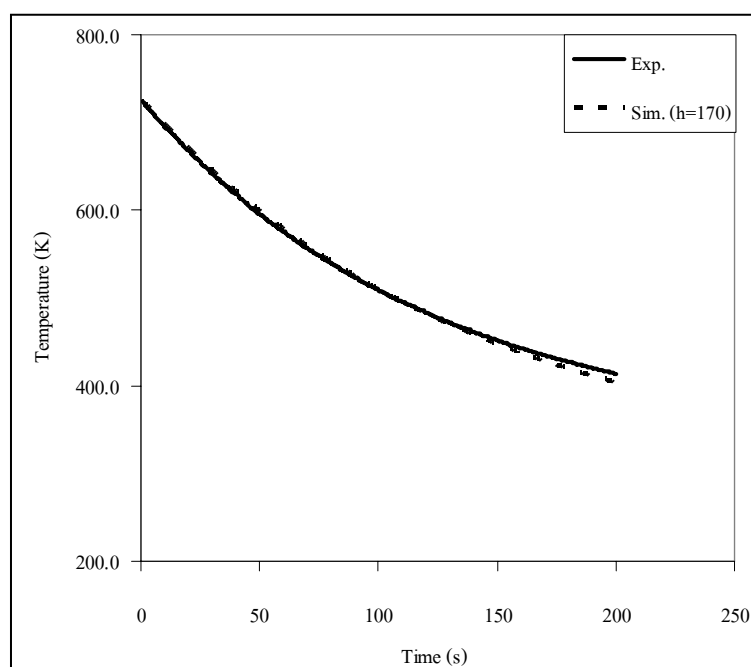


รูปที่ 3.11 โมเดลที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม

จากการทดลองนำแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมออกจากเตาอบอุณหภูมิสูงวางลงในช่องของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมแล้วทำการบันทึกข้อมูลเวลาและอุณหภูมิของแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิเป็นดังรูปที่ 3.12 ที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเท่ากับ $170 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ จะทำให้เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ ณ แท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมที่ได้จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซ้อนทับกับเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.13 นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมมีค่าประมาณ $170 \text{ W/m}^2 \text{ K}$



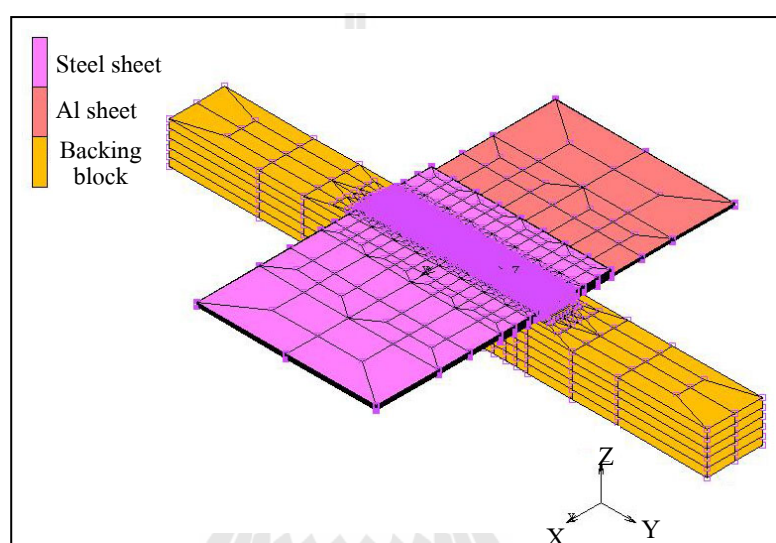
รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแท่งเหล็ก
รองได้ชิ้นงานเชื่อมจากการทดลอง



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแท่งเหล็กรองได้ชิ้นงานเชื่อม
จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.2 การทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมและการทำนายช่วงเวลา ที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวด้วยโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1

ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมและทำนายช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวของชิ้นงานในทุกความเร็วและทุกกระแสไฟฟ้าที่ทำการเชื่อมจริง โดยขั้นตอนการทำนาย และการตรวจสอบผลการทำนายด้วยโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1 มีดังนี้



รูปที่ 3.14 โมเดลที่ใช้ในการทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม
และเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลว

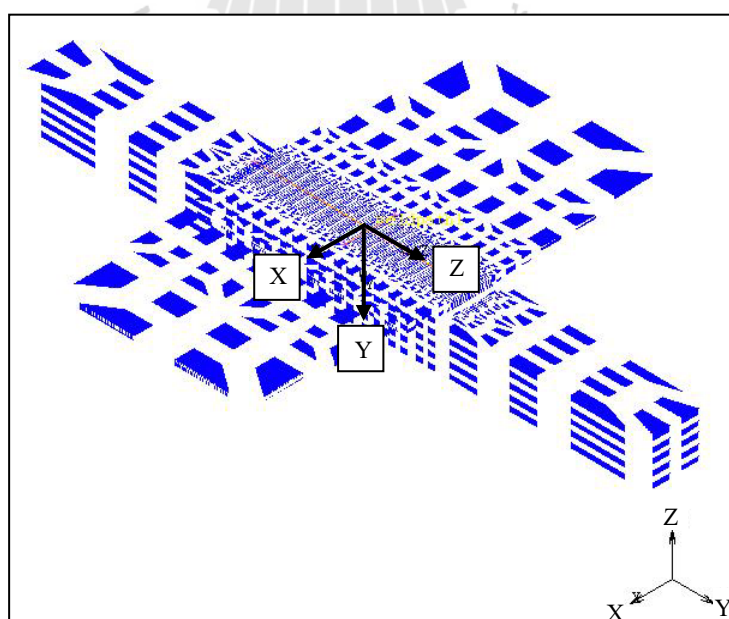
- ก) ขั้นตอนการทำนายด้วยโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1
- สร้างโมเดล 3 มิติ

ในการสร้างโมเดล 3 มิติจะทำการสร้างโมเดลที่มีรูปทรงเหมือนกับชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นซึ่งมีแท่งเหล็กรองรับชิ้นงาน และเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม จึงทำการแบ่งเอลิเมนต์ให้ละเอียดเฉพาะบริเวณแนวรอยเชื่อมโดยเอลิเมนต์บริเวณแนวรอยเชื่อมมีขนาด 0.625 มิลลิเมตร จากนั้นทำการกำหนดสมบัติทางความร้อนให้กับส่วนต่าง ๆ ของโมเดลตามลักษณะการวางชิ้นงานด้วยสมบัติทางความร้อนดังตารางที่ 3.3 และ 3.7 นอกจากนี้ในการประกอบโมเดลได้ทำการกำหนดให้ ธรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น และรอยต่อระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับแท่งเหล็ก

รองใต้ชิ้นงานเชื่อมเป็นรอยต่อสมบูรณ์ (Perfect Interface) โมเดลที่ใช้ในการทำนายมีลักษณะดังรูปที่ 3.14 โดยโมเดลในการทำนายสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร และโมเดลสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร มีจำนวนเอลิเมนต์และจำนวนโหนดทั้งหมดเท่ากับ 77060 และ 81162 ตามลำดับ และโมเดลที่ใช้สำหรับการทำนายการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร และการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร มีจำนวนเอลิเมนต์และจำนวนโหนดทั้งหมดเท่ากับ 92470 และ 96757 ตามลำดับ

- กำหนดทิศทางการเชื่อมลงในโมเดล

ในการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1 เพื่อทำนายกระบวนการเชื่อมนั้น ต้องทำการกำหนดทิศทางในการเชื่อม ทิศทางความร้อนลงสู่ชิ้นงาน และทิศทางสำหรับกำหนดรัศมีของแหล่งกำเนิดความร้อน โดยทิศทางการเชื่อมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.15 จากทิศทางตามแกนที่ปรากฏอยู่ในรูปที่ 3.15 ทิศทางตามแกน Z คือทิศทางเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดความร้อน ทิศทางการตามแกน x คือทิศทางสำหรับกำหนดขนาดรัศมีของแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งในการคำนวณครั้งนี้กำหนดให้แหล่งกำเนิดความร้อนมีลักษณะเป็นวงกลมบนผิวชิ้นงานเชื่อม และทิศทางตามแนว y กำหนดทิศทางความร้อนลงสู่ชิ้นงาน



รูปที่ 3.15 โมเดลที่ถูกกำหนดทิศทางในการเชื่อม

- กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น

การทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม และการทำนายเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวครั้งนี้ทำการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นคือ กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นไปที่ไหนคทุกไหนคในโมเดลเท่ากับ 303 K ซึ่งอุณหภูมินี้ได้จากการวัดในขณะที่ทำการเชื่อม

- กำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตมีดังนี้

1) สร้าง Face film บริเวณพื้นผิวชิ้นงานเชื่อมทั้งบริเวณเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น เพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม

2) สร้าง Face film บริเวณผิวของแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมเพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งเหล็กทรงใต้ชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม

3) สร้างพื้นผิวสำหรับให้ความร้อนลงสู่ชิ้นงานเชื่อม ณ บริเวณแนวรอยเชื่อม โดยความร้อนที่ถูกให้กับชิ้นงานเชื่อมในโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1 มีการกระจายตัวแบบ Gaussian

ในขั้นตอนนี้ยังได้ทำการกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม ขนาดรัศมีของความร้อนที่ตกกระทบบผิวชิ้นงานเชื่อมเท่ากับ 6 มิลลิเมตร (Pierce, S. W. et al., 1999) ความต่างศักย์ของเครื่องเชื่อม และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับความร้อนขณะทำการเชื่อมเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ (Messler, R. W., 2004)

- ปรับตั้งเวลาที่ใช้ในการเชื่อม

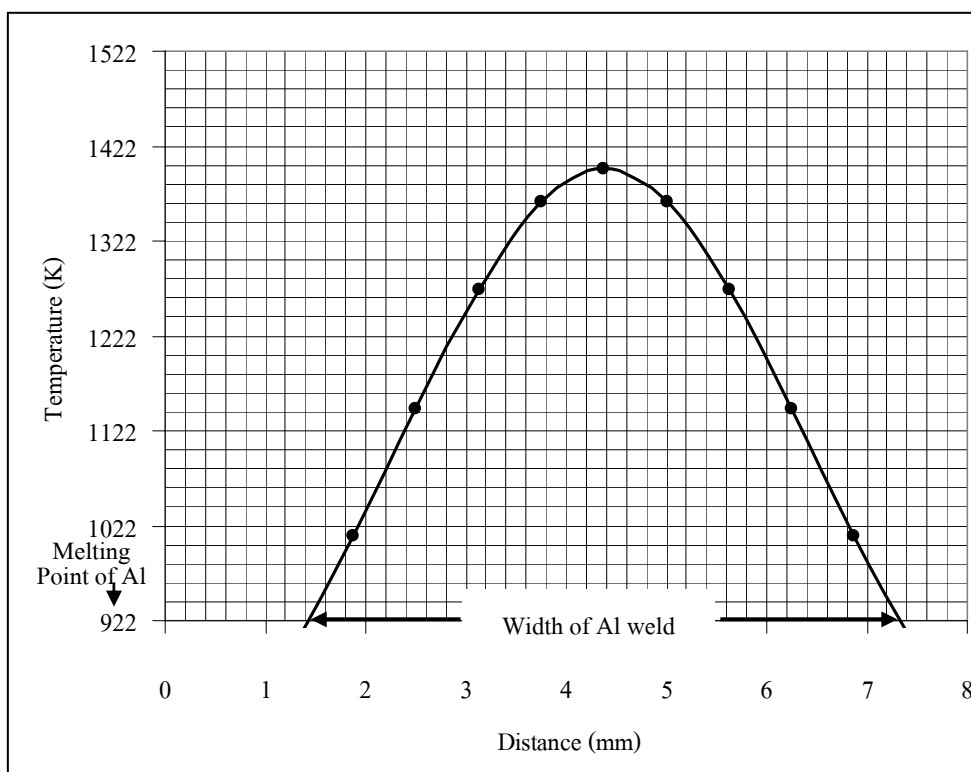
เนื่องจากชิ้นงานที่นำไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติเชิงกลนั้นถูกตัดออกจากตำแหน่งกึ่งกลางของแนวรอยเชื่อม ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงต้องปรับตั้งเวลาให้เพียงพอต่อการเกิดแนวรอยเชื่อมที่ยาวเพียงพอสำหรับการทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมและทำนายช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลว ณ บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางแนวรอยเชื่อม ในการทำนายครั้งนี้จึงใช้เวลาในการเชื่อมทั้งหมด 4 วินาที

ข) การตรวจสอบผลการทำนายด้วยโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1

การตรวจสอบผลความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม และช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวมีวิธีการดังนี้

- การตรวจสอบความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม

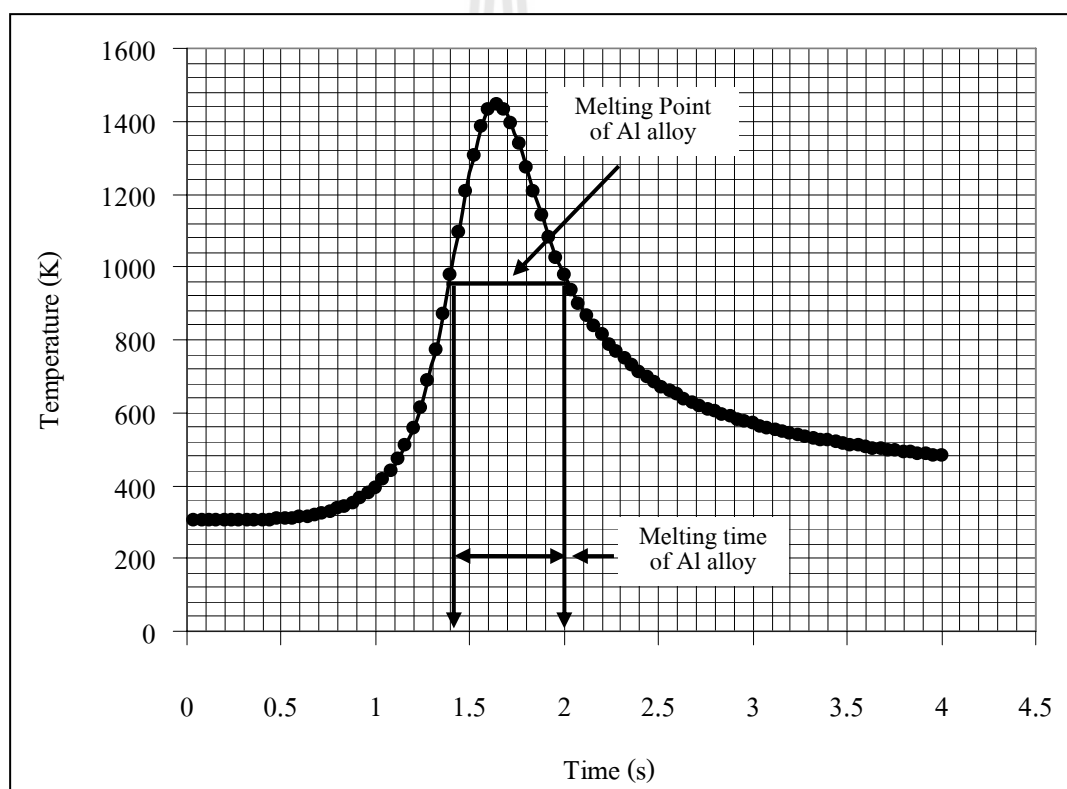
หลังจากการคำนวณด้วยโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1 วิธีการตรวจสอบความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมมีดังนี้ ทำการตัดขวางโมเดลการเชื่อม ณ แนวรอยเชื่อมในบริเวณกึ่งกลางของโมเดลการเชื่อม ในการตรวจสอบความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมจากผลการทำนายทั้งหมดนั้น กระทำโดยการตัดขวางโมเดลการเชื่อมในบริเวณที่เกิดการหลอมเหลวของโลหะแผ่นกว้างที่สุด ณ ตำแหน่งหนึ่งขณะทำการเชื่อม จากนั้นทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและตำแหน่ง ณ บริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น หลังจากการสร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวจะสามารถทราบได้ถึงความกว้างในแนวตัดขวางโมเดลการเชื่อมของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.16 จากรูปแสดงให้เห็นว่าขณะทำการเชื่อมบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นมีความกว้างประมาณ 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่ง

- การตรวจสอบเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลว

หลังจากการคำนวณด้วยโปรแกรม MARC MENTAT 2005 R1 เสร็จสมบูรณ์ วิธีการตรวจสอบช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวมีดังนี้ ทำการตัดขวางโมเดลการเชื่อมบริเวณกึ่งกลางโมเดลงานเชื่อม และเลือก โหนด ณ ตำแหน่งรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นบริเวณกึ่งกลางรอยเชื่อม จากนั้นทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ ณ โหนดดังกล่าว หลังจากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิจะสามารถทราบถึงช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.17 ซึ่งพบว่าช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวมีค่าประมาณ 0.6 วินาที



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

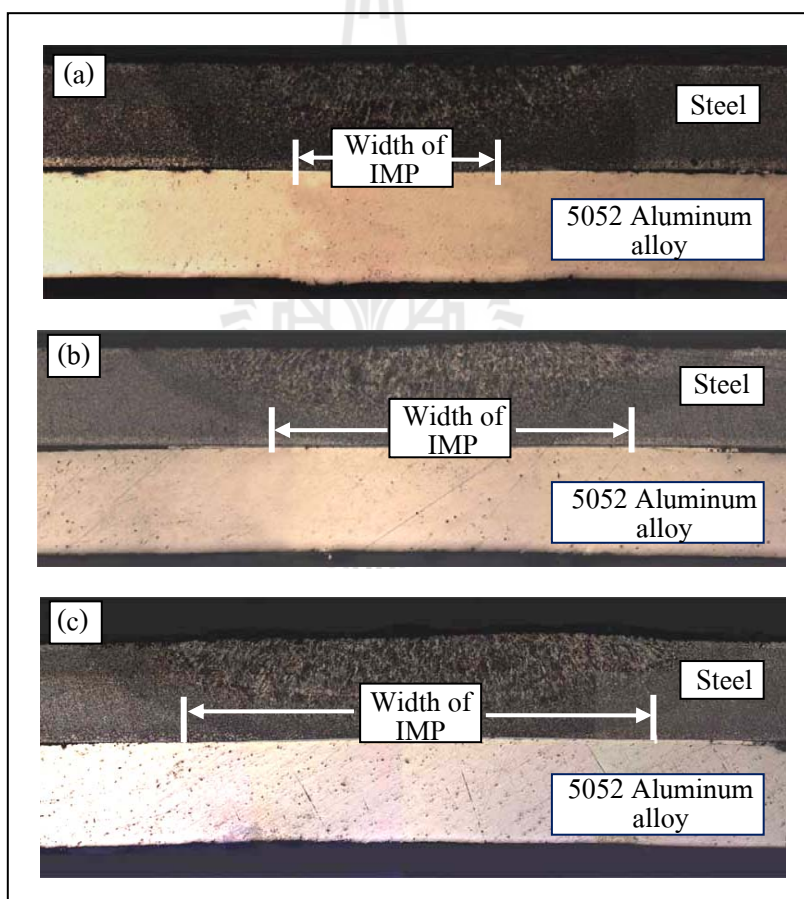
4.1 อิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ธาตุแมกนีเซียมเมื่อถูกเติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นจะส่งผลให้โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นมีสมบัติเปลี่ยนไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติทางความร้อนเช่น โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100 ซึ่งมีธาตุแมกนีเซียมเจืออยู่ประมาณ 0.001 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการนำความร้อน 222 W/m K ในขณะที่โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052 ซึ่งมีธาตุแมกนีเซียมเจืออยู่ประมาณ 2.2 ถึง 2.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการนำความร้อน 138 W/m K การที่ค่าการนำความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นแตกต่างกันนี้ ส่งผลให้ในขณะทำการเชื่อมเกิดความแตกต่างของการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ บริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น และส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันของลักษณะชั้นสารประกอบเชิงโลหะเมื่อทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดซึ่งใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นต่างชนิดกัน นอกจากนี้จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมในขณะเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ $145 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ขณะที่ในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมมีค่าเท่ากับ $160 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันนี้อาจจะส่งผลต่อรอยเชื่อมเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อน และเพื่อให้เกิดความกระจ่างถึงอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะทำการอธิบายถึงการศึกษาอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นต่อความกว้างและความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

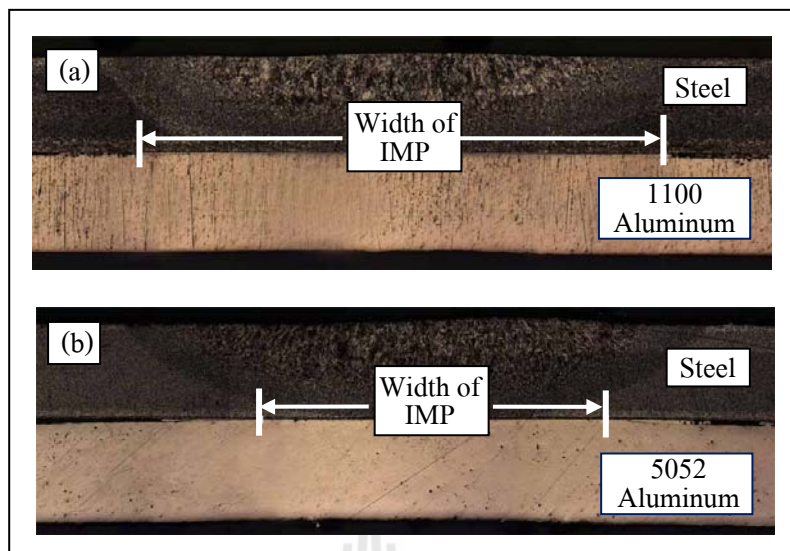
4.1.1 ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากผลการวัดความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่า ทั้งในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

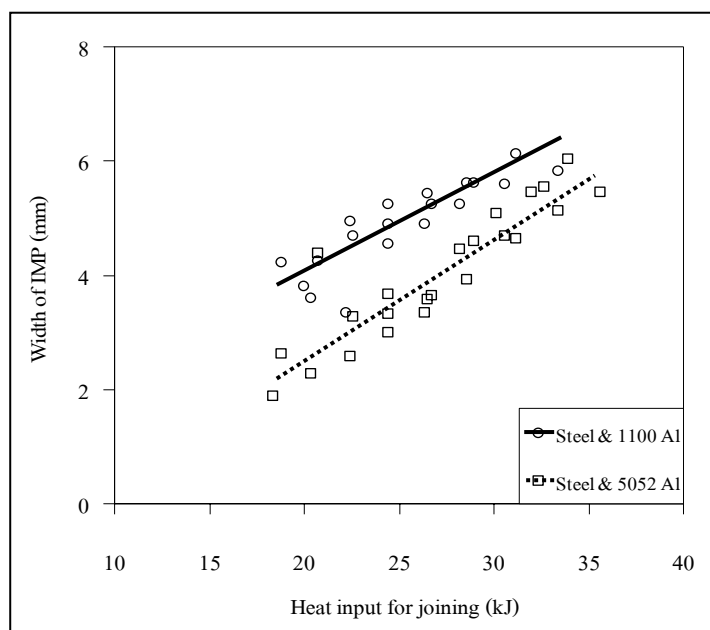
เกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร และการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตรนั้น เมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้น ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมจะมีความกว้างมากขึ้น ดังเช่นแสดงในรูปที่ 4.1 และยังพบว่า เมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมเท่ากัน ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร มีความกว้างมากกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น หนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ดังเช่นแสดงในรูปที่ 4.2 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.3



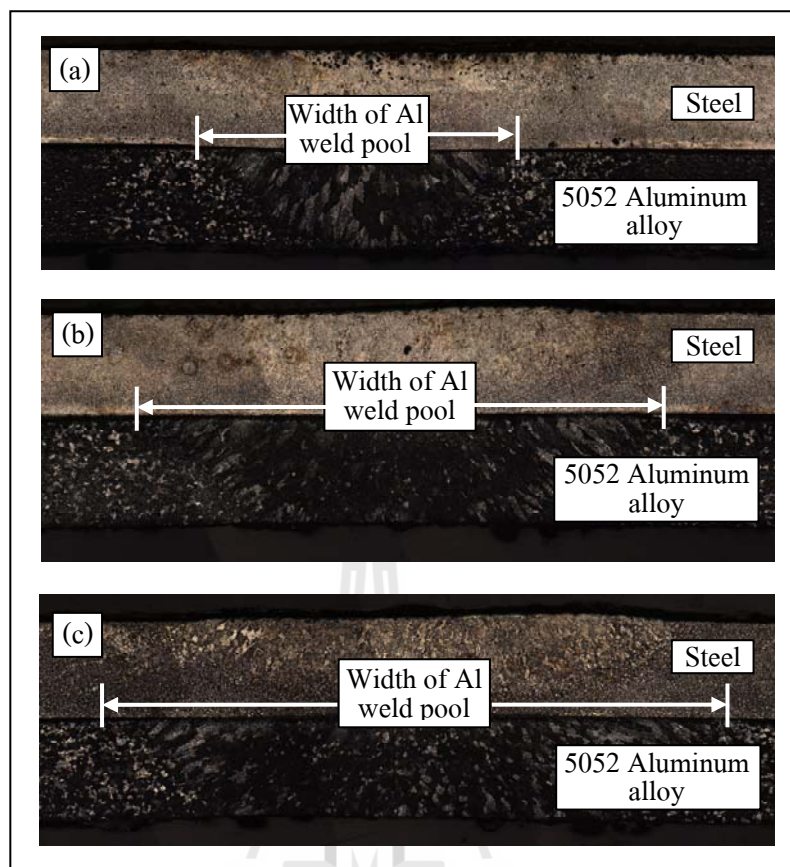
รูปที่ 4.1 ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อนต่าง ๆ
(a) 18.4 กิโลจูล (b) 24.5 กิโลจูล และ (c) 30.6 กิโลจูล



รูปที่ 4.2 ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อน 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น เกรด 1100-H12 และ (b) เหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32



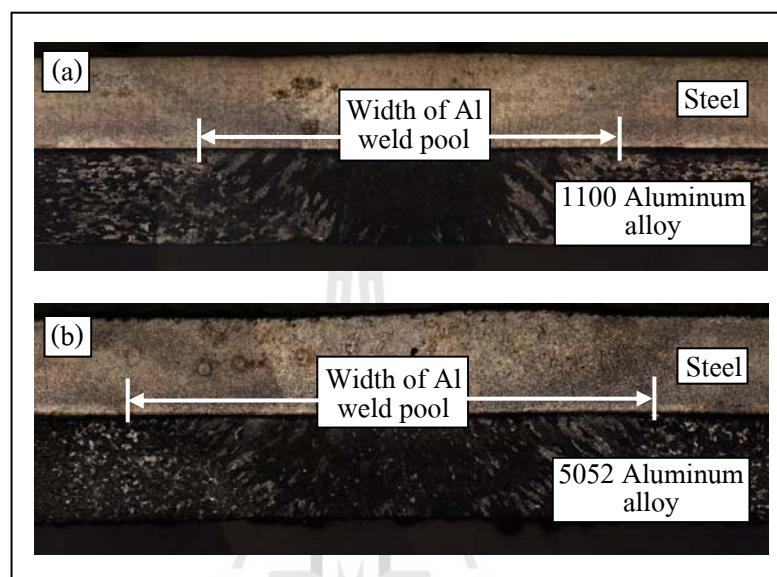
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม



รูปที่ 4.4 ความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมจากการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อนต่าง ๆ
 (a) 18.4 กิโลจูล (b) 24.5 กิโลจูล และ (c) 30.6 กิโลจูล

จากการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น โดยอาศัยเทคนิค Self-brazing นั้น ชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับเหล็กกล้าแผ่นที่ยังอยู่ในสถานะของแข็ง ดังนั้นบริเวณที่จะพบการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจึงเป็นบริเวณผิวบนของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว ซึ่งสัมผัสกับผิวด้านล่างของเหล็กกล้าแผ่น ด้วยเหตุนี้ขนาดของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมจึงมีผลต่อความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเป็นอย่างมาก แต่ด้วยความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการถ่ายเทความร้อนในชิ้นงานเชื่อมขณะทำการเชื่อม ซึ่งลักษณะการถ่ายเทความร้อนของวัสดุต่าง ๆ นั้น ขึ้นอยู่กับสมบัติทางความร้อนของวัสดุและสภาวะแวดล้อมที่ระบบปรากฏอยู่เป็นอย่างมาก ดังนั้นในการทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่ถูกเจือลงไปในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นต่อความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ การตรวจสอบขนาดความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสม

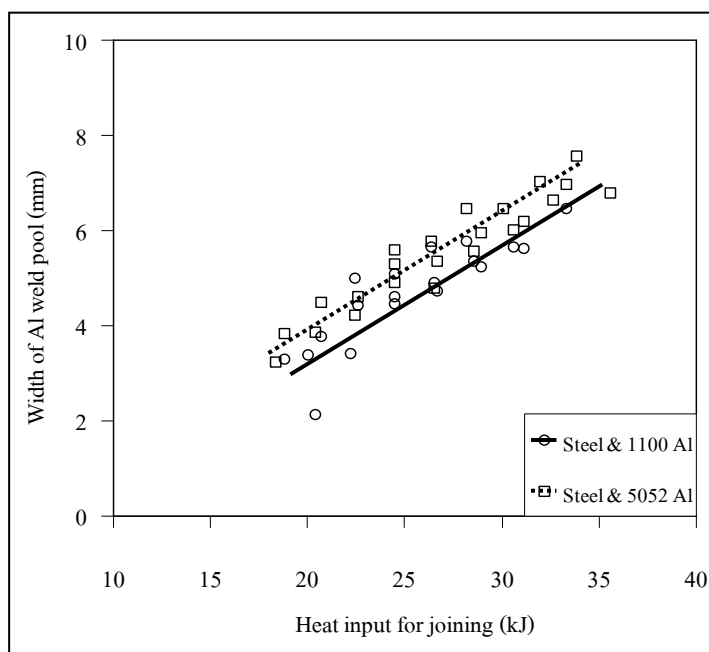
อะลูมิเนียมแล้วเปรียบเทียบกับขนาดความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น และในการวิจัยนี้ก็ได้ทำการตรวจสอบความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม ทั้งจากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและจากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.5 ความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมจากการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อน 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 และ (b) เหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32

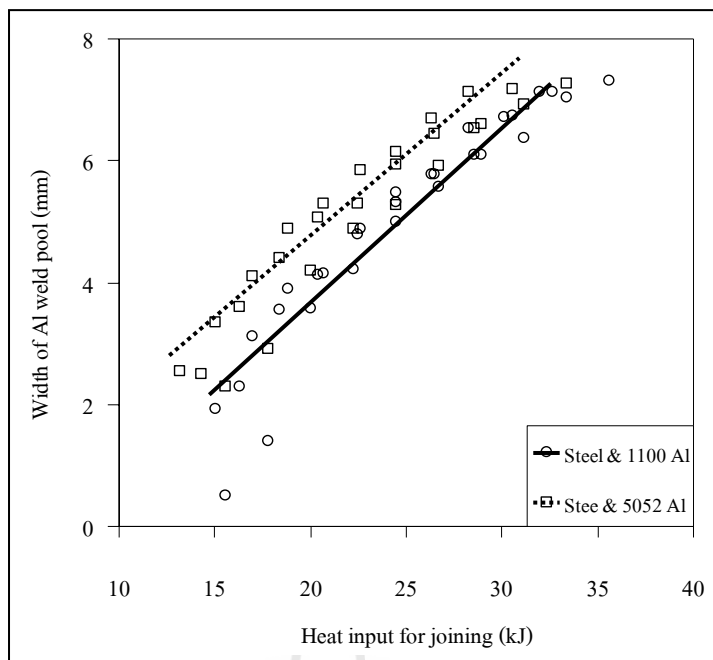
จากผลการตรวจวัดความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ดังเช่นแสดงในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมจะมีความกว้างเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมมากขึ้นในทั้งสองกรณีการเชื่อม แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเชื่อมโดยใช้ปริมาณความร้อนเท่ากัน กลับพบว่าบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร มีขนาดแคบกว่าในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ดังเช่นแสดงในรูปที่ 4.5 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.6

ซึ่งผลการทดลองดังกล่าว ชัดแย้งกับผลการตรวจวัดความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม

รูปที่ 4.7 แสดงความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ได้จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลการทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมนี้เป็นผลจากการจำลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนในขณะทำการเชื่อม จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะพบว่าความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และจากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ เมื่อทำการพิจารณาการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อนเท่ากัน บ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร จะมีความกว้างน้อยกว่าในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงทำให้พออนุมานได้ว่า ขนาดของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นในขณะทำการเชื่อมเป็นหลัก

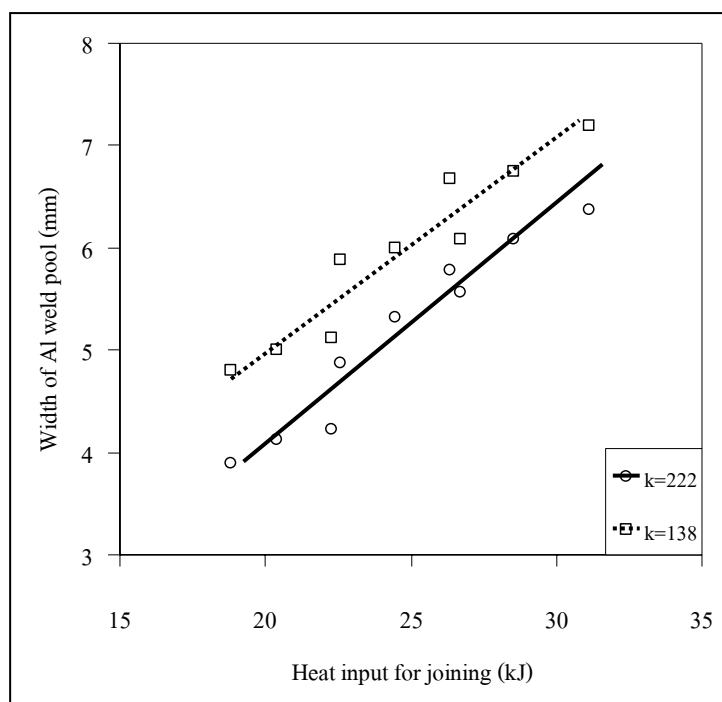


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อม

แต่ด้วยการที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม ในขณะที่ทำการเชื่อมทั้งสองกรณี จากการใช้ค่าการนำความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ต่างกัน อันเป็นผลมาจากการเจือธาตุแมกนีเซียม ลงในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ดังนั้นเพื่อจะทำให้เกิดความกระจ่างถึงขนาดของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงนั้น ว่าขึ้นอยู่กับผลของธาตุแมกนีเซียมในลักษณะใดเป็นหลัก ผู้วิจัยจึงได้ทำการทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมเพิ่มเติมอีกสองลักษณะ ดังนี้

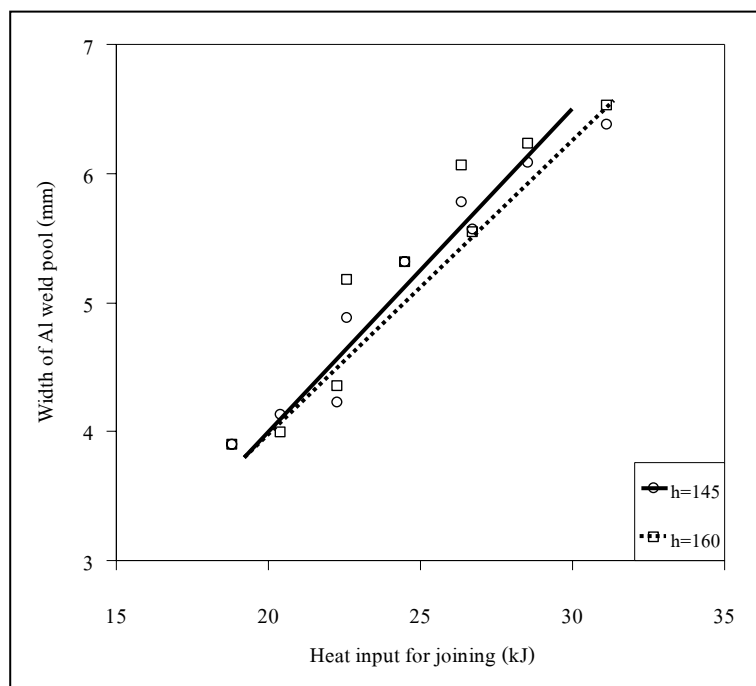
1) การศึกษาผลของค่าการนำความร้อนต่อความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยทำการทำนายการเชื่อมด้วยการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมไว้ที่ $145 \text{ W/m}^2\text{K}$ และทำการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นสองค่าคือ 222 และ 138 W/mK

2) การศึกษาผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยทำการทำนายการเชื่อมด้วยการค่าการนำความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็น 222 W/mK และทำการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมสองค่าคือ 145 และ $160 \text{ W/m}^2\text{K}$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อม ในกรณีทำนายด้วยค่าการนำความร้อน ความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นที่แตกต่างกัน

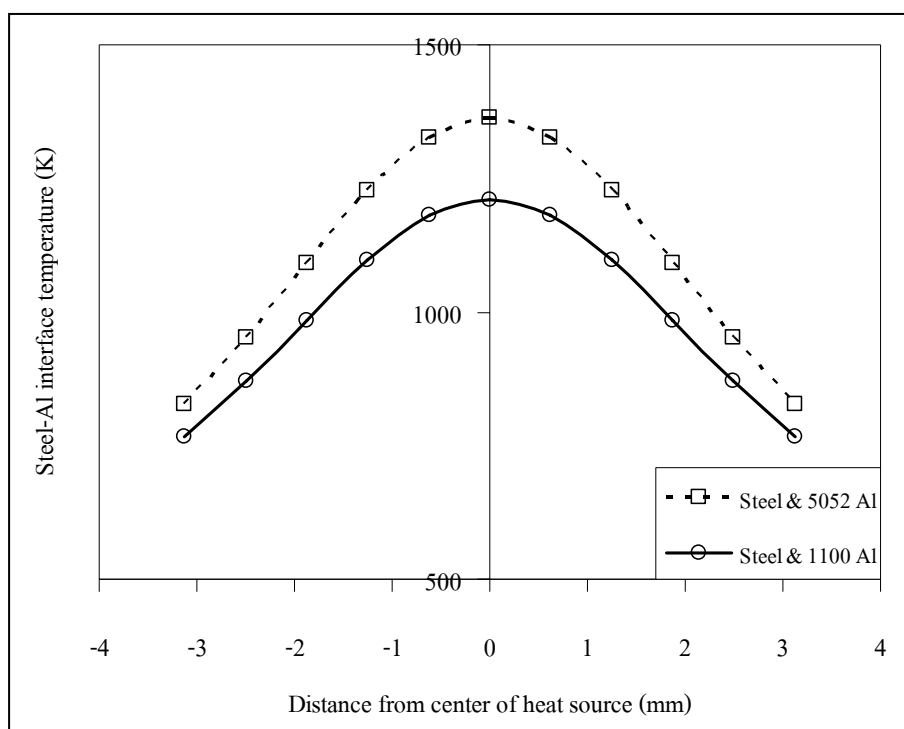
ผลการทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมจากการทำนายในสองลักษณะดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 จากผลการทำนายดังรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ซึ่งมีค่าการนำความร้อนแตกต่างกัน นั้น ส่งผลให้ความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมแตกต่างกันอย่างมาก ขณะที่ผลการทำนายดังรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมต่อความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม พบว่าเมื่อทำการทำนายการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อนเท่ากัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม นั้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมน้อยมาก ดังนั้นจึงทำให้พอสรุปได้ว่าความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น อันเนื่องมาจากการเติมธาตุแมกนีเซียมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นหลัก



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อมในกรณีทำนาย ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อม กับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมที่แตกต่างกัน

อนึ่งสำหรับลักษณะการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในชิ้นงานเชื่อมที่ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้น อาจเกิดจากการที่โลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว ซึ่งมีธาตุแมกนีเซียมเจืออยู่มีความสามารถในการเปียกไปบนผิวของเหล็กกล้าแผ่นได้ต่ำลง นอกจากนี้ผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเปียกของโลหะหลอมเหลวไปบนพื้นผิว พบว่าอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวที่สูงจะทำให้มุมของการเปียก (contact angle) มีค่าลดต่ำลง และส่งผลให้โลหะหลอมเหลวสามารถเปียกไปบนพื้นผิวได้ดีขึ้น (Shinozaki, N. et al., 2002) ด้วยเหตุนี้ในการวิจัยนี้จึงได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการทำนายอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นในขณะทำการเชื่อมด้วย จากผลการทำนายแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการทำนายการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อนเท่ากัน อุณหภูมิ บริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นในขณะทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียม

แผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร จะสูงกว่าในขณะที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะ กับระยะทางจากกึ่งกลางแหล่งกำเนิดความร้อน

จากผลการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นมีผลทำให้อุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะในขณะที่ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดนี้สูงขึ้น อันเป็นผลมาจากการที่โลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีธาตุแมกนีเซียมเจืออยู่ในปริมาณมากจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำลง ในขณะที่ทำการเชื่อม ความร้อนจึงถ่ายเทออกจากบริเวณรอยเชื่อมได้ช้ากว่า จึงทำให้พบว่าผลการทำนายอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะในขณะที่ทำการทำนายการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อนเท่ากัน เป็นดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาผลการทำนายอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะร่วมกับผลความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีต่อความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อม ยิ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่าธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นมีผลต่อความสามารถในการเป็ยกของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวไปบนผิวของเหล็กกล้าแผ่น ซึ่งจากการศึกษาผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องผู้วิจัยทราบว่าชั้นออกไซด์ของอะลูมิเนียม

ที่มีธาตุแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบนั้นมีความเสถียรมากกว่าชั้นออกไซด์ของอะลูมิเนียมที่ไม่มีธาตุแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบ โดยชั้นออกไซด์ที่มีความเสถียรมากกว่านี้ยังมีผลทำให้มุมในการเปียก (contact angle) เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการเปียกของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวไปบนพื้นผิวลวดต่ำลง (Shinozaki, N. et al., 2002) ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงอาจสรุปได้ว่าธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นนั้นส่งผลให้ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมมีความเสถียร และชั้นออกไซด์นี้อาจมีผลทำให้ความสามารถในการเปียกของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวไปบนผิวของเหล็กกล้าแผ่นในขณะทำการเชื่อมลดลง

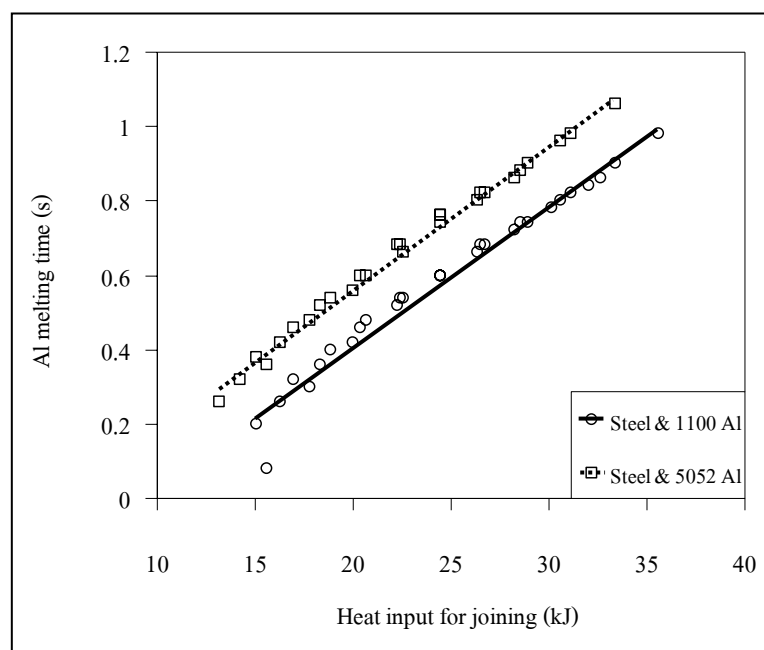
4.1.2 ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ในขณะทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น อะตอมของอะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของเหล็กเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ร่วมกันของอะตอมเหล็กกับอะตอมอะลูมิเนียม ซึ่งความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะสามารถประมาณได้จากสมการที่ 4.1 (Borrisutthekul, R. et al., 2007; Kobayashi, S. and Yakou, T., 2001) โดยในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และเพื่อทำนายความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมจึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายช่วงเวลาที่เกิดการแพร่ของโลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในตำแหน่งของโมเดลงานเชื่อมเชิงโลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวมากที่สุด โดยในการทำนายนี้ได้ทำการสมมติให้การแพร่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะผสมอะลูมิเนียม และสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ นอกจากนี้กำหนดให้ช่วงเวลาที่เกิดการแพร่ของอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวทั้งหมดเป็นช่วงเวลาในการเกิดการแพร่

$$X = K_0 \sqrt{t} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4.1)$$

โดยที่	X	คือ	ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
	K_0	คือ	ค่าคงที่สำหรับการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ
	t	คือ	เวลาที่เกิดการแพร่
	Q	คือ	พลังงานกระตุ้นการแพร่
	R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คือ	อุณหภูมิที่เกิดการแพร่

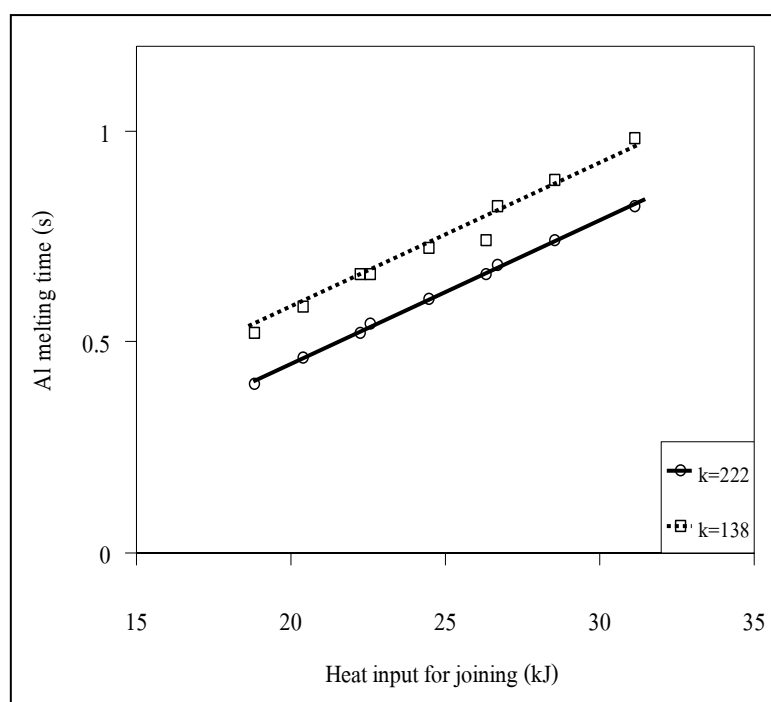
จากผลการทำนายการเชื่อมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้พบว่า เมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการทำนายการเชื่อมเพิ่มขึ้น ช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวทั้งในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร และในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร จะนานขึ้น และยังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการทำนายการเชื่อมเท่ากัน ช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร จะนานกว่าในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อม

ในการทำนายช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในการเชื่อมสองกรณีนี้ มีการใช้ค่าการนำความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้น เพื่อให้สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น หรือขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท

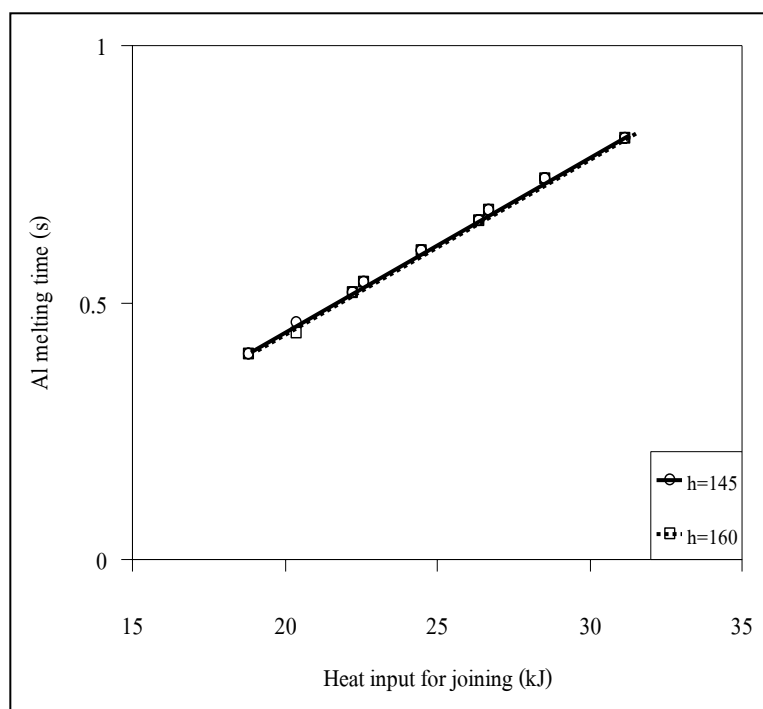
ความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมเป็นหลัก จึงได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการพิสูจน์ด้วยวิธีการเดียวกันกับการยืนยันอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่มีต่อความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมดังได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายนการเชื่อมในกรณีค่าการนำความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมแตกต่างกัน

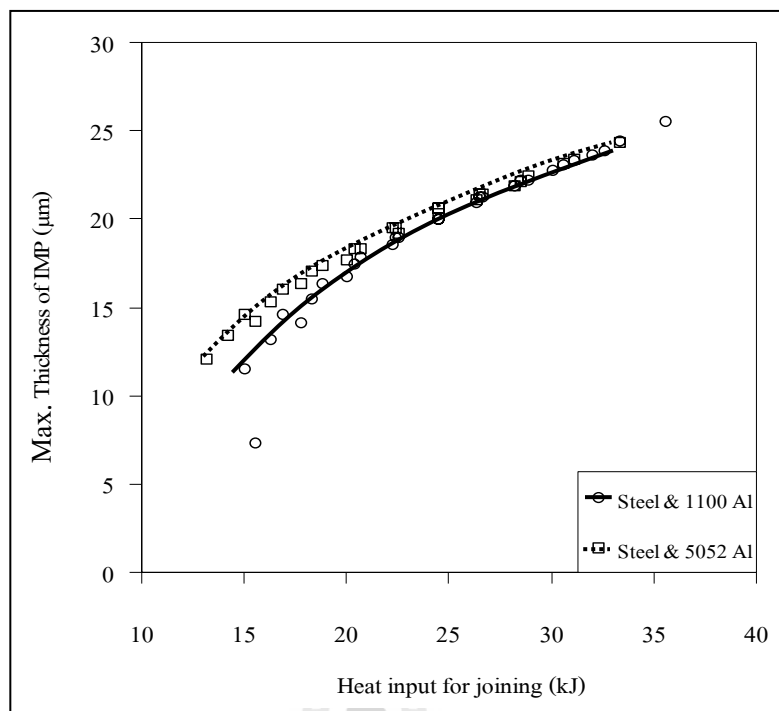
ภายหลังจากการทำนายช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวให้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการทำนายนการเชื่อมเท่ากัน ในการทำนายช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมซึ่งมีค่าการนำความร้อนแตกต่างกันนั้นส่งผลให้ช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในขณะที่ทำการเชื่อมแตกต่างกันอย่างมาก แต่จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการทำนายนการเชื่อมเท่ากัน ในการทำนายการเชื่อมซึ่งมีค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมแตกต่างกันนั้น ส่งผลน้อยมากต่อช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลว จึงทำให้

สรุปได้ว่าช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในขณะที่ทำการเชื่อมนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นหลัก



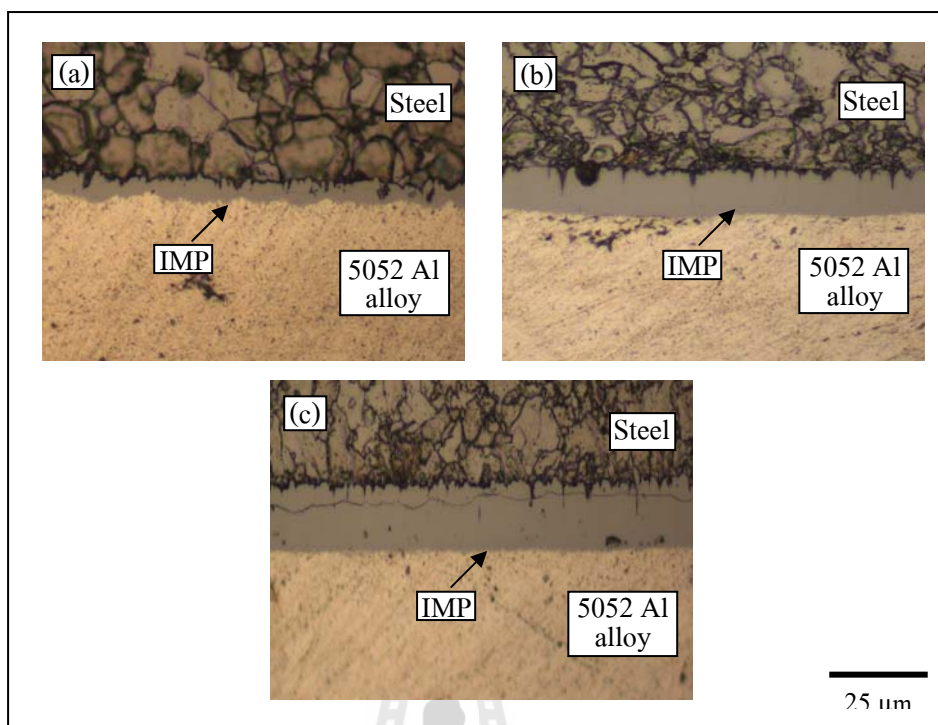
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อมในกรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานเชื่อมกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมแตกต่างกัน

จากผลการทำนายช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ทำให้สามารถประมาณความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมได้ดังรูปที่ 4.14 จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความร้อนในการทำนายการเชื่อมเพิ่มขึ้น ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจะมีความหนาสูงสุดเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการทำนายการเชื่อมเท่ากัน ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร จะมีความหนาสูงสุดมากกว่าในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร

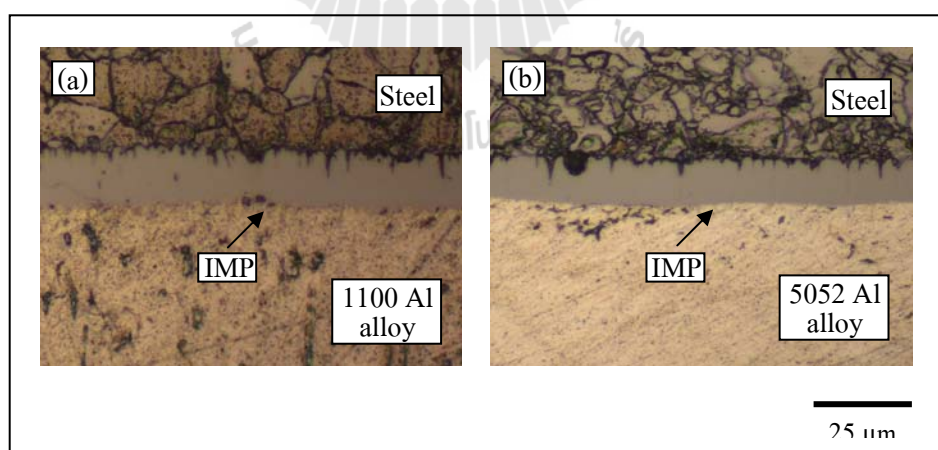


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายการเชื่อม

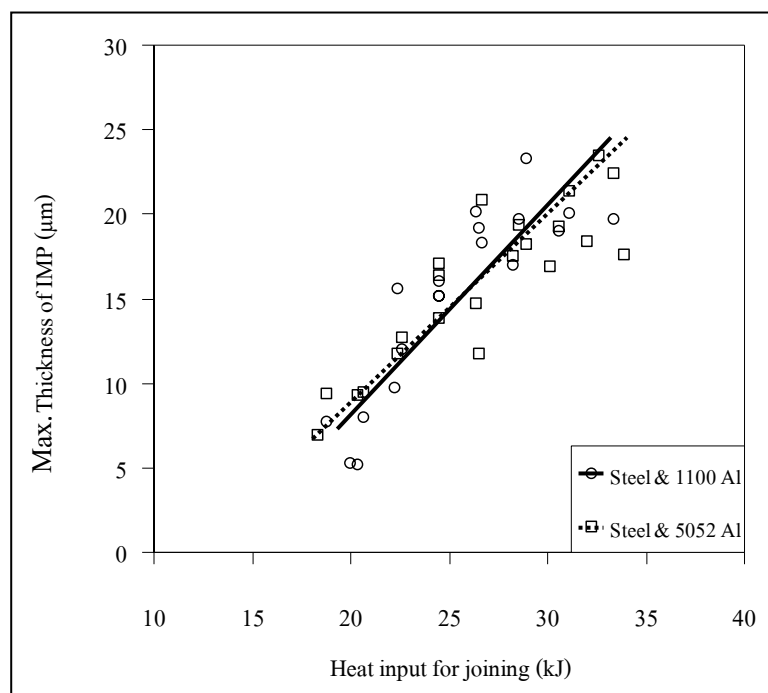
จากการตรวจวัดความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร และในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่าความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้น ดังเช่นแสดงในรูปที่ 4.15 แต่กลับพบว่าเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมเท่ากัน ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร มีความหนาสูงสุดใกล้เคียงกับชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อนต่าง ๆ (a) 18.4 กิโลจูล (b) 24.5 กิโลจูล และ (c) 30.6 กิโลจูล

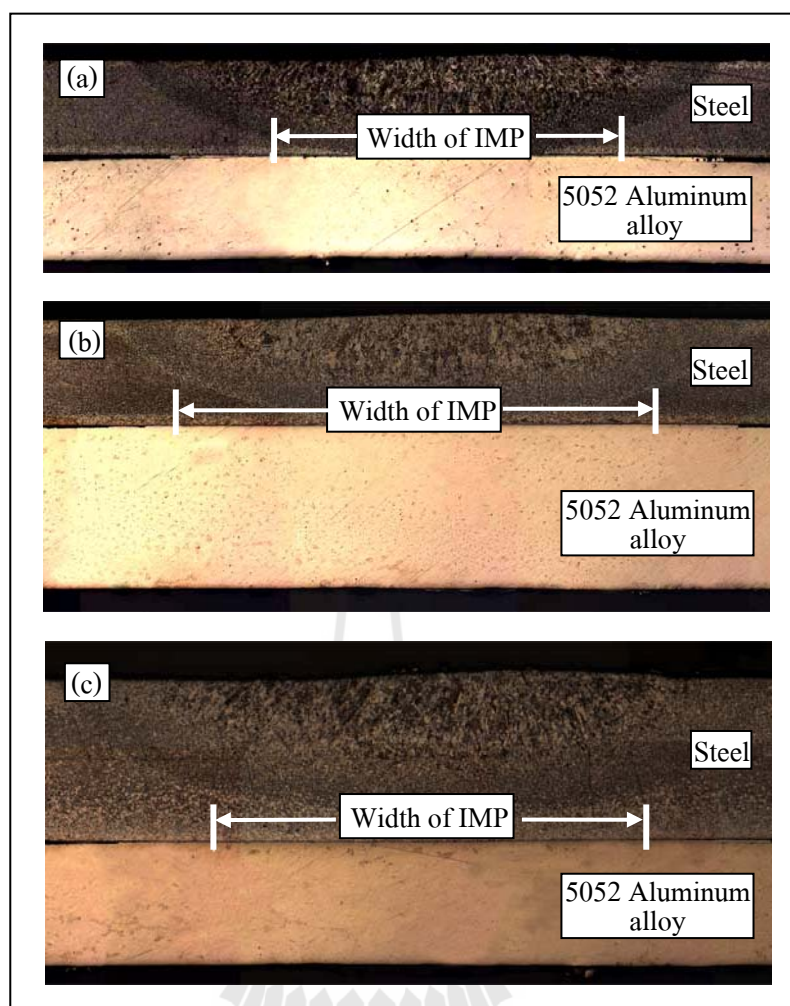


รูปที่ 4.16 ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อน 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100 – H12 และ (b) เหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม

ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะอะลูมิเนียมแผ่นนั้น ชั้นสารประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้น ณ บริเวณรอยเชื่อมมีผลทำให้พลังงานกระตุ้นในการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีค่าสูงขึ้น (Rathod, M.J. and Kutsuna, M., 2004) และจากสมการที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อพลังงานกระตุ้นนี้มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการแพร่ของอะตอมมารวมกันในขณะทำการเชื่อมลดลง โดยในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นซึ่งใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีการเจือธาตุแมกนีเซียมนั้น ในขณะที่ทำการเชื่อมอาจเกิดชั้นออกไซด์ที่มีความเสถียรมากกว่า และชั้นออกไซด์นี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้พลังงานกระตุ้นการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้น จากผลการวิจัยจึงทำให้อาจสรุปได้ว่าธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมมีผลในการขัดขวางการแพร่ร่วมกันของอะตอมเหล็กกับอะตอมอะลูมิเนียมในขณะทำการเชื่อม

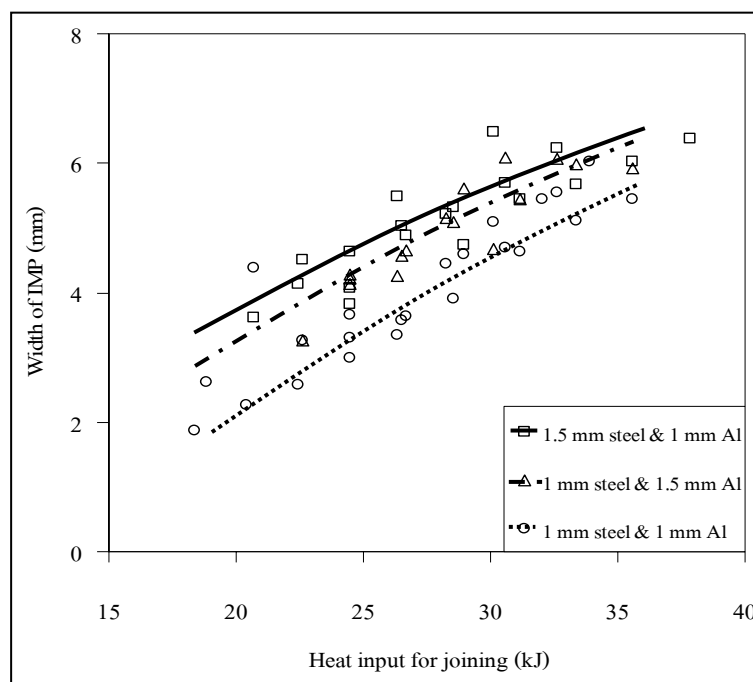


รูปที่ 4.18 ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อน 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม. (b) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1.5 มม. และ (c) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม.

4.2 อิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ขนาดและรูปทรงของชิ้นงานเชื่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค บริเวณรอยเชื่อมเป็นอย่างมาก ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในอิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อม ต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อม ในการวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อลักษณะของชั้น

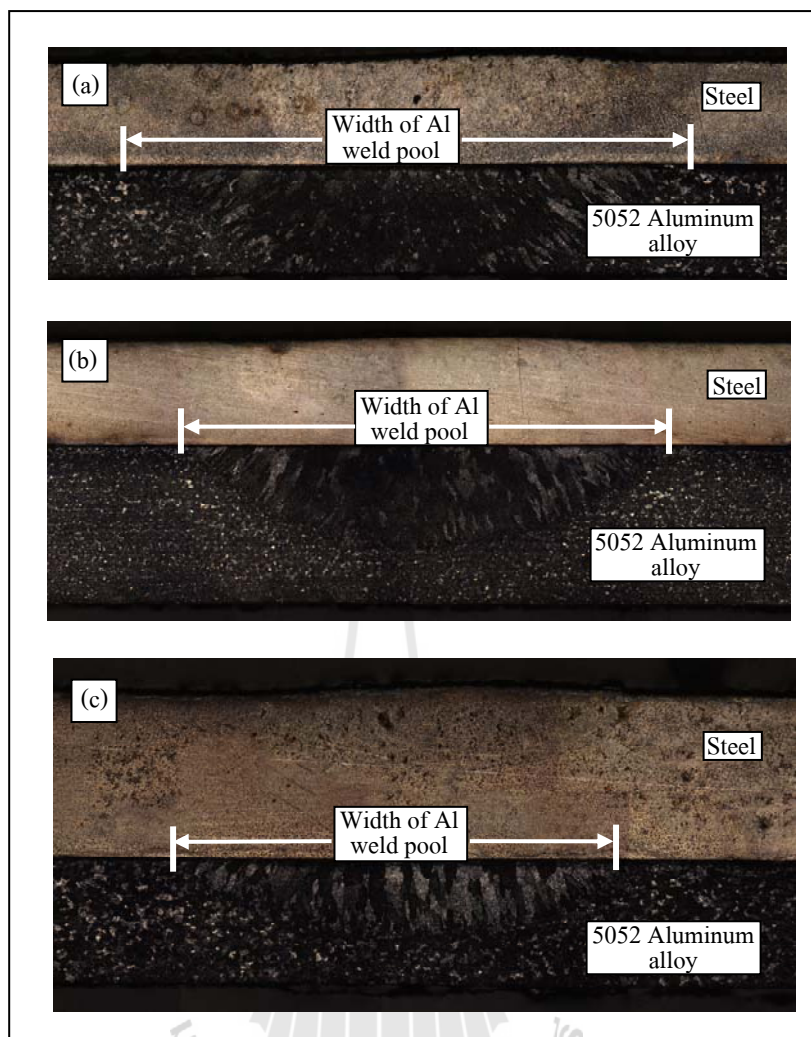
สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชั้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังนี้ (1) ศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร (2) ศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และ (3) ศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร ภายหลังจากการเชื่อมได้ทำการศึกษาลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชั้นงานเชื่อม โดยเน้นไปที่การศึกษาความกว้างและความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชั้นงานเชื่อม และผลการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม

4.2.1 ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

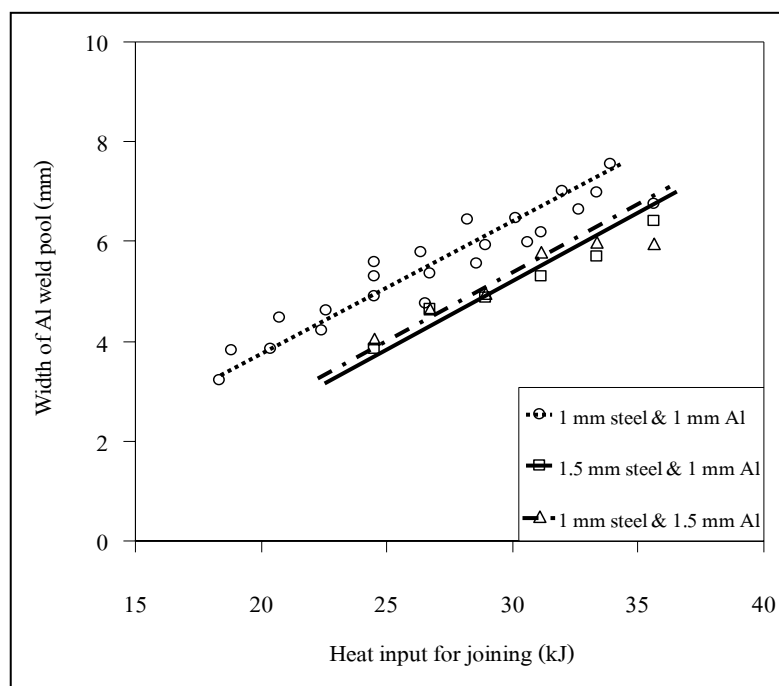
จากการตรวจสอบความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชั้นงานเชื่อมทั้งสามกรณีศึกษา พบว่าเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้น ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชั้นงานเชื่อมจะมีความกว้างมากขึ้น เช่นเดียวในชั้นงานเชื่อมที่ทำการศึกษาอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมต่อความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ



รูปที่ 4.20 ความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมจากการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อน 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม. (b) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1.5 มม. และ (c) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม.

และเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมเท่ากัน ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร มีความกว้างน้อยกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตรและในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

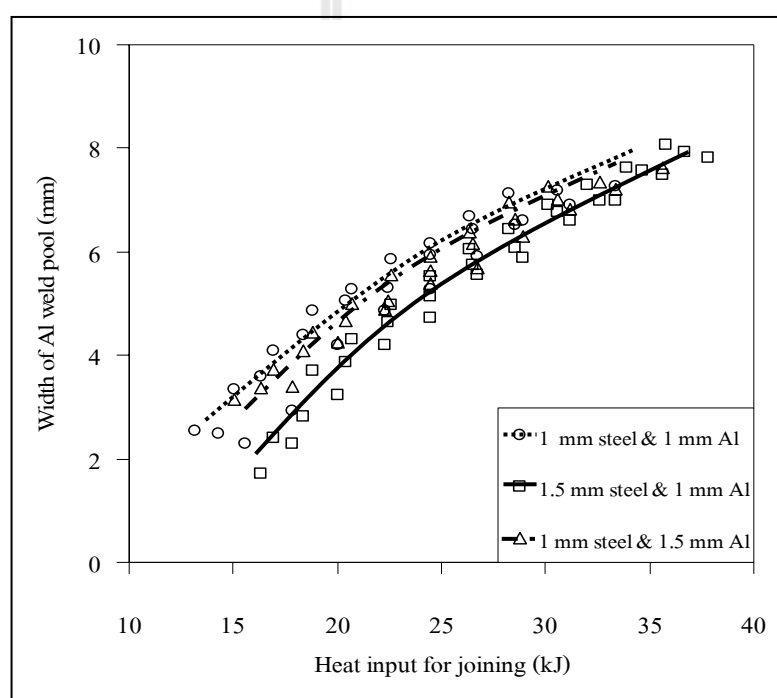
เกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร ดังเช่นแสดงในรูปที่ 4.18 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม

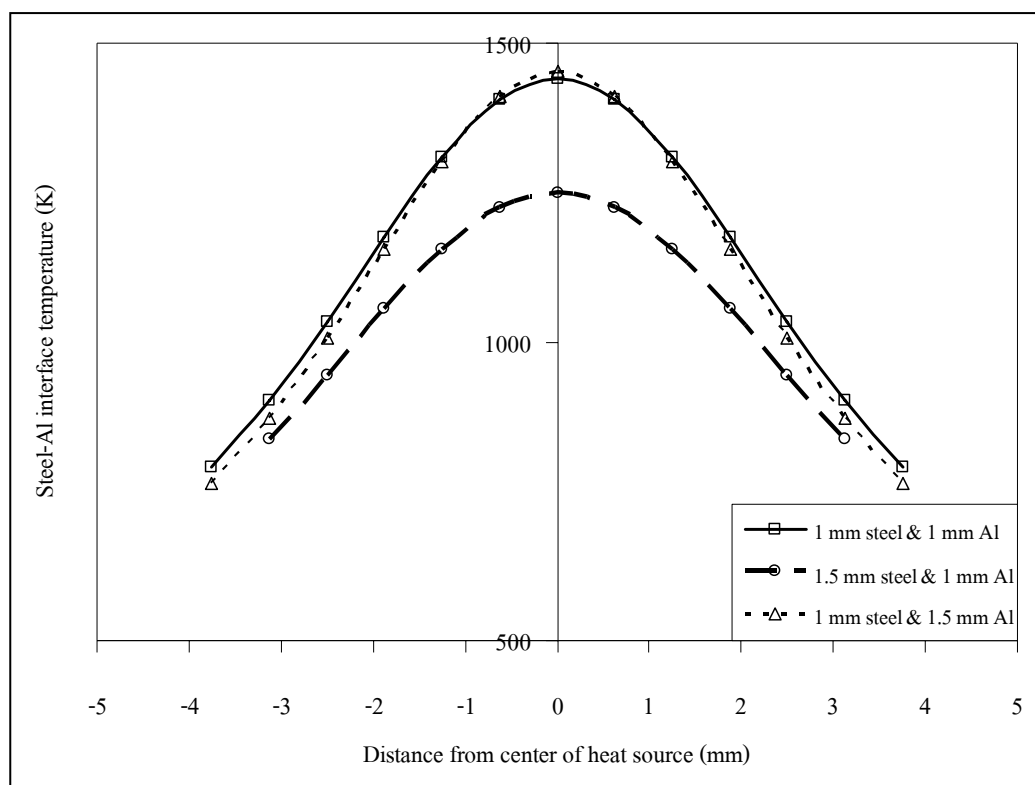
เนื่องด้วยชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเกิดขึ้นเนื่องจากการเป็ยของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวไปบนผิวของเหล็กกล้าแผ่นดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ดังนั้นเพื่อทำความเข้าใจถึงผลของความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการศึกษาความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมในทั้งสามกรณีศึกษา ทั้งโดยการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้นบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมทั้งสามกรณีศึกษาจะมีความกว้างเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อทำการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อนเท่ากัน พบว่าบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร มีความกว้างมากกว่าในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร

กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น เกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น หนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร ดังเช่นแสดง ในรูปที่ 4.20 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมกับปริมาณ ความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.21 และจากการทำนายความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสม อะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับผลจากการตรวจวัด ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม กับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนการเชื่อม

ซึ่งถ้าหากโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวขณะทำการเชื่อม ในทั้งสามกรณีศึกษา มีความสามารถในการเปียกไปบนผิวเหล็กกล้าแผ่นเหมือนกัน ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น ในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ควรมีความกว้างมากกว่าในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น 5052-H32 1 มิลลิเมตร และในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่น โลหะ กับระยะทางจากกึ่งกลางแหล่งกำเนิดความร้อน

แต่อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการเป็ยกของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว ไปบนผิวของเหล็กกล้าแผ่นยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่น โลหะในขณะที่ทำการ เชื่อมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการศึกษาอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมต่อความกว้างของ ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ด้วยเหตุนี้เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการเป็ยก ของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวไปบนผิวของเหล็กกล้าแผ่น ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการใช้ระเบียบ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะในกรณีศึกษาทั้งสามกรณี จากผลการทำนายแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการทำานการเชื่อมเท่ากัน อุณหภูมิ บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะขณะทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และในขณะที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น หนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร จะสูงกว่า ในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.23 จากผลการทำนายนี้แสดงให้เห็นว่าในกรณีศึกษาที่ทำการ เชื่อมโดยใช้เหล็กกล้าแผ่นที่มีความหนามากกว่านั้น ความร้อนจากแหล่งกำเนิดจะถูกขัดขวาง

โดยเหล็กกล้าแผ่นได้มากกว่า ส่งผลให้พบว่าผลการทำนายอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่น โลหะมีลักษณะเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.23

จากผลการทำนายอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่น โลหะในการเชื่อมทั้งสามกรณีศึกษานี้ ยิ่งทำให้สามารถคาดเดาได้ว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตรนั้น ควรจะมีความกว้างมากกว่าในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร แต่จากผลการตรวจวัดความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กลับพบว่ามีความขัดแย้งกับผลการตรวจสอบความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมและผลการทำนายอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะ

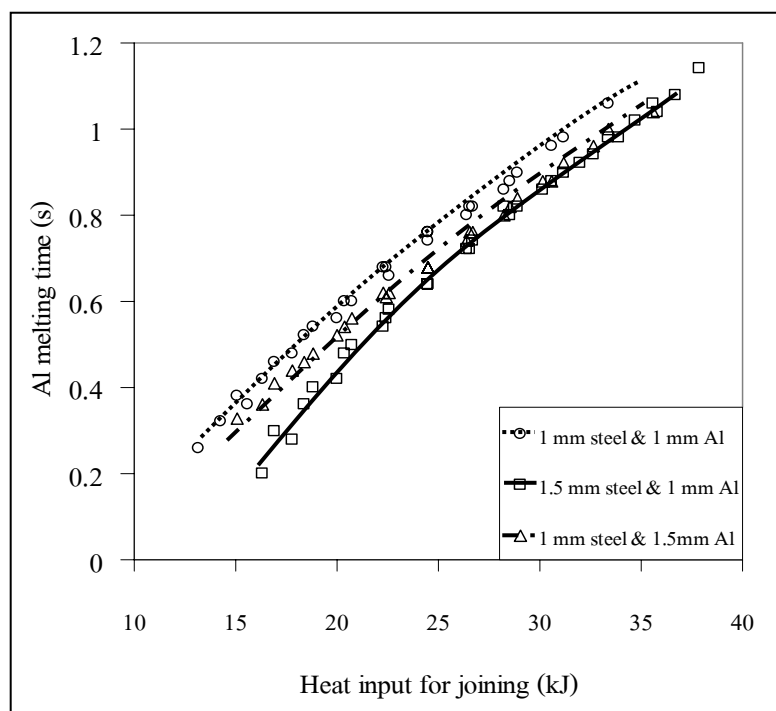
จากผลการทดลองที่มีความขัดแย้งนี้ผู้วิจัยเชื่อว่า เกิดจากในขณะทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 นั้น เมื่อเหล็กกล้าแผ่นที่ใช้ในการเชื่อมได้รับความร้อน เหล็กกล้าแผ่นด้านบนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลด้อยลง และเกิดการเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายเมื่อมีแรงมากระทำ ขณะที่โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้านล่างจะเกิดการขยายตัวอย่างมากขณะทำการเชื่อมเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ประกอบกับสภาวะการจับยึดชิ้นงานเชื่อม เมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมขยายตัวจะออกแรงดันสู่เหล็กกล้าแผ่นด้านบน แรงที่กระทำนี้อาจส่งผลให้ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้น ณ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการแพร่แตกหัก และเมื่อชั้นออกไซด์นี้เกิดการแตกหัก จึงทำให้การเป็ยกของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเมื่อแรงดันที่กระทำมากขึ้นความสามารถในการเป็ยกของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวควรเพิ่มขึ้น และจากความเชื่อดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์สำหรับอธิบายผลการเชื่อมได้ดังนี้ ในขณะทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052- หนา 1 มิลลิเมตร เหล็กกล้าแผ่นบนซึ่งได้รับความร้อนเท่ากับการเชื่อมในกรณีอื่น ๆ จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าการเชื่อมในกรณีอื่น ๆ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงไม่มากเมื่อเทียบกับกรณีการเชื่อมอื่น ๆ ยิ่งไปกว่านี้การที่เหล็กกล้าแผ่นมีความหนามากกว่ากรณีอื่น ๆ ทำให้เหล็กกล้าเปลี่ยนแปลงรูปเมื่อมีแรงมากระทำได้ยากขึ้น ดังนั้นเมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นล่างเกิดการขยายตัวจะเกิดแรงต้านทานจากเหล็กกล้าแผ่นด้านบนมากกว่าในกรณีการเชื่อมอื่น ๆ ทำให้ชั้นออกไซด์เกิดการแตกหักมากกว่าในกรณีการเชื่อมอื่น ๆ ส่งผลให้ความสามารถในการเป็ยกของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหลอมเหลวไปบนผิวเหล็กกล้าแผ่นดีขึ้น ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองที่พบว่าความกว้างของบ่อน้ำโลหะในกรณีเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตรมีความกว้างน้อยที่สุด แต่ความกว้างของ

ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมนี้มีความกว้างมากที่สุด สำหรับกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ด้วยอุณหภูมิของเหล็กกล้าแผ่นที่สูงกว่าในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ดังนั้นเหล็กกล้าแผ่นบนจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากกว่า ในขณะที่การขยายตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียมน่าจะใกล้เคียงกับกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ดังนั้นแรงดันที่กระทำบนเหล็กกล้าแผ่นในกรณีนี้จึงน้อยกว่า ส่งผลให้ชั้นออกไซด์แตกหักทำลายได้น้อยกว่า และส่งผลให้ความสามารถในการเป็ยของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวในกรณีการเชื่อมนี้ต่ำที่สุด สำหรับในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตรนั้น แม้ว่าเหล็กกล้าแผ่นด้านบนจะสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย แต่เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นที่ใช้ในการเชื่อมนี้มีความหนาถึง 1.5 มิลลิเมตร ในขณะที่การเชื่อมจึงเกิดการขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้มากด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้น้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมถูกผลักขึ้นไปทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าแผ่นด้านบนด้วยแรงดันที่สูง ส่งผลให้ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมเกิดการแตกหักทำลายได้มาก และส่งผลให้ความสามารถในการเป็ยของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวนบนผิวเหล็กกล้าแผ่นในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร ดีกว่าในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามความเชื่อดังกล่าวควรถูกทำการศึกษาอย่างละเอียดในอนาคต

4.2.2 ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายช่วงเวลาที่ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในขณะที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อใช้ความร้อนในการทำนายการเชื่อมเพิ่มขึ้นช่วงเวลาที่ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการทำนายการเชื่อมเท่ากัน ช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในขณะที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร จะนานกว่าช่วงเวลาที่ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในขณะที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร และช่วงเวลาที่ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะ

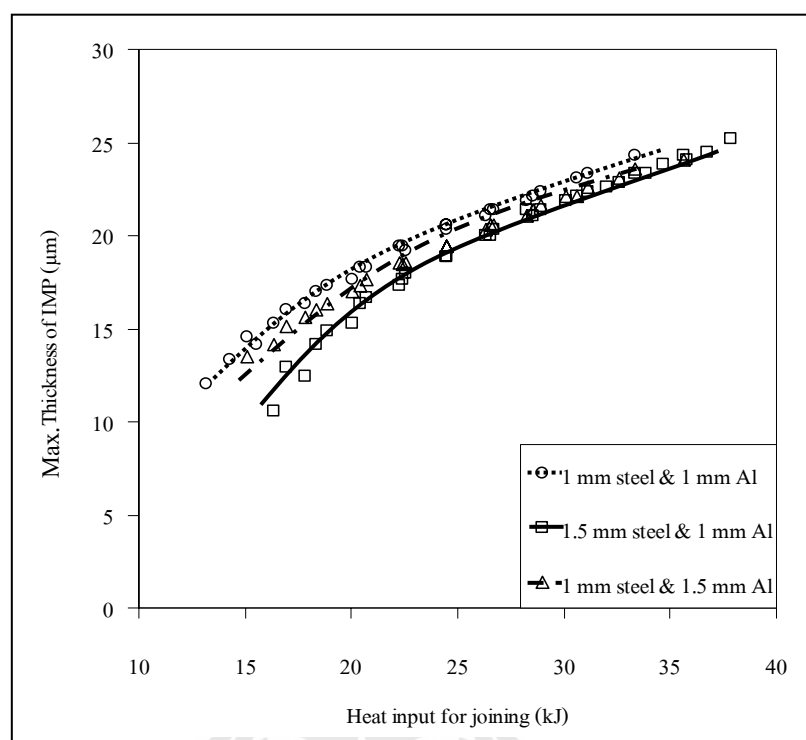
ของเหลวขณะทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตรจะน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวขณะทำการเชื่อมกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายนการเชื่อม

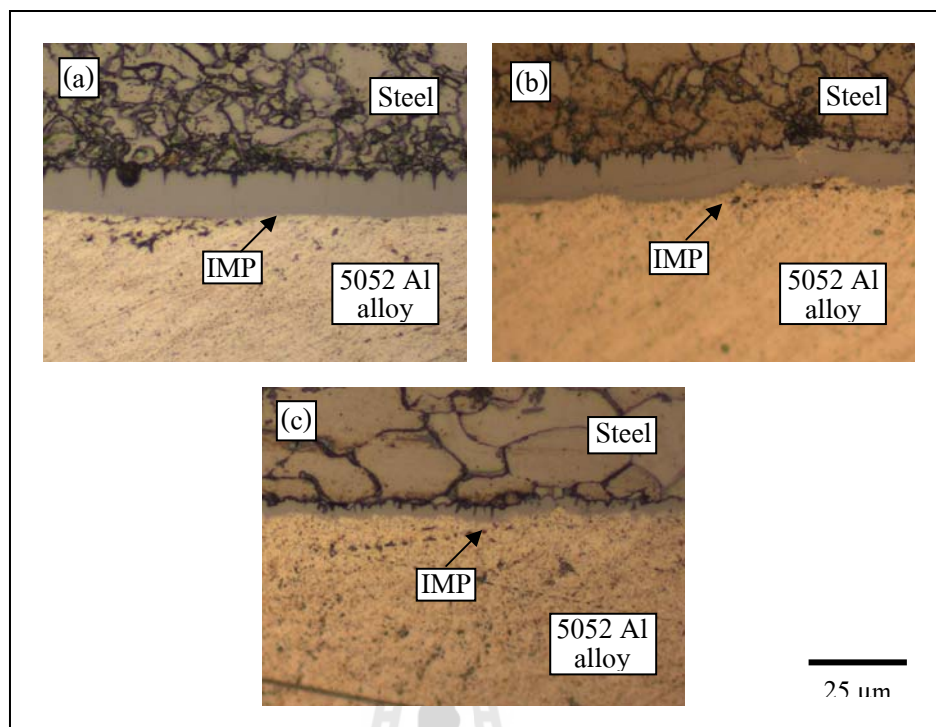
จากการทำนายช่วงเวลาโลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวขณะทำการเชื่อมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้สามารถประมาณความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมได้ดังรูปที่ 4.25 จากรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการทำนายนการเชื่อมเท่ากัน ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร มีความหนาสูงสุดมากกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร และชั้นสารประกอบเชิงโลหะในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตรมีความบางมากที่สุด นอกจากนี้พบว่าผลการทำนายความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะสอดคล้องกับผลการตรวจวัดความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ซึ่งตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงดังรูปที่ 4.26 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำนายนการเชื่อม

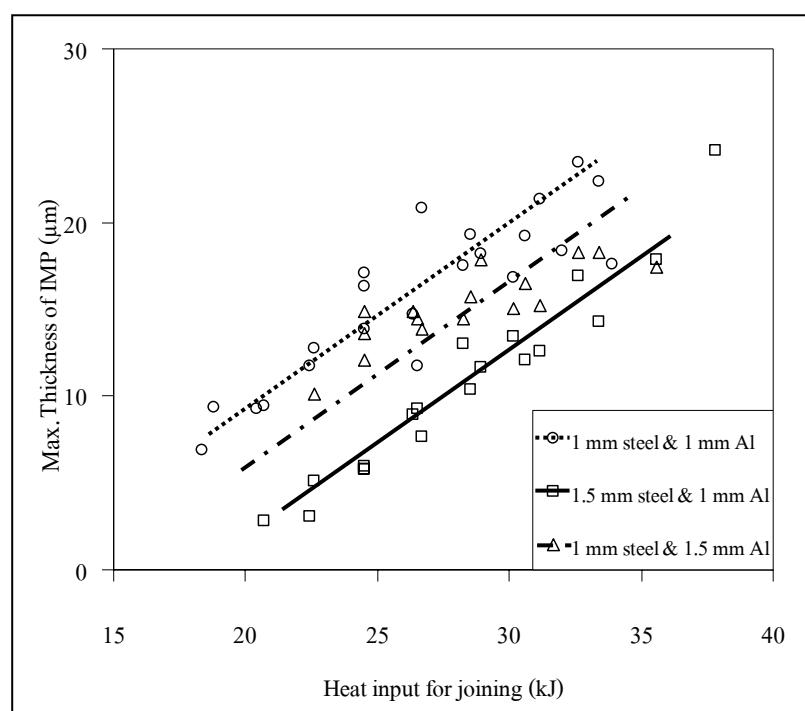
จากผลการทดลองดังกล่าวอาจอธิบายได้ว่าในกรณีที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นการเชื่อมโดยเหล็กกล้าแผ่นที่มีความหนามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับในการเชื่อมในลักษณะอื่น ๆ ขณะทำการเชื่อมความร้อนที่ถ่ายเทจากแหล่งกำเนิดความร้อนจะถูกขัดขวางโดยเหล็กกล้าแผ่นซึ่งมีความหนานี้ไว้ได้ในปริมาณมาก ทำให้มีความร้อนที่ถ่ายเทต่อลงสู่โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้านล่างในปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับในการเชื่อมในลักษณะอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงพบว่าเมื่อทำการทำนายการเชื่อมด้วยปริมาณความร้อนเท่ากัน ช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในขณะที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตรมีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 4.26 ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจากการเชื่อมด้วยความร้อน 24.5 กิโลจูล ในชิ้นงานเชื่อม (a) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม. (b) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1.5 มม. และ (c) เหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มม. กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนา 1 มม.

ในกรณีทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และในกรณีที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งในการเชื่อมสองลักษณะนี้ใช้เหล็กกล้าแผ่นซึ่งมีความหนาเท่ากัน ในขณะที่ทำการเชื่อมความร้อนที่ถ่ายเทจากแหล่งกำเนิดความร้อนผ่านเหล็กกล้าแผ่นลงมายังโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้านล่างจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน แต่ในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตรนั้น เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นมีความหนามากกว่า จึงสามารถดูดซับความร้อนลงมาสู่โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นหนานี้ได้มากกว่า ส่งผลให้ช่วงเวลาที่โลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตรน้อยกว่า ส่งผลให้พบว่าเมื่อใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมเท่ากันชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น

หนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1.5 มิลลิเมตร มีความหนาสูงสุดน้อยกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร และความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตรกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตรมีความบางมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม

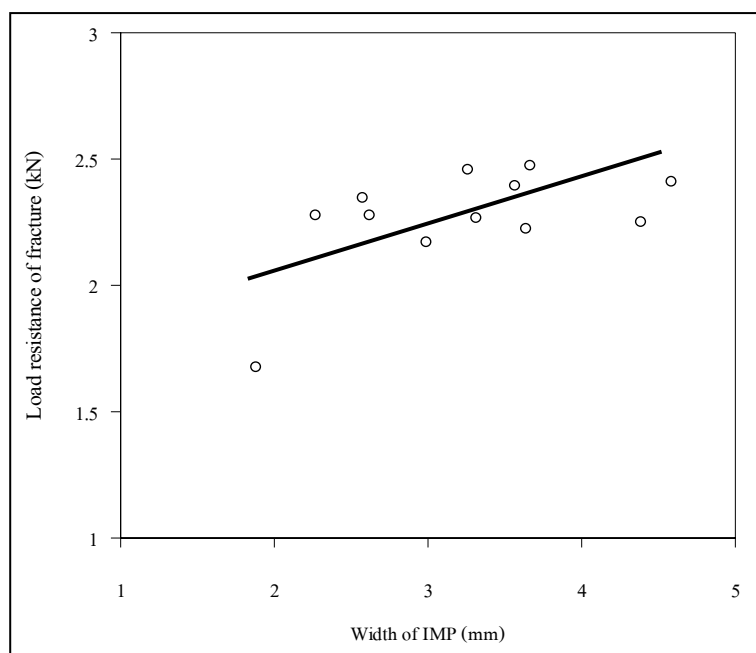
อนึ่งแม้จะมีความเชื่อว่าแรงดันที่กระทำบริเวณรอยเชื่อมจะมีผลต่อความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยแรงดันดังกล่าวจะมีผลทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะต่ำลง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงขึ้น แต่ด้วยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และช่วงเวลาในการแพร่ ดังนั้นจากการทดลองนี้ทำให้อาจสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมมีผลให้ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะการถ่ายความร้อนของชิ้นงานเชื่อมมากกว่าปัจจัยอื่น ๆ

4.3 อิทธิพลของชั้นสารประกอบเชิงโลหะต่อความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อม

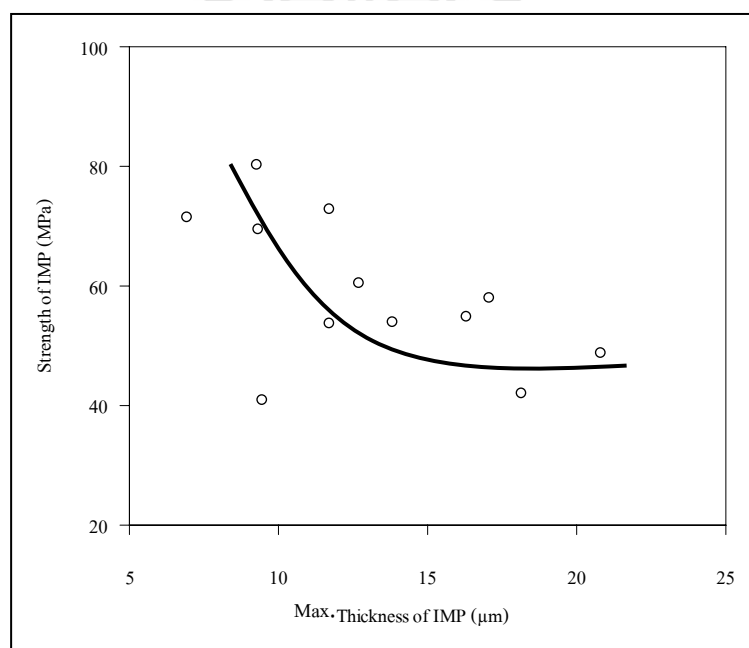
ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้มีการนำชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นมาทำการทดสอบแรงดึง จากผลการทดสอบแรงดึงพบว่าชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดในการวิจัยนี้ เกิดการแตกหักเสียหายเนื่องจากแรงดึงในลักษณะที่แตกต่างกันสองลักษณะ ดังนี้ ลักษณะที่หนึ่ง ชิ้นงานเชื่อมเกิดการแตกหักเสียหายขึ้น ณ บริเวณกระแทกร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม ในชิ้นงานที่เกิดการแตกหักเสียหายลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมมีความสามารถในการรับแรงดึงได้มากกว่าบริเวณกระแทกร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึง ณ จุดแตกหักจะถูกกำหนดโดยความสามารถในการรับแรงดึง ณ บริเวณกระแทกร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม ลักษณะที่สอง ชิ้นงานเชื่อมเกิดการแตกหักเสียหายขึ้น ณ บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อม ซึ่งในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ให้ความสนใจศึกษาชิ้นงานที่เกิดการแตกหักเสียหายในลักษณะนี้มากกว่าชิ้นงานที่เกิดการแตกหักเสียหาย ณ บริเวณกระแทกร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม อันเนื่องมาจากการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเชื่อมในลักษณะนี้ ความสามารถในการรับแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมจะถูกกำหนดโดยความแข็งแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และเพื่อยืนยันถึงอิทธิพลของชั้นสารประกอบเชิงโลหะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของลักษณะชั้นสารประกอบเชิงโลหะต่อความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดนี้

จากผลการทดสอบแรงดึงพบว่าชิ้นงานเชื่อมที่เกิดการแตกหักเสียหายในลักษณะที่สองนี้ จะมีค่าความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึง ณ จุดแตกหักมากขึ้นเมื่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมมีความกว้างมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.28 นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการคำนวณค่าความแข็งแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยวิธีการคำนวณความแข็งแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนี้แสดงดังภาคผนวก ข. จากการคำนวณพบว่าความแข็งแรงบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะลดต่ำลง เมื่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาสูงสุดเพิ่มขึ้นในช่วงที่ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะต่ำกว่า 12 ไมโครเมตร และเมื่อความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมากกว่า 12 ไมโครเมตร พบว่าความแข็งแรง ณ บริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะคงที่ดังแสดงในรูป 4.29

จากผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะทั้งในด้านความกว้างและความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานแรงดึง ณ จุดแตกหัก กับความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ กับความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

บทที่ 5

สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น พบว่าธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น มีผลในการขัดขวางการเปื่อยของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวไปบนผิวของเหล็กกล้าแผ่น ในขณะที่ทำการเชื่อม นอกจากนี้ธาตุแมกนีเซียมที่เจืออยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมยังมีผลในการขัดขวางการแพร่ร่วมกันของอะตอมเหล็กกับอะตอมอะลูมิเนียมในขณะที่ทำการเชื่อม

จากการศึกษาอิทธิพลความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาทำการเชื่อมต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น พบว่าในการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นที่มีความหนาเพิ่มขึ้นทั้งกรณีการใช้เหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นนั้นจะทำให้ความสามารถในการเปื่อยของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวไปบนผิวเหล็กกล้าแผ่นในขณะที่ทำการเชื่อมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นที่มีความหนาแตกต่างกันนั้น ความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ณ รอยเชื่อมเป็นหลัก

นอกจากนี้จากผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นนั้นยังแสดงให้เห็นว่า ความกว้างและความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมมีผลอย่างมากต่อความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อม

รายการอ้างอิง

- ภูษิต มิตรสมหวัง และ รัตน์ บริสุทธิ์กุล. 2553. การเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับ อลูมิเนียมผสมเกรด 5052. วารสารการเชื่อมไทย. (51): 21 - 25
- อาริสตา ปานเทวัน. (2551). นโยบายพลังงานกับภาวะเรือนกระจก. **Engineering Today**. 5(51)
- Automation Creation, Inc. (ACI). 2010. **Mat Web Material Property Data**. [On-line].
Available: <http://www.matweb.com>
- Karl. (2007). **GLOBAL WARMING 1: CULPRITS, SCOUNDRELS AND VILLAINS** [On-line].
Available: <http://ldesign.wordpress.com/2007/01/>
- Muhr. and Bender, KG. (2007). **Tailor Rolled Products**. [On-line].
Available: http://www.mubea.com/english/download/GE_TRP_GB.pdf
- Albright, C.E. (1981). The fracture toughness of steel-aluminum deformation welds. **Welding Journal**. (60): 207 – 214
- Bonifaz, E. A. (2000). Finite Element Analysis of Heat Flow in Single-Pass Arc Welds. **WELDING RESEARCH SUPPLEMENT**. (MAY): 121-s – 125-s
- Borrisutthekul, R., Yachi, T., Miyashita, Y. and Mutoh, Y. (2007). Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminum alloy. **Materials Science and Engineering A**. (467): 108 – 113
- Katayama, S. (2002). Dissimilar materials joining by laser. **Welding Technology**. (50-2): 69 – 73
- Kerstens, N.F.H., and Richardson, I.M. (2009). Heat distribution in resistance upset butt welding. **JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY**. (209): 2715 – 2722
- Kobayashi, S., and Yakou, T. (2001). Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum diffusion-treatment. **Materials Science and Engineering A**. (338): 44 – 53
- Liu, X. S., Fang, H.Y., Xu Dong, W. L. and Yu, D. Y. (2004). NUMERICAL SIMULATION OF CONTROLLING IN TITANIUM ALLOY SHEETS WELDING RESIDUAL STRESS BY TRAILING PEENING. **ACTA METALLURGICA SINICA**. (17): 311 – 316

- Mathieu, A., Shabadi, R., Deschamps, A., Suery, M., Mattei, S., Grevey, D. and Cicala, E. (2007). Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire). **Optics & Laser Technology**. (39): 652 – 661
- Messler, R. W. (2004). **PRINCIPLES OF WELDING Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Peyre, P., Sierra, G., Beaume, F. D., Stuart, D. and Fras, G. (2007). Generation of aluminum-steel joints with laser-induced reactive wetting. **Materials Science and Engineering A**. (444): 327 – 338
- Pierce, S. W., Burgardt, P. and Olson, D. L. (1999). Thermocapillary and Arc Phenomena in Stainless Steel Welding. **WELDING RESEARCH SUPPLEMENT**. (FEBRUARY): 45-s – 52-s
- Rathod, M. J. and Kutsuna, M. (2004). Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low-Carbon Steel by Laser Roll Welding. **WELDING JOURNAL**. 16s – 26s
- Shinozaki, N., Fujita, T. and Mukai, K. (2002). Wettability of Al_2O_3 -MgO Substrates by Molten Aluminum. **Metallurgical and Materials Transaction B**. (33B): 506 – 509
- Sierra, G., Peyre, P., Beaume, F. D., Stuart, D. and Fras, G. (2008). Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes. **Materials Characterization**. (59): 1705 – 1715
- Shih, T. S. and Tu, S. H. (2006). Interaction of steel with pure Al, Al – 7Si and A356 alloys. **Materials Science and Engineering A**. (454 - 455): 349 – 356
- Timilsina, G.R. and Shrestha, A. (2009). Transport sector CO_2 emissions growth in Asia: Underlying factors and policy option. **Energy Policy**. (37): 4523 - 4539
- Yasuyama, M., Ogawa, K. and Taka, T. (1996). Spot welding of aluminium and steel sheet with insert of aluminum clad steel sheet. **Quarterly Journal of Japan Welding Society**. (14): 314 - 320

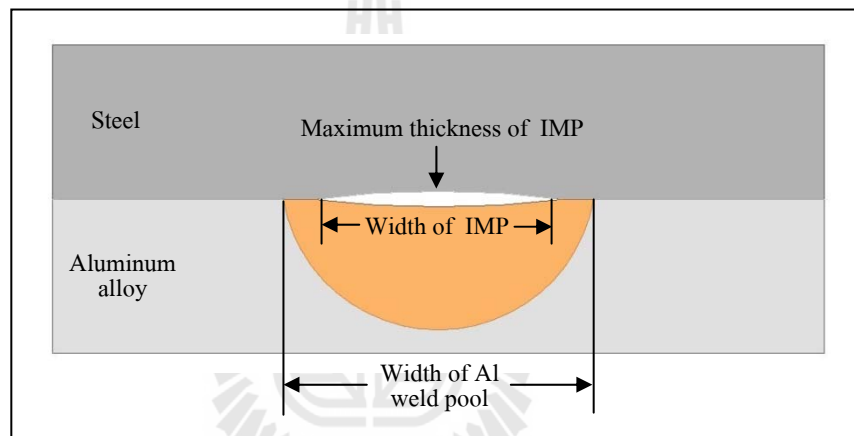


ภาคผนวก ก

การตรวจวัดความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม ความกว้างของ
ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

การตรวจวัดความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

ภายหลังจากการเตรียมผิวชิ้นงานตัดขวางรอยเชื่อมด้วยวิธีการดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว นำชิ้นงานเชื่อมมาทำการตรวจวัดความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยบริเวณต่าง ๆ ที่ทำการตรวจวัดในชิ้นงานเชื่อมแสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 บริเวณต่าง ๆ ในแนวตัดขวางรอยเชื่อมที่ทำการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ในการตรวจวัดความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมและการตรวจวัดความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้น กระทำโดยอาศัยการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค ณ บริเวณที่ต้องการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า ในการถ่ายภาพนั้นจำเป็นต้องทำการกำหนดสเกลที่ทราบขนาดเพื่อนำไปทำการเปรียบเทียบหาความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคนี้จะต้องทำการถ่ายภาพจำนวนหลายรูปจนกระทั่งครอบคลุมตลอดความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมหรือความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ หลังจากการถ่ายภาพนำรูปถ่ายที่ได้มาทำการประกอบกันด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 ภายหลังจากการประกอบรูป จะทำให้ได้รูปของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมและรูปของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในลักษณะ

ตลอดความกว้างทั้งหมด จากนั้นทำการพิมพ์รูปที่ได้จากการต่อลงในกระดาษ แล้วทำการวัดความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียม หรือความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ นำขนาดที่วัดได้นี้ไปเปรียบเทียบกับขนาดของสเกล จะทำให้สามารถคำนวณความกว้างของบ่อน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ สำหรับการตรวจวัดความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ กระทำโดยการถ่ายรูปชั้นสารประกอบเชิงโลหะในบริเวณที่มีความหนาสูงสุดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 500 เท่า โดยการถ่ายรูปนี้จะเลือกถ่ายชั้นสารประกอบเชิงโลหะในบริเวณที่มีความหนาสูงสุดเท่านั้น หลังจากการถ่ายรูปทำการวัดขนาดความหนาสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะโดยใช้ฟังก์ชันการวัดขนาดของโปรแกรม Image Analysis



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, it features a stylized tower or spire. Below this, a central figure of a person stands on a platform. The figure is flanked by two vertical lines with horizontal rungs, resembling a ladder or a staircase. The entire emblem is set against a background of radiating lines, suggesting a sun or a fan. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a curved path around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ข

การคำนวณความแข็งแรงของชั้นเสาประกอบเชิงโลหะ

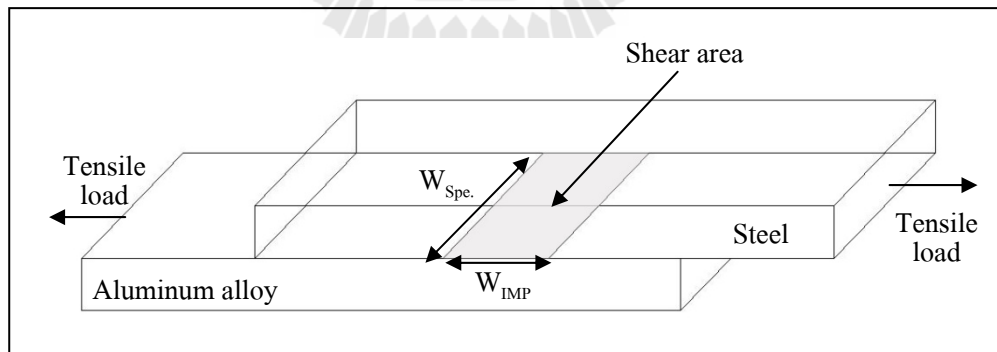
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณความแข็งแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

การคำนวณความแข็งแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้น กระทำโดยนำชิ้นงานเชื่อมไปทำการทดสอบแรงดึง จากนั้นนำค่าแรงดึงสูงสุดมาทำการคำนวณหาความแข็งแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดและพื้นที่รับแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะดังสมการที่ ข.1 โดยพื้นที่ในการรับแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแสดงดังรูปที่ ข.1

$$\sigma_{\max(IMP)} = \frac{F_{\max}}{W_{IMP} \times W_{Spe.}} \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่	$\sigma_{\max(IMP)}$	คือ	ความแข็งแรงสูงสุดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
	F_{\max}	คือ	แรงดึงสูงสุด
	W_{IMP}	คือ	ความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
	$W_{Spe.}$	คือ	ความกว้างของชิ้นงานเชื่อม



รูปที่ ข.1 พื้นที่รับแรงของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ



ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

(1) ภูษิต มิตรสมหวัง และ รัตน์ บริสุทธิ์กุล. 2553. การเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับอลูมิเนียมผสมเกรด 5052. วารสารการเชื่อมไทย. (51): 21–25.

(2) ภูษิต มิตรสมหวัง, รัตน์ บริสุทธิ์กุล, ศิริรัตน์ รัตนจันทร์ และ โยชิฮารุ มูโด้. การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมทิก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, โรงแรมอิมพีเรียลแม่ปิ้ง จ. เชียงใหม่. 4-7 พฤศจิกายน 2552.

(3) Mitsomwang, P., Borrisutthekul, R., Rattanachan, S. and Mutoh, Y. **Feasibility study of using GTAW process in dissimilar metal joining between low carbon steel/5052 alloys sheet.** การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3, โรงแรมเซ็นจูรี่พาร์ค กรุงเทพมหานคร. 26-27 ตุลาคม 2552.

(4) Borrisutthekul, R., Mitsomwang, P., Rattanachan, S. and Mutoh, Y. **Feasibility study of using tig welding in dissimilar metals between steel/aluminum alloy.** International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), Pullman Raja Orchid Hotel, Khon Kaen, Thailand. 23-24 July 2009.



AMM-006118

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

**การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียม
ผสมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมทิก**
**Feasibility Study on Using TIG Welding for Dissimilar Metal Joining between
Steel/1100Aluminum alloy Sheet**

ภูษิต มิตรสหมหวัง¹, รัตน์ บริสุทธิกุล^{1*}, ศิริรัตน์ รัตนจันทร์² และ โยชิฮารุ มูโด้³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

³ คณะระบบความปลอดภัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีแห่งนางะโอกะ จ.นิกะตะ ญี่ปุ่น 940-2188

ผู้ติดต่อ: E-mail: rattana@g.sut.ac.th, โทรศัพท์: (66-44) 224487, โทรสาร: (66-44) 224482

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้กระบวนการเชื่อมทิกถูกนำมาประยุกต์ใช้เชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด 1100-H12 โดยอาศัยเทคนิค Self-brazing ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะจัดวางชิ้นงานเชื่อมในลักษณะซ้อนเกยซึ่งใช้เหล็กกล้าแผ่นเป็นโลหะแผ่นบนและขณะเชื่อมต้องทำการควบคุมการหลอมเหลวให้เกิดเพียงบางส่วนในเหล็กกล้าแผ่นบน การศึกษานี้ทำขึ้นเพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด 1100-H12 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิก โดยในการศึกษานี้จะเริ่มจากการศึกษาดังกล่าวในการควบคุมการหลอมเหลวในเหล็กกล้าเพียงแผ่นเดียวด้วยกระบวนการเชื่อมทิกก่อน จากการศึกษาการควบคุมการหลอมเหลวพบว่ากระบวนการเชื่อมทิกสามารถทำให้เกิดการหลอมเหลวเพียงบางส่วนบนเหล็กกล้าแผ่นได้ ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการเชื่อมทิกสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิค Self-brazing ได้ จากผลการทดลองเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด 1100-H12 พบว่ากระบวนการเชื่อมทิกร่วมกับเทคนิค Self-brazing สามารถเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นและอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด 1100-H12 ได้ ยิ่งไปกว่านั้นจากการทดสอบแรงดึงพบว่ารอยเชื่อมมีความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงมากกว่าบริเวณกระพุ้งร้อนของโลหะอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด 1100-H12 และพบว่าเมื่อปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมเพิ่มขึ้นความต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมจะลดลงเล็กน้อย

คำหลัก: การเชื่อมโลหะต่างชนิด กระบวนการเชื่อมทิก อลูมิเนียมผสมแผ่น เหล็กกล้าแผ่น

Abstract

In the present study, Tungsten Inert Gas welding (TIG) process as self-brazing technique was applied for joining dissimilar metal between steel sheet and 1100-H12 aluminum alloy sheet. The aim of this study is to ensure the feasibility of dissimilar metal joining between steel sheet and 1100-H12 aluminum alloy sheet by TIG welding process. According to the self-brazing technique, lap joint

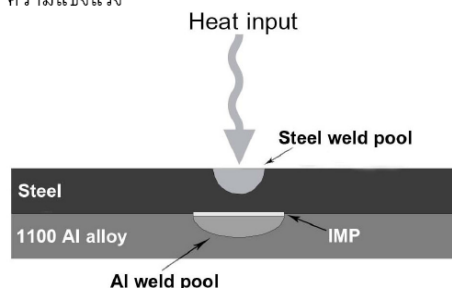
configuration with steel sheet as top sheet and the partial penetration in steel top sheet are required. Therefore, depth of weld in steel sheet by TIG welding was carried out firstly in order to ensure the feasibility of using TIG welding process with self brazing technique. From depth of weld study, it was found that the partial penetration in steel sheet could be easily obtained which indicated the feasibility for using TIG welding process with self-brazing technique. The second study, dissimilar metal joining between steel sheet and 1100-H12 aluminum alloy was done. From dissimilar metal joining experimental results, the joint between steel sheet and aluminum alloy sheet could be successfully produced. Moreover, the load resistance of the bonding zone of dissimilar metal joint was higher than that of 1100-H12 aluminum alloy at heat affected zone and it was slightly decreased when heat input for joining was increased.

Keywords: Dissimilar metal joining TIG welding process Aluminum alloy sheet Steel sheet

1. บทนำ

อลูมิเนียมผสมถูกนำมาใช้ทดแทนเหล็กกล้าในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์เพื่อต้องการลดน้ำหนักของรถยนต์ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขณะใช้งานรถยนต์เหล่านั้นได้เป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากรถยนต์ไม่สามารถใช้ชิ้นส่วนที่ผลิตจากอลูมิเนียมผสมมาทดแทนชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้าได้ทั้งหมด กระบวนการเชื่อมเหล็กกล้ากับอลูมิเนียมผสมจึงเป็นกระบวนการที่มีความจำเป็นในการเชื่อมชิ้นส่วนที่ผลิตจากอลูมิเนียมผสมเข้ากับชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้า แต่อย่างไรก็ดีการเชื่อมโลหะต่างชนิดดังกล่าวมีความยากในการเชื่อม กล่าวคือขณะเชื่อมมีการก่อตัวขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียมซึ่งสารประกอบเชิงโลหะนี้มีความเปราะมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสารประกอบนี้เกิดขึ้นในปริมาณมากและเป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิดที่มีปริมาณอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่สูง[1-2] ถึงแม้ว่าการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าและอลูมิเนียมผสมจะมีความยาก แต่ในปัจจุบันการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดดังกล่าวสามารถกระทำได้สำเร็จด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการเชื่อมเลเซอร์ ร่วมกับเทคนิค Self-brazing ซึ่งเทคนิคดังกล่าวมีวิธีการคือ จัดวางโลหะแผ่นที่ต้องการเชื่อมในลักษณะซ้อนเกยโดยให้เหล็กกล้าแผ่นเป็นโลหะแผ่นบน ขณะทำการเชื่อม

ความร้อนจากแหล่งกำเนิดจะถ่ายเทลงสู่เหล็กกล้าแผ่นซึ่งเป็นโลหะแผ่นบน และถ่ายเทต่อลงสู่อลูมิเนียมผสมแผ่นซึ่งเป็นโลหะแผ่นล่าง เมื่ออุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้ากับอลูมิเนียมสูงขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียมผสม อลูมิเนียมผสมแผ่นด้านล่างจะหลอมเหลวแล้วทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าแผ่นด้านบนซึ่งยังอยู่ในสถานะของแข็งเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียมขึ้นตั้งรูปที่ 1 ด้วยลักษณะเฉพาะของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ซึ่งสามารถให้ความเข้มของความร้อนลงสู่ชิ้นงานเชื่อมสูงมากทำให้สามารถควบคุมการหลอมเหลวของเหล็กกล้าแผ่นบนได้ง่าย และสามารถควบคุมการหลอมเหลวของอลูมิเนียมผสมแผ่นล่างให้เกิดขึ้นเพียงระยะเวลาสั้นๆ ทำให้ สารประกอบเชิงโลหะก่อตัวขึ้นเป็นเพียงชั้นบางๆ รอยเชื่อมที่ได้จึงมีความแข็งแรง



รูปที่ 1 แผนภาพการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่น

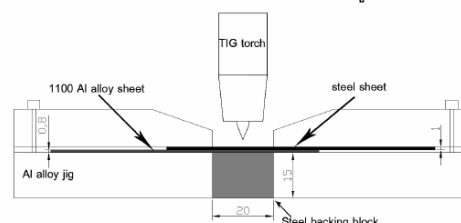
แต่เนื่องจากกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่มีราคาสูง และยังไม่แพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตยนต์ของประเทศไทยในปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับอลูมิเนียมผสมด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแทนการเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์ แต่เนื่องด้วยกระบวนการเชื่อมทิกไม่สามารถให้ความร้อนที่มีความเข้มสูงลงสู่ชิ้นงานเชื่อมได้เช่นเดียวกับการเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์ จึงเป็นการยากในการควบคุมการหลอมเหลวเพียงบางส่วนในเหล็กกล้าแผ่นบน ดังนั้นก่อนการศึกษาการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและอลูมิเนียมผสมแผ่น ด้วยกระบวนการเชื่อมทิกร่วมกับเทคนิค Self-brazing จึงจำเป็นต้องศึกษาศักยภาพในการควบคุมการหลอมเหลวเพียงบางส่วนในเหล็กกล้าแผ่นบนก่อน จากนั้นจึงทำการศึกษารองต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและอลูมิเนียมผสมแผ่นต่อไป

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

เนื่องจากการควบคุมการหลอมเหลวเพียงบางส่วนในเหล็กกล้าแผ่นบนเป็นสิ่งที่ต้องสามารถทำให้เกิดขึ้นในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่นโดยอาศัยเทคนิค Self-brazing ดังนั้นขั้นตอนแรกของการศึกษาจึงทำเพื่อศึกษาศักยภาพในการควบคุมการหลอมเหลวเพียงบางส่วนในเหล็กกล้าเพียงแผ่นเดียวด้วยกระบวนการเชื่อมทิก วิธีการทดลองเริ่มจากนำเหล็กกล้าแผ่นรีดร้อนหนา 1 มิลลิเมตร ขนาด 65x85 มิลลิเมตร กำจัดออกไซด์ออกจากผิวโดยจุ่มลงในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที ใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเหมือนดังอุปกรณ์ในรูปที่ 2 แต่ไม่มีการใช้อลูมิเนียมผสมแผ่น (1100 Al alloy sheet) วางใต้เหล็กกล้าแผ่น โดยสภาวะการเชื่อมที่ใช้ศึกษากำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมอยู่ในช่วง 20-75 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อมเป็น 0.55 0.60 และ 0.65 เมตรต่อนาที อิเล็กโทรดที่ใช้เป็นชนิด EWT-2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

3.2 มิลลิเมตร มุมปลายอิเล็กโทรด 60 องศา ขณะเชื่อมใช้ก๊าซอาร์กอนเกรดทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมอัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาทีปกคลุมรอยเชื่อม หลังจากการเชื่อมเตรียมชิ้นงานมาทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค และวัดความลึกของการหลอมเหลวในเหล็กกล้าแผ่นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

สำหรับขั้นตอนที่สองในการศึกษารองต่อคือการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่นโดยขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากเตรียมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด 1100-H12 หนา 1 และ 0.8 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยโลหะแผ่นทั้งสองมีขนาด 65x85 มิลลิเมตร ชัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 เช็ดทำความสะอาดด้วยเอทานอล กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมอยู่ในช่วง 80-160 แอมแปร์ สำหรับความเร็วในการเชื่อม, ชนิดของอิเล็กโทรด, ขนาดของอิเล็กโทรด, มุมปลายอิเล็กโทรด และก๊าซปกคลุมรอยเชื่อมใช้สภาวะเช่นเดียวกับการทดลองศึกษาศักยภาพการควบคุมการหลอมเหลวเพียงบางส่วนในเหล็กกล้าแผ่น ขณะเชื่อมทำการจัดวางชิ้นงานเชื่อมในลักษณะซ้อนเกยโดยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานขณะทำการเชื่อมทำจากโลหะอลูมิเนียมผสมเกรด 6061 และใช้แท่งเหล็กกล้าลงด้านล่างชิ้นงานเชื่อม ลักษณะการวางชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะการวางและจับยึดชิ้นงานขณะทำการเชื่อม

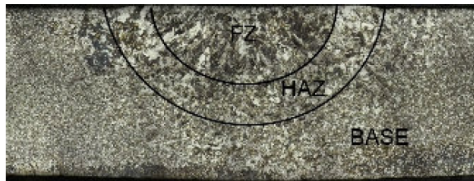
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 การควบคุมการหลอมเหลวในเหล็กกล้าแผ่น

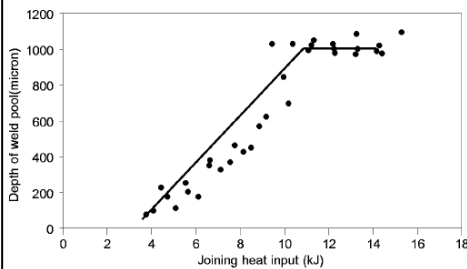
จากการศึกษาศักยภาพในการควบคุมการหลอมเหลวบนเหล็กกล้าแผ่นโดยกระบวนการเชื่อมทิกพบว่ากระบวนการเชื่อมทิกสามารถควบคุมการ



หลอมเหลวเพียงบางส่วนในเหล็กกล้าแผ่นซึ่งมีความหนา 1 มิลลิเมตรได้เป็นอย่างดี จากรูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานศึกษาด้วยภาพการควบคุมการหลอมเหลวสามารถจำแนกบริเวณที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนได้ดังนี้ บริเวณที่เกิดการหลอมเหลว(Fusion zone, FZ) บริเวณกระทบร้อน(Heat affected zone, HAZ) และบริเวณที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนขณะเชื่อม(Base metal, BASE) รูปที่ 4 แสดงความลึกของการหลอมเหลวพบว่าที่ปริมาณความร้อนในการเชื่อมต่ำการหลอมเหลวมีความลึกเริ่มตั้งแต่ 77.2 ไมโครเมตร จนกระทั่งเหล็กกล้าแผ่นหลอมทะลุตลอดความหนา เมื่อปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคของเหล็กกล้าแผ่นเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 65 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 0.65 เมตรต่อนาที



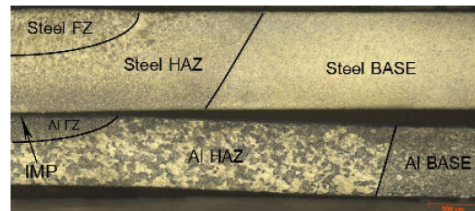
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมและความลึกการหลอมเหลวบนเหล็กกล้าแผ่น

3.2 การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด 1100-H12

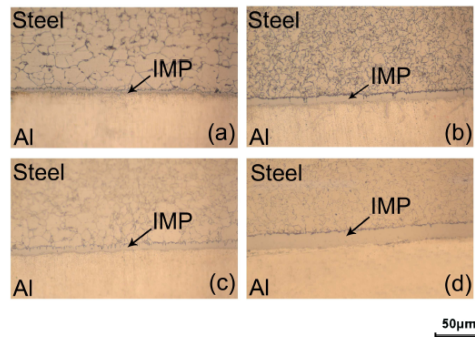
3.2.1 โครงสร้างจุลภาค

หลังจากพบว่ากระบวนการเชื่อมทิกมีแนวโน้มสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิค Self-brazing ได้ จึงดำเนินการทดลองเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด1100-H12

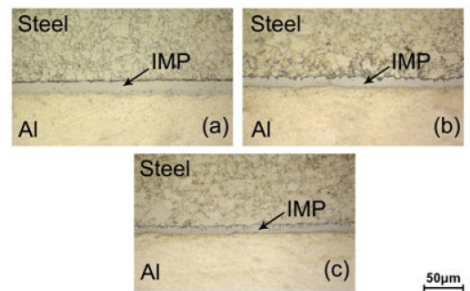
AMM



รูปที่ 5 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเพียงครั้งหนึ่งของรอยเชื่อมทั้งหมด



รูปที่ 6 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยความเร็วในการเชื่อมเป็น 0.65 เมตรต่อนาที และกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 90(a) ,110(b) ,130(c) และ150แอมแปร์(d)

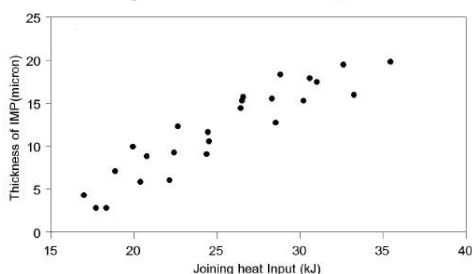


รูปที่ 7 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ โดยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเป็น 130 แอมแปร์ และความเร็วในการเชื่อมเป็น 0.55(a) ,0.60(b) และ0.65เมตรต่อนาที(c)

จากรอยเชื่อมต่อเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด1100-H12ที่ได้สามารถแบ่งบริเวณต่างๆในรอยเชื่อมได้ดังนี้ บริเวณเหล็กกล้าหลอมเหลว (Steel FZ) บริเวณกระทบร้อนในเหล็กกล้า (Steel HAZ) บริเวณเหล็กกล้าที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Steel BASE) บริเวณอลูมิเนียมหลอมเหลว (Al FZ)

บริเวณกระแทกร้อนในอลูมิเนียมผสม(AI HAZ) บริเวณอลูมิเนียมที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน(AI BASE) และชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (IMP) ดังแสดงในรูปที่ 5

หลังจากการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด1100-H12 ทำการวัดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะพบว่าการเพิ่มปริมาณความร้อนในการเชื่อมทั้งโดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม และลดความเร็วในการเชื่อมล้วนทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกับปริมาณความร้อนในการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 8 นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจสอบชนิดของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นขณะเชื่อมโดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry ในลักษณะ line scan พบว่าสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นสารประกอบ $FeAl_2$

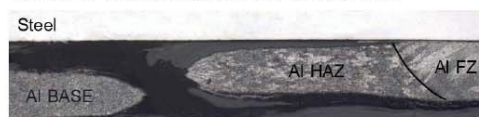


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนในการเชื่อมและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

3.2.2 ความแข็งแรงของรอยเชื่อมโลหะต่างชนิด

จากการทดสอบแรงดึงชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด1100-H12 พบว่าชิ้นงานที่สามารถเชื่อมติดทั้งหมดไม่เกิดการแตกหักเสียหายบริเวณรอยเชื่อมต่อระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่น แต่เกิดการแตกหักที่อลูมิเนียมแผ่นบริเวณห่างออกไปจากรอยเชื่อมเล็กน้อย จากนั้นทำการตรวจสอบชิ้นงานเชื่อมที่แตกหักเสียหายจากการทดสอบแรง พบว่าชิ้นงานเชื่อมเกิดการแตกหักเสียหายที่บริเวณกระแทกร้อนของ

โลหะอลูมิเนียมผสมโดยสามารถสังเกตได้จากบริเวณที่เกิดการแตกหักนี้ เกรนของอลูมิเนียมผสมจะมีขนาดใหญ่กว่าเกรนของอลูมิเนียมผสมบริเวณที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนขณะเชื่อมดังรูปที่ 9 เนื่องจากโลหะอลูมิเนียมผสมแผ่นที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีด มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโครงสร้างจุลภาคแบบถาวรมาก เมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมเพียงพองเรนจึงเกิดการตกผลึกใหม่และโตส่งผลให้อลูมิเนียมผสมบริเวณนี้มีความแข็งแรงต่ำกว่าบริเวณที่ไม่ได้รับผลจากความร้อน

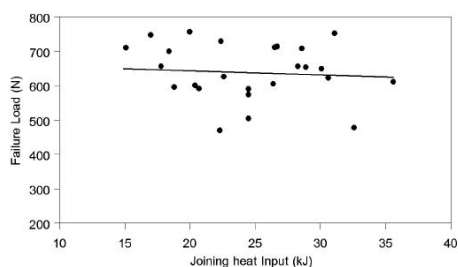


รูปที่ 9 บริเวณแตกหักจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม

นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานเชื่อมด้านทานต่อการแตกหักเสียหายที่แรงดึงสูงสุด 756 นิวตัน และความสามารถในการต้านทานการแตกหักนี้ลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 10 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณความร้อนจากการเชื่อมเพิ่มขึ้นโครงสร้างทางจุลภาคในบริเวณกระแทกร้อนหรือเกรนจะมีขนาดโตขึ้นดังแสดงในรูปที่ 11 ส่งผลให้ความแข็งแรงของอลูมิเนียมผสมต่ำลง

4. สรุปผลการทดลอง

กระบวนการเชื่อมที่กร่วมกับเทคนิค Self-brazing สามารถประยุกต์สำหรับเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและอลูมิเนียมผสมแผ่นเกรด1100-H12ได้ โดยชิ้นงานเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดดังกล่าวมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด 756 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าความต้านทานแรงดึงที่บริเวณกระแทกร้อนของโลหะอลูมิเนียมผสม และความต้านทานแรงดึงนี้ลดลงเล็กน้อยอย่างไม่ชัดเจนเมื่อปริมาณความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้นและส่วนใหญ่เป็นสารประกอบ $FeAl_2$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนในการเชื่อมและความต้านทานการแตกหักของชิ้นงานเชื่อม

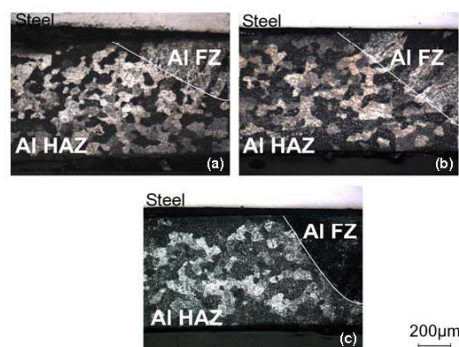
5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานนี้ในรหัสทุน MRG 5180100

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M. J. Rathod, M. Kutsuna, Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding, *Weld. J.*, (2004) 16s-26s.

AMM



รูปที่ 11 บริเวณกระแทบร้อนในโลหะอลูมิเนียมผสมจากการเชื่อมด้วยความเร็วในการเชื่อม 0.65 เมตรต่อ นาทีและกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 100 (a), 130(b), และ 150แอมแปร์(c)

[2] Shigeaki Kobayashi and Takao Yakou. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment, *Materials Science & Engineering*, A338(2002), October 2001, pp. 44 – 53.

Feasibility study of using GTAW process in dissimilar metal joining between low carbon-steel/5052 Al alloys sheet

P. Mitsomwang^a, R. Borrisutthekul^a, S. Rattanachan^a, Y. Mutoh^b

^aDepartment of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon-Ratchasima, Thailand, 30000

Tel.: 044-224481 Fax: 044-224482 E-mail: m5141296@g.sut.ac.th

^bDepartment of System Safety, Nagaoka University of Technology, Nagaoka-shi, Niigata, Japan, 940-2188

Tel.: 81-258-48-9735 Fax: 81-258-47-9770

Abstract

Gas tungsten arc welding (GTAW) with self-brazing was applied for dissimilar metal joining between low carbon steel/5052 Al alloys. In this study, a lap joint configuration with steel sheet as the upper sheet was used. In order to successfully achieve a dissimilar metal joint with self-brazing technique, partial penetration in the upper steel sheet must be obtained. Therefore, the depth of the weld bead on the steel sheet was first studied to ensure the feasibility of using GTAW process with self-brazing technique. According to the weld depth results, the partial penetration of steel sheet could be obtained from various welding conditions, which indicated a good feasibility of using GTAW with self-brazing technique. Further results showed that dissimilar metal joint between low carbon steel/5052 Al alloys could be successfully obtained by GTAW process as self-brazing technique. The intermetallic compound layer was formed in the bonding area, which is called IMP zone as defined in fig.1. As the joining heat input was increased, the thickness and the width of the IMP zone were increased from 4.1 to 32 μm and from 1.44 to 6.02 mm respectively. From tensile shear testing results of dissimilar metal joint, load resistance of dissimilar metal joint seemed to depend on the width of IMP zone. When the width of IMP zone was increased, the load resistance of dissimilar metal joint was increased until reaching to the failure load of 5052 Al alloys at the HAZ.

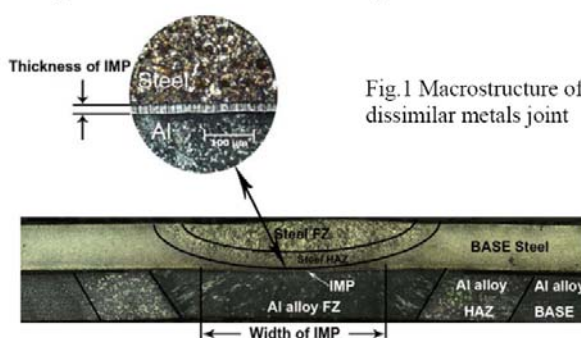


Fig.1 Macrostructure of dissimilar metals joint



International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Mahasarakham University, Thailand

Feasibility study of using tig welding in dissimilar metals between steel/ aluminum alloy

Rattana Borrisutthekul¹, Pusit Mitsomwang¹, Sirirat Rattanachan¹, and Yoshiharu Mutoh²

¹Department of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon-Ratchasima, Thailand, 30000

²Department of System Safety, Nagaoka University of Technology, Nagaoka-shi, Niigata, Japan, 940-2188. E-mail: rattana@sut.ac.th

Abstract

In joining dissimilar metals between steel and aluminum alloy, the difficulty is caused by intermetallic reaction phase formation. In order to suppress its formation, the self-brazing process has been applied. Previously, only laser welding process could be applied together with the self brazing process in joining dissimilar metals. However, in this research work, TIG welding, which could join the thin section, has been proposed to be welding process candidate for joining dissimilar metals welding between steel/aluminum alloys. The objective of this work is to evaluate the feasibility of application of TIG welding for joining dissimilar metals. The results showed that TIG welding could produce the partial penetration welding in 1 mm thickness steel sheet, which indicated the feasibility in application self-brazing technique by TIG welding process. Moreover, TIG welding as a self-brazing technique could successfully join dissimilar metal between steel and aluminum alloy. The load resistance of bonded zone, intermetallic reaction layer zone of joint, was higher than the load resistance of A1100 aluminum alloy after welding. The lower load resistance of joint compared with A1100-H12 was caused by the grain growth in A1100-H12 during welding.

Keywords: dissimilar metal joining, TIG welding, steel, aluminium alloy

1. Introduction

It has been known that the difficulty of dissimilar metal joining between steel and aluminum alloy is the brittle intermetallic reaction phase formation. In order to suppress the formation of intermetallic reaction phase, self-brazing technique, which the molten zone of steel was controlled to be a partial penetration during lap-joint welding between steel/aluminum alloy as shown in Fig. 1, was used in many research works.[1-5] TIG welding is suitable welding process for joining thin section. It is one of the possible welding processing for joining dissimilar metal between steel/aluminum alloys by using self-brazing technique due to its possibility to produce partial penetration weld in steel sheet. However, few research works were

done in order to investigate the feasibility of using TIG welding process in joining steel and aluminum alloy by using self brazing process. Thus, in the present study, the feasibility study in production partial penetration in steel by TIG welding was done firstly in order to examine the feasible in using self-brazing technique of TIG welding. Then, the feasibility study of using TIG welding in welding of dissimilar metals between steel and aluminum alloy was carried out.

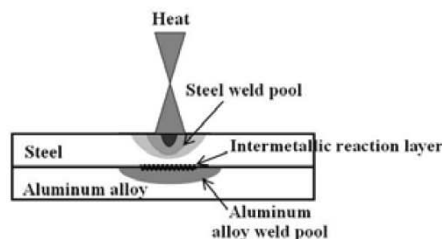


Fig. 1: Schematic of the interface during dissimilar metals welding between steel and aluminum alloy.

TABLE 1 CHEMICAL COMPOSITIONS OF MATERIALS

Material	Chemical Composition (wt%)							
	Fe	C	Mn	Cu	Si	Mg	Zn	Al
1100 Al alloy	0.581	-	-	0.073	0.110	<0.001	0.018	99.22
Steel	99.51	0.077	0.277	<0.005	0.016	0.001	-	0.025

TABLE 2 MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS

Material	Mechanical Properties		
	Yield Strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
1100 aluminum alloy-H12	105	110	12
Steel	275	380	21

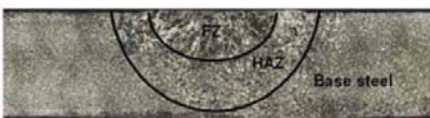


Fig. 2 The macrostructure of steel weld with electrical current of 45 ampere current and 0.65m/min of welding speed.

2. Materials used

The 1 mm thick hot roll steel sheet (steel) and 0.8 mm thick 1100 aluminum alloy-H12 sheet (aluminum alloy) were used. Their chemical compositions and mechanical properties are shown in Table 1 and Table 2, respectively. Both steel and aluminum alloy were prepared in size of 85x65 mm.

3. Results and Discussions

3.1 Bead on Steel Sheet

The bead on steel sheet experiment was carried out in order to study the feasibility to produce the partial molten penetration in 1 mm steel sheet which is the basics requirement of application of self-brazing technique. The experiment was started by immersing steel sheet in 12% HCl for 2 minute at 80 C in order to remove oxide layer formed during hot rolling process. The TIG welding machine was used. The bead on the steel sheet was done with welding speed of 0.55 ,0.60 and 0.65 m/min. Welding current were varied from 20 to 75 A. The direct current electrode negative (DCEN) was used in this study. The arc distance, electrode type, electrode size and electrode tip

angle was 2.4 mm, EWTh-2, 3.2 mm in diameter and 60° respectively. Pure argon gas with 8 l/min was used for prevention the oxidation of molten steel. The macroscopic observations were carried out in order to obtain the depth of welding and width of welding.

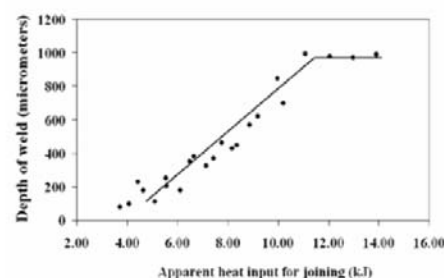


Fig. 3 The relation between heat input and weld pool depth.

Fig. 2 shows the macroscopic observation of steel weld pool obtained with electrical current of 45 A and 0.65 m/min of welding speed. From the Fig. 2, it was found that the partial penetration of molten zone of steel sheet could be obtained by TIG welding process.

Fig. 3 shows depth of weld obtained with various apparent heat input for joining. From Fig.3, it was found that many welding conditions could be produced the partial penetration welding in 1.0 mm thickness steel sheet. Moreover, it was found that the depth of weld was increased when heat input was increased. Thus we could refer that TIG welding process is possible to join dissimilar metals by self-brazing process in limiting welding heat input.

3.2 Dissimilar Metals Welding Between Steel/Aluminum Alloy

According to previous section, it was shown the feasibility of using TIG welding together with self-brazing technique. In this section, the feasibility of application of TIG welding together with self-brazing technique in joining dissimilar metals was investigated. The experiment was started by removing oxide layer in steel sheet by dipping steel sheet in 12% HCl

for 2 minute at 80 °C. After that both steel and aluminum alloy was polished and cleaned with #180 emery paper and ethanol, respectively. The TIG lap joint welding configuration with steel top sheet was used as shown in Fig. 4. The arc distance, electrode size, and electrode type were 2.4 mm, 3.2 mm in diameter, and EWTh-2, respectively. The direct current electrode negative (DCEN) was applied. Argon gas with 8 l/min was used for shielding the welding specimens. Welding speeds of 0.55, 0.60, and 0.65 m/min were used. In this study, welding current was varied in order to obtain the joint where steel and aluminum alloy were not directly mixed during welding. After welding the tensile shear test and microstructure observation were carried out in order to observe load resistance of the joints and welding structures.

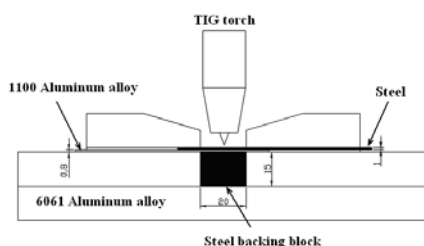


Fig. 4: Welding configuration used

Figure 5 shows an example of half view of the joint between steel and aluminum alloy. From Fig. 5, it could be seen that TIG welding could make the dissimilar metals joint between steel/aluminum alloys by self-brazing technique, the brazing of aluminum alloy molten on solid steel sheet. Moreover, different zones in joining region were found; steel weld pool, HAZ of steel, steel base metal, intermetallic reaction layer, aluminum alloy weld pool, heat affected zone (HAZ) of aluminum alloy, and aluminum alloy base metal.

Fig. 6 and Fig. 7 show intermetallic reaction layer formed at interface between steel and aluminum alloy under various welding speeds at constant electrical current used and under various electrical currents at a constant welding speed, respectively. From both figures, it was found that thickness of intermetallic reaction layer was decreased with increasing welding speed and with decreasing electrical

current. Figure 8 shows the thickness of intermetallic reaction layer (IMP) under various apparent heat input for joining. It was found that intermetallic reaction layer thickness was increased with increasing apparent heat input for joining. From these results, if the joint could be produced at lower apparent heat input for joining, thinner intermetallic reaction layer could be formed.

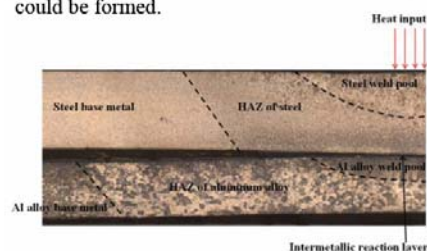


Fig. 5: Overview of the joint.

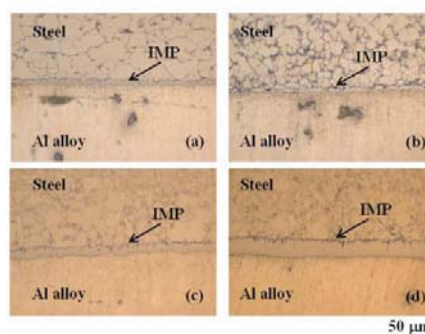


Fig. 6: Intermetallic reaction layer obtained at welding speed of 0.65 m/min and (a) 90, (b) 110, (c) 130, (d) 150 A of electrical current used.

From Fig. 5, it also was found that microstructures in HAZ of aluminum alloy and aluminum alloy base metal were different.

The microstructure of HAZ of aluminum alloy was coarser compared to the base metal. It is known that the aluminum alloy used in this study can be strengthened only by work hardening which grain structures were deformed. The deformed microstructure is ready to recrystallize and grow when temperature is increased. Thus, when the HAZ of aluminum alloy was heated up higher than recrystallization temperature and grain growth temperature, the

deformed microstructure was recrystallized and followed by growth, as shown in Fig. 5.

Fig. 9 shows the microstructure in HAZ of aluminum alloy under 0.65 m/min of welding speed and two electrical current used. From Fig. 9 it was found that the microstructure was slightly coarser when using higher electrical currents, which corresponded to higher apparent heat input for joining. Thus, it can be concluded that when using lower apparent heat input for joining, the finer grain in the HAZ of aluminum

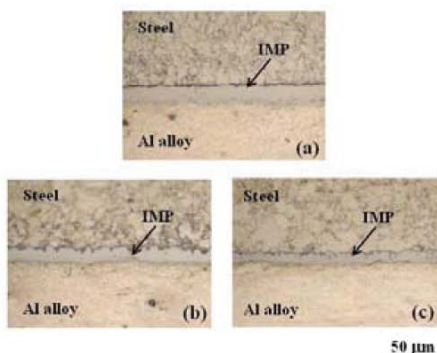


Fig. 7: Intermetallic reaction layer obtained at 130 A and welding speed of (a) 0.55 m/min, (b) 0.60 m/min, and (c) 0.65 m/min.

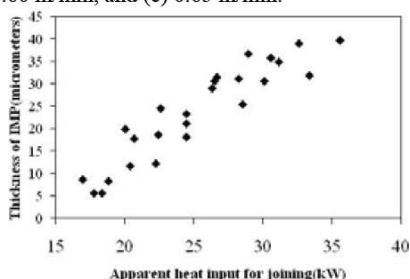


Fig. 8 : The relationship between thickness of intermetallic reaction layer and apparent heat input for joining.

alloy is obtained.

Fig. 10 shows the failure load of all dissimilar metals joints obtained in this study. From that figure, it was found that failure load of the joints was in the range of 500-800 N, which were lower than that of base metal, about 1090 N. It was also found that the failure load slightly decreased with increasing apparent heat input for joining.

Fig. 11 shows the fracture path of the joint which was common all the joints. From Fig. 11, it was found that the fracture path of the specimen was through the HAZ of aluminum alloy. According to microstructural observation and tensile-shear test results, it could be indicated that the weakest zone of joint was HAZ of aluminum alloy, which was due to the grain growth of aluminum alloy at HAZ. Moreover, higher apparent heat input for joining results in coarser structure of aluminum alloy at HAZ, which affects to decrease of strength of the HAZ of aluminum alloy as realized in slightly decreasing of load resistance of joint in Fig. 10.

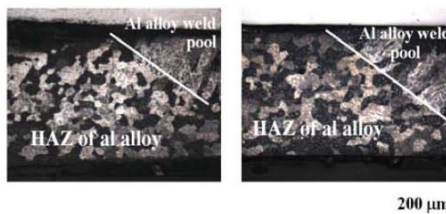


Fig. 9: HAZ of aluminum alloy obtained with 0.65 m/min of welding speed and (a) 100 A of electrical current and (b) 130 A of electrical current

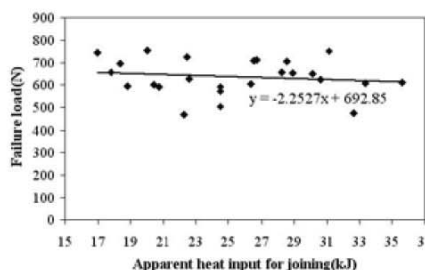


Fig. 10: The relationship between failure load and apparent heat input for joining

4. Conclusions

Both bead on the steel sheet and dissimilar metals joining between steel and aluminum alloy was studied. From the results, it could be referred that TIG welding could produce the partial penetration welding in 1 mm thickness steel sheet, which indicated the feasibility in application self-brazing technique



International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Maharakham University, Thailand

by TIG welding process. Moreover, TIG welding as a self-brazing technique could successfully join steel and aluminum alloy in the dissimilar metal joint. The load resistance of bonded zone, intermetallic reaction layer zone of joint, was higher than that of A1100-H12 aluminum alloy after welding. The lower load resistance of joint compared with base A1100-H12 aluminum alloy was caused by the grain growth during welding. Moreover, it is found that application of higher heat during TIG welding results in thicker intermetallic reaction layer and coarser microstructure in HAZ of aluminum alloy. The coarser microstructure at HAZ of aluminum alloy was main reason of lower of load resistance of aluminum alloy at heat affected zone.



Figure 11: Fracture part in joint with 0.65 m/min of welding speed and 165 A of electrical current used

5. Acknowledgement

This work was supported by The Thailand Research Fund and Office of The Higher Education Commission, Kingdom of Thailand (Grant No. MRG5180100).

6. References

- [1] R. Borrisutthekul, T. Yachi, Y. Miyashita, and Y. Mutoh, Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, V. 467, Issues 1-2, 2007, 108-113.
- [2] Y. Miyashita, I. Nakagawa, J.Q. Xu, Y. Mutoh, M. Akahori, H. Okumura, Laser Welding of Dissimilar Metals Joint Aided by Unsteady Thermal Convection Boundary Element Method Analysis, *Quart. J. Jpn. Weld. Soc.*, 23-1(2005) 16-24. (in Japanese)
- [3] K. J. Lee, S. Kumai, T Arai, Interfacial Microstructure and Strength of Steel to Aluminum Alloy Lap Joints Welded by a

Defocused Laser Beam, *Mater. Trans.* 46 (2005) 1847-1856.

- [4] K. J. Lee, S. Kumai, Characterization of Intermetallic Compound Layer Formed at the Weld Interface of the Defocused Laser Welded Low Carbon Steel/6111 Aluminum Alloy Lap Joint, *Mater. Trans.* 47 (2006) 1178-1185.
- [5] M. J. Rathod, M. Kutsuna, Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding, *Weld. J.*, (2004) 16s-26s.



ประวัติผู้เขียน

นายภูษิต มิตรสมหวัง เกิดเมื่อวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2529 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนประจวบวิทยาลัย จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เมื่อปีพุทธศักราช 2547 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2551 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2551 โดยได้รับทุนการศึกษา สำหรับผู้มีผลการเรียนดีเด่นระดับบัณฑิตศึกษา มีบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ดังนี้

(1) ภูษิต มิตรสมหวัง และ รัตน บิริสุทธิกุล. 2553. การเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับอลูมิเนียมผสมเกรด 5052. วารสารการเชื่อมไทย. (51): 21–25.

(2) ภูษิต มิตรสมหวัง, รัตน บิริสุทธิกุล, ศิริรัตน์ รัตนจันทร์ และ โยชิฮารุ มูโต้. การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับอลูมิเนียมผสมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมทิก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, โรงแรมอิมพีเรียลแม่ปิ้ง จ. เชียงใหม่. 4-7 พฤศจิกายน 2552.

(3) Mitsomwang, P., Borrisutthekul, R., Rattanachan, S. and Mutoh, Y. **Feasibility study of using GTAW process in dissimilar metal joining between low carbon steel/5052 alloys sheet.** การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3, โรงแรมเซ็นจูรี่พาร์ค กรุงเทพมหานคร. 26-27 ตุลาคม 2552.

(4) Borrisutthekul, R., Mitsomwang, P., Rattanachan, S. and Mutoh, Y. **Feasibility study of using tig welding in dissimilar metals between steel/aluminum alloy.** International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), Pullman Raja Orchid Hotel, Khon Kaen. Thailand. 23-24 July 2009.