

ผลของชั้นเคลือบสังกะสีต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน  
ต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2557

**EFFECT OF ZINC COATING ON DISSIMILAR METAL  
JOINING BETWEEN LOW CARBON STEEL AND  
ALUMINIUM ALLOY**

**Wuttikorn Paonil**



**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 2014**

ผลของชั้นเคลือบสังกะสีต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ  
กับโลหะผสมอะลูมิเนียม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ฐาปนีย์ พัชรวีชญ์)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.รัตน์ บริสุทธิ์กุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อุษณีย์ กิตกำธร)

กรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ สีวงศ์)

กรรมการ

(อ. ดร.เปี่ยม พัวพงศกร)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิจานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วุฒิกกร เปานิล : ผลของชั้นเคลือบสังกะสีต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่าง  
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับ โลหะผสมอะลูมิเนียม (EFFECT OF ZINC COATING ON  
DISSIMILAR METAL JOINING BETWEEN LOW CARBON STEEL AND  
ALUMINIUM ALLOY) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.รัตน บริสุทธิกุล, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คอาคิยเทคนิคการบัดกรีแข็ง ในการทดสอบชิ้นงานเชื่อมถูกจัดวางแบบซ้อนเกยให้เหล็กกล้าแผ่นวางไว้ด้านบนเหนือแผ่น โลหะผสมอะลูมิเนียมจากการผลทดลองพบว่ากรณิการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวการเชื่อมติดระหว่างเหล็กกล้ากับอะลูมิเนียมและพบว่าเป็นสารประกอบประเภท  $Fe_2Al_3$  ขณะที่กรณิการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีความไม่สม่ำเสมอโดยเฉพาะขอบบ่อหลอมของโลหะผสมอะลูมิเนียมสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีด้วยกันสองบริเวณ คือ  $Fe_xAl_yZn_z$  ตลอดความกว้างบ่อหลอมอะลูมิเนียมและ Al-Zn บริเวณถัดจากบ่อหลอมอะลูมิเนียม ทำให้รอยเชื่อมติดในกรณิการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีนั้นกว้างกว่ากรณิการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย นอกจากนี้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นทั้งสองกรณิการเชื่อมจะกว้างขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนลงสู่ชิ้นงานมากขึ้นเมื่อนำชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณิไปทำการทดสอบแรงดึงเดือนพบว่าชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีจะสามารถต้านทานต่อแรงดึงเดือนได้สูงกว่ากรณิเหล็กกล้าแผ่นเปลือยเมื่อความร้อนใช้ในงานเชื่อมต่ำ และต่ำกว่าเมื่อความร้อนที่ใช้ในงานเชื่อมสูงขึ้น ซึ่งที่เป็นเช่นนี้น่าจะเกิดจากชั้นเคลือบสังกะสีที่มีอยู่บนเหล็กกล้าแผ่นส่งผลทำให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะกระจายในโลหะพื้นอะลูมิเนียมไม่สม่ำเสมอ และเมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเดือนหลังจากทิ้งไว้ในสภาวะกักกร่อนสูงพบว่าชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณิสามารถต้านทานต่อแรงดึงเดือนได้ต่ำลงเมื่อทิ้งไว้ในสภาวะกักกร่อนเป็นเวลานานและชั้นเคลือบสังกะสีไม่มีน่าจะมีผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงเดือนของชิ้นงานเชื่อมหลังทิ้งไว้ในสภาวะการกักกร่อนเป็นเวลานานสุดท้ายทั้งสองกรณิการเชื่อมความสามารถต้านทานต่อความล้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับแรงดึงสูงสุดต่ำลงและความต้านทานความล้าคล้ายคลึงกัน

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

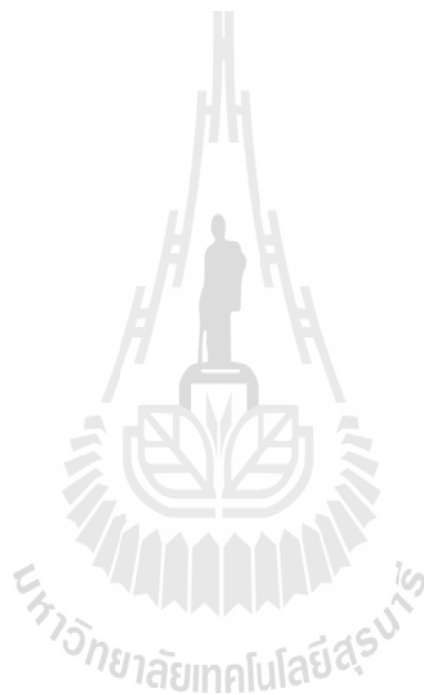


WUTTIKORN PAONIL : EFFECT OF ZINC COATING ON DISSIMILAR  
METAL JOINING BETWEEN LOW CARBON STEEL AND ALUMINIUM  
ALLOY. THESIS ADVISOR : RATTANA BORRISUTTHEKUL, Ph.D.,  
96 PP.

#### ZINC COATED STEEL/INTERMETALLIC COMPOUND

This research was carried out in order to study the effect of zinc layer on steel sheet on the dissimilar metal joining between low carbon steel/aluminium alloy by gas tungsten arc welding process with self-brazing technique. In the experiment, steel sheets were lap joint to aluminium alloy, with the steel on top of aluminium alloy. According to the result, it was found that in the bare sheet steel welding case, the intermetallic compound layers ( $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ) were formed regularly along joining zone between steel and aluminium alloy. For the coated steel sheet welding case, the intermetallic compound layers were uneven especially at edges of the aluminium alloy fusion zone. Two zones of intermetallic compound layer were found: 1) the Fe-Al-Zn phase formed along the aluminum alloy fusion zone and 2) the Al-Zn phase formed along the outside of aluminum alloy fusion zone. It led the welding width in case of coated steel sheet welding was wider than that bare steel case. Moreover, it was found that the width of intermetallic compound layer increases when the heat input to the joint increase. The shear-tensile testing results showed the higher load resistance of joint in case of the coated steel sheet when using heat input for welding is low. On the contrary, when using higher heat input for welding, the load resistance of joint with coated steel sheet was lower than in case of bare steel sheet. In the

experiment of the durability of the weld after soaking at the high corrosion atmosphere (salt solution) on the different times, it found that the load resistance at the joint decrease when the soaking time increase. Also, no evident indicated that zinc layer affected on load resistance of joint after soaking. Finally, the fatigue resistance of joint increases with decreasing the maximum tensile-shear load during test and the fatigue resistance of both case is similar manner.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จสมบูรณ์ด้วยดีไม่ได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำทั้งในด้านวิชาการ ปฏิบัติการ การดำเนินงานวิจัยอย่างดียิ่งจากบุคคลและกลุ่มบุคคลและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงอันได้แก่

อาจารย์ ดร.รัตน บริสุทธิกุล อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำและคำปรึกษาตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดรวมทั้งได้เสียสละเวลาอบรมสั่งสอนผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาและยังช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ วิชัย ศรีสุรภัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องปรับปรุงและซ่อมแซมเครื่องควบคุมการเคลื่อนที่ซึ่งงานเชื่อม ตลอดจนให้คำปรึกษาอื่นๆ

อาจารย์ ดร.อัญชลี แสงซ้าย อาจารย์ประจำภาคภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดคำแนะนำในการทดสอบความถี่ของชิ้นงานเชื่อมในวิทยานิพนธ์นี้

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและแนวทางแก้ไขปัญหาในการดำเนินการวิจัย ตลอดจนศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือทุกท่านที่อาจ ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัท โตโยต้า มอเตอร์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด (TMAP-MS) ที่ให้ความอนุเคราะห์ชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี SCGA 270C ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยขอมอบให้ กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งและสงเสียดให้มีการศึกษาจนถึงทุกวันนี้ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

วุฒิกุล เปานิล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	6
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	6
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 รายการอ้างอิง.....	7
<b>2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>10</b>
2.1 การเชื่อม โลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น.....	10
2.2 การเชื่อม โลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี(Galvanized steel) กับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น.....	17
2.3 ลักษณะการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียม.....	27
2.4 รายการอ้างอิง.....	31
<b>3 ผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม.....</b>	<b>34</b>

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1	บทคัดย่อ .....	34
3.2	บทนำ .....	34
3.3	วิธีการดำเนินการวิจัย .....	36
3.3.1	การเตรียมชิ้นงาน .....	37
3.3.1.1	การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี .....	37
3.3.1.2	การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเปลือย .....	39
3.3.1.3	การเตรียมชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น .....	39
3.3.2	การเชื่อม .....	39
3.3.3	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบแรงดึงเดือน .....	41
3.3.3.1	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค .....	41
3.3.3.2	การทดสอบแรงดึงเดือน .....	42
3.4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	43
3.4.1	โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของแนวรอยเชื่อม .....	43
3.4.2	ความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมและความกว้างของชั้นสารประกอบ เชิงโลหะ .....	53
3.4.3	ความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงเดือน .....	57
3.5	สรุปผลการวิจัย .....	62
3.6	รายการอ้างอิง .....	62
4	ผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อความทนทานของชิ้นงานเชื่อม โลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น .....	64
4.1	บทคัดย่อ .....	64
4.2	บทนำ .....	64
4.3	วิธีการดำเนินการวิจัย .....	66
4.3.1	การเตรียมชิ้นงาน .....	66
4.3.1.1	การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี .....	67

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1.2	การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเปลือย .....	67
4.3.1.3	การเตรียมชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น .....	67
4.3.2	การเชื่อม .....	67
4.3.3	การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเดือนของชิ้นงานเชื่อมหลัง ถูกทิ้งไว้ในสภาวะเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง .....	68
4.3.4	การทดสอบความต้านทานต่อความล้า .....	69
4.4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	71
4.4.1	ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมหลังทิ้งไว้ ในสภาวะกัดกร่อน .....	71
4.4.2	ความสามารถในการต้านทานต่อความล้าของชิ้นงานเชื่อม .....	75
4.5	สรุปผลการวิจัย .....	80
4.6	รายการอ้างอิง .....	81
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	82
5.1	บทสรุป .....	82
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	83
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก	กาคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานขณะเชื่อม .....	84
ภาคผนวก ข	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา .....	86
ประวัติผู้เขียน	.....	96

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	การเลือกใช้เหล็กกล้าในการประกอบ โครงสร้างรถยนต์ Volvo's XC60 ..... 1
1.2	วิวัฒนาการของวัสดุที่นำมาผลิต โครงสร้างตัวถังรถยนต์ ..... 2
1.3	ชิ้นส่วนรถยนต์ที่เกิดสนิม ..... 3
1.4	แสดงชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างอินเตอร์เฟซของ Steel และ weld metals ..... 4
1.5	ลักษณะของการแตกหักเสียหายบริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ภายหลังการทดสอบแรงดึง ..... 5
2.1	เทคนิคการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ..... 10
2.2	ผลของอุณหภูมิต่อการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ..... 11
2.3	การเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นกับเวลาในการแพร่ ..... 12
2.4	การจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียม ด้วยกระบวนการเชื่อม Friction Stir Welding ..... 12
2.5	ผลความเร็วในการเชื่อมต่อการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ..... 13
2.6	ความหนาของ IMP เมื่อไม่ใช้ลวดเชื่อมที่ไม่มี/และมีส่วนผสมของ Si ..... 15
2.7	การจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียม ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ ..... 15
2.8	แผนภาพแสดงการจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมของเหล็กกล้ากับอะลูมิเนียมผสม ..... 16
2.9	แผนภาพการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น เกรด 1100-H12 ..... 16
2.10	โพรงอากาศที่เกิดจากไอระเหยของสังกะสีในการเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี กับอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ ..... 18
2.11	โพรงอากาศที่เกิดจากไอระเหยของสังกะสีเกิดมากบริเวณขอบเนื้อเชื่อม ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ ..... 18
2.12	ผลของความเร็วในการเชื่อมต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิง โลหะที่เกิดขึ้น ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ ..... 19

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.13 ลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการเชื่อมแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดิ่ง .....	19
2.14 การจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม MIG .....	20
2.15 แสดงลักษณะการแพร่ของชั้นเคลือบสังกะสีเข้าสู่โลหะพื้นอะลูมิเนียม.....	21
2.16 ลักษณะการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะแผ่นอะลูมิเนียมผสมภายหลังการทดสอบแรงดึง .....	21
2.17 แสดงการจัดวางชิ้นงานเชื่อมและการเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี Q235 กับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม Cold metal transfer (CMT) .....	22
2.18 แสดงโครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี Q235 กับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม Cold metal transfer (CMT) .....	23
2.19 แผนภูมิสมมูลของระบบเหล็ก-อะลูมิเนียม .....	23
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยเชื่อม ปริมาณความร้อนในการเชื่อมและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของชิ้นงานเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี Q235 กับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม Cold metal transfer (CMT).....	24
2.21 แสดงการวางชิ้นงานและการเชื่อมเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีความแข็งแรงสูงกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด AA6061 ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า Two-pass laser welding .....	26
2.22 EDS analysis ของรอยเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (Galvanized steel) กับโลหะอะลูมิเนียม .....	26
2.23 แสดงการทดสอบแบบจุ่ม (Immersion test) .....	27



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ลักษณะรูปร่างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กที่อยู่สถานะของแข็งกับอะลูมิเนียมหลอมเหลว.....	28
2.25 ลักษณะรูปร่างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	28
2.26 การก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กที่อยู่สถานะของแข็งกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับเวลาในการจุ่มแช่.....	29
2.27 การก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมกับอุณหภูมิในการจุ่มแช่เหล็กในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่เวลาในการจุ่มแช่เท่ากัน.....	30
3.1 เครื่องตัดโลหะแผ่น Hydraulic Guillotine Shears (CNTA3150/63A).....	38
3.2 เครื่องเจียรนัยราบผิวงาน Horizontal Surface Grinders (BRH20.02).....	38
3.3 ลักษณะของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่น (Galvanize Steel).....	39
3.4 แสดงการจับยึดชิ้นงานและการขึ้นงานเชื่อมแบบซ้อนเกลียวด้วยกระบวนการเชื่อม TIG.....	40
3.5 เครื่องเชื่อม ยี่ห้อ HOBART รุ่น TIGWAVE 350 AC/DC.....	40
3.6 แสดงแผนภาพการตัดชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบแรงดึงเดือน.....	41
3.7 เครื่องทดสอบแรงดึงเดือน Universal testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5582 (100 kN).....	42
3.8 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงเดือน.....	42
3.9 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางรอยเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย.....	44
3.10 การกระจายตัวของธาตุในภาคตัดขวางแนวการเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมกรณีเหล็กกล้าแผ่นเปลือย (ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A ความเร็วในการเชื่อม 0.60 เมตร/นาที).....	45
3.11 แผนภูมิสมมูลของระบบเหล็ก-อะลูมิเนียม.....	46
3.12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางรอยเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 110 A ความเร็วในการเชื่อม 0.60 เมตร/นาที).....	47
3.13 บริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่สม่ำเสมอและมีรอยแตกเกิดขึ้น (กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 140 A).....	48

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14	ภาพถ่ายแนวตัดขวางรอยเชื่อมโดยใช้ SEM ที่กำลังขยาย 600 เท่าของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่กระแสไฟในการเชื่อม 120 A .....48
3.15	ผลจากการตรวจสอบ EDS line scanning ของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่กระแสไฟในการเชื่อม 120 A ..... 49
3.16	ชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณถัดจากบ่อหลอมอะลูมิเนียมในกรการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี .....50
3.17	แผนภูมิสมมูลของระบบเหล็กกับสังกะสี .....52
3.18	แผนภาพจำลองวิธีการวัดความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะ.....53
3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนในการเชื่อมกับความกว้างของบ่อหลอมและความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย .....54
3.20	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนในการเชื่อมกับความกว้างของบ่อหลอมและความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี .....55
3.21	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมกับความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะและความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียม .....56
3.22	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมและความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม .....57
3.23	ลักษณะผิวรอยเชื่อมภายหลังทดสอบแรงดึง-เดือน (กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 140 A) .....59
3.24	ภาพถ่ายการเดินทางของรอยแตกภายหลังทดสอบแรงดึงเดือนของชิ้นงานเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย .....60
3.25	ภาพถ่ายพื้นผิวการแตกหักภายหลังทดสอบแรงดึงเดือนของชิ้นงานเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี .....61
4.1	แสดงตัวอย่างรางเบาะเลื่อนรถยนต์ .....65
4.2	แสดงภาพขณะและการจุ่มแช่ชิ้นงานเชื่อมในสารละลายเกลือ .....68
4.3	ลักษณะของชิ้นงานทดสอบความล้า .....69
4.4	เครื่องทดสอบความล้า INSTRON 8801 .....70
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงเดือนกับเวลาในการจุ่มแช่สารละลายเกลือของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม ..... 71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	72
4.7	73
4.8	73
4.9	74
4.10	75
4.11	76
4.12	77
4.13	78
4.14	80
4.15	80

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงสมบัติของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียม.....	14
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะพื้น .....	37
3.2 สมบัติเชิงกลของโลหะพื้น .....	37
4.1 แสดงสถานะการทดสอบความล้าของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณี.....	70



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

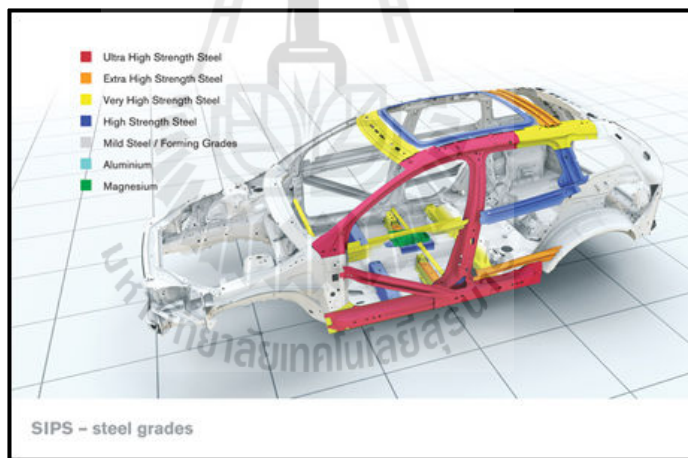
$X$	=	ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
$K$	=	ค่าคงที่ของการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Kinetic constants)
$t$	=	เวลาในการแพร่
$K_0$	=	ค่าคงที่ของการเกิดการแพร่
$Q$	=	พลังงานกระตุ้นให้เกิดการแพร่
$R$	=	ค่าคงที่ของก๊าซ
$T$	=	อุณหภูมิขณะเกิดการแพร่
$A$	=	มุมระหว่างเหล็กแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเมื่อถูกดึง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

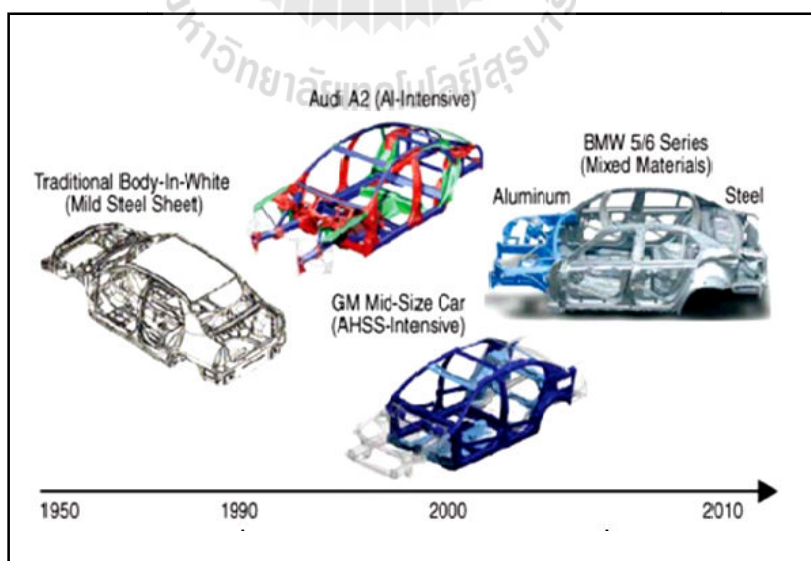
ปัจจุบันในอุตสาหกรรมยานยนต์มีการนำโลหะแผ่นมาประกอบเป็นโครงสร้างตัวถังรถยนต์เพื่อลดน้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ลงซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการขับขี่ ซึ่งโลหะแผ่นที่นำมาใช้ผลิตเป็นโครงสร้างรถยนต์มากที่สุดคือเหล็กกล้าเกรดต่างๆที่มีความแข็งแรงแตกต่างกันสำหรับการจะเลือกใช้เหล็กกล้าเกรดใดในตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างรถยนต์ขึ้นอยู่กับประโยชน์และความปลอดภัยของผู้ขับขี่ที่จะได้รับจากการเลือกใช้เหล็กกล้าเกรดต่างๆ



รูปที่ 1.1 การเลือกใช้เหล็กกล้าในการประกอบโครงสร้างรถยนต์ Volvo's XC60

จากรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าบริเวณ โครงสร้างตัวถังของรถยนต์ด้านหน้า ช่วงล่าง แก้มข้าง และ โครงสร้างตัวถังรถยนต์ด้านหลัง มีการเลือกใช้เหล็กกล้าละมุน (Mild steel) ที่มีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 400-600MPa ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่ในตำแหน่งเหล่านี้จำเป็นต้องออกแบบให้มีการเสียรูปง่ายที่สุดเพื่อลดแรงที่จะส่งต่อกว่าคือเมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำต่อชิ้นส่วนในตำแหน่งเหล่านี้ อันเนื่องมาจากเกิดอุบัติเหตุหรือเกิดการชน (Collision) ชิ้นส่วนเหล่านี้จะได้อำนาจที่ดูดซับพลังงานและโมเมนตัมที่จะส่งผ่านมายังผู้ขับขี่หรือให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้ผู้ขับขี่เป็น

ตัวกลางในการดูดซับพลังงานและได้รับอันตรายน้อยที่สุด โครงสร้างหลักที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือ โครงสร้างห้องผู้โดยสารซึ่งผู้ผลิตยานยนต์มักผลิตจากเหล็กเกรดที่มีความแข็งแรงสูงมากมีความหนากว่าโครงสร้างส่วนอื่นเพราะประกอบด้วยหลายชิ้นกว่าส่วนอื่นๆเนื่องจากเมื่อเกิดการชน โครงสร้างส่วนนี้จะต้องเกิดการเสียรูปน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้ผู้โดยสารเกิดอันตรายสำหรับ โครงสร้างของรถยนต์ส่วนสุดท้ายคือ โครงแชสซีนั้นผู้ผลิตยานยนต์มักเลือกใช้เหล็กกล้าเกรดที่มีความแข็งแรงสูงเพราะ โครงแชสซีจะต้องสามารถรองรับแรงกดกระแทกเนื่องจากการใช้งานหนักในแต่ละวันได้ดีและต้องมีความแข็งแรงทนทานต่องานบรรทุกหนักและวิ่งบนเส้นทางที่ขรุขระได้อย่างไร้ปัญหา ซึ่งแชสซีนั้นเปรียบเสมือนกระดูกสันหลังของรถยนต์เลยทีเดียวที่ได้การออกแบบ โครงสร้างแชสซีจะออกแบบให้โครงสร้างแชสซีในส่วนหน้าและท้ายให้มีการเสียรูปเมื่อเกิดการชนน้อยกว่าส่วนของห้องโดยสารเพื่อไม่ให้โครงสร้างแชสซีในส่วนของห้องโดยสารเกิดความเสียหาย อย่างไรก็ตามด้วยวิกฤตด้านพลังงานในปัจจุบันที่รุนแรงขึ้นทำให้อุตสาหกรรมผลิตยานยนต์จำเป็นต้องหาวิธีลดน้ำหนัก โครงสร้างตัวถังรถยนต์ลงอีก หนึ่งในวิธีการที่ผู้ผลิตรถยนต์นำมาใช้ในการประกอบโครงสร้างตัวถังรถยนต์เพื่อลดน้ำหนักลง คือ การนำเอาโลหะแผ่นนอกกลุ่มเหล็กที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงเมื่อเทียบกับน้ำหนักสูง โดยเฉพาะ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นมาประกอบเป็นโครงสร้างตัวถังรถยนต์ร่วมกับเหล็กกล้าแผ่น ดังรูปที่ 1.2 ที่แสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการของวัสดุที่นำมาประกอบเป็นโครงสร้างรถยนต์และแนวโน้มการใช้อะลูมิเนียมผสมเข้ามาผลิตเป็น โครงสร้างรถยนต์ร่วมกับเหล็กกล้านั้นมากขึ้น



รูปที่ 1.2 วิวัฒนาการของวัสดุที่นำมาผลิต โครงสร้างตัวถังรถยนต์

เมื่อมีการใช้เหล็กกล้าแผ่นร่วมกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นในการผลิตเป็นโครงสร้างตัวถังรถยนต์ทำให้ในการประกอบโครงสร้างรถยนต์ผู้ผลิตรถยนต์ไม่สามารถหลีกเลี่ยงจุดเชื่อมต่อของโลหะต่างชนิดทั้งสองได้ ด้วยเหตุนี้ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาวิจัยการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นกันอย่างแพร่หลายอาทิเช่นงานวิจัยของ Katayama และคณะที่ทำการศึกษการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นพบว่าการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นระหว่างเหล็กกล้ากับอะลูมิเนียม บริเวณรอยเชื่อมซึ่งชั้นสารประกอบเชิงโลหะดังกล่าวมีสมบัติที่เปราะและแตกง่าย ทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่ำ (Katayama, S., 2002) และอีกหลายการศึกษาต่อมาที่ทำให้เราสามารถทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมได้สำเร็จไม่ว่าจะเป็น การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยวิธีการ Friction stir welding (Takehiko Watanabe และคณะ, 2006) การศึกษการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมแบบเลเซอร์ (Borrisutthekul, R. et al., 2007) หรือ การศึกษการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบแก๊สทังสเตนอาร์คเวลดิ่ง (ภูษิต มิตรสุมหวัง และคณะ, 2009) เป็นต้น

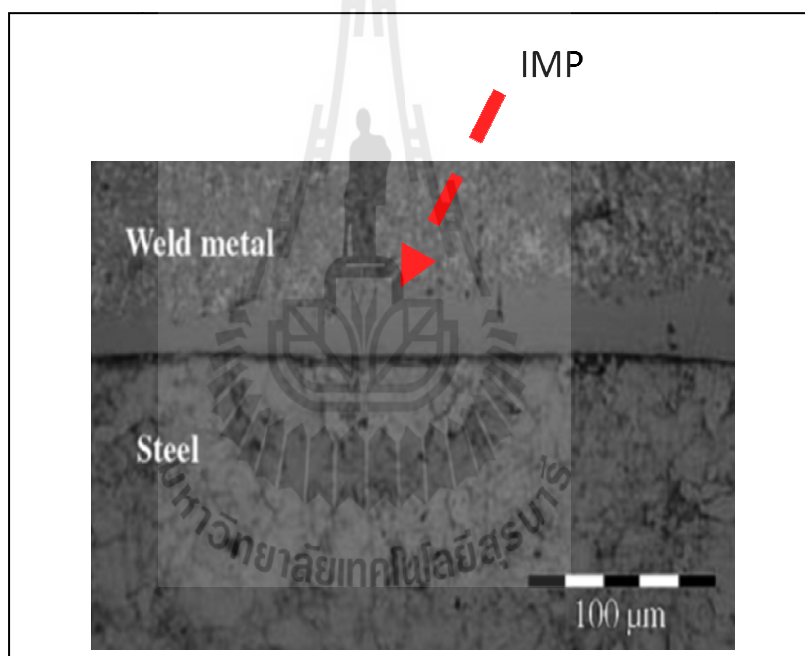


รูปที่ 1.3 ชั้นส่วนรถยนต์ที่เกิดสนิม

แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานเหล็กกล้าแผ่นเปลือยในการผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ร่วมกับอะลูมิเนียม นั้นไม่สามารถตอบโจทย์การใช้งานของชิ้นส่วนรถยนต์ได้ทั้งหมดเนื่องจากความหลากหลายของสภาพแวดล้อมในการใช้งานที่ทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่ผลิตขึ้นจากเหล็กกล้าแผ่นเปลือยสั้นเพราะเกิดการกัดกร่อน เช่น สภาพบรรยากาศที่ติดทะเลหรือในบริเวณที่มีฝนตกบ่อย ถนนที่มีน้ำขังที่รถยนต์มีโอกาสสัมผัสกับน้ำบ่อยครั้งในขณะที่ใช้งานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และแน่นอนว่าการใช้งานรถยนต์ในสภาวะที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมดังกล่าวนี้จะส่งผลให้ชิ้นส่วนรถยนต์เกิดการ



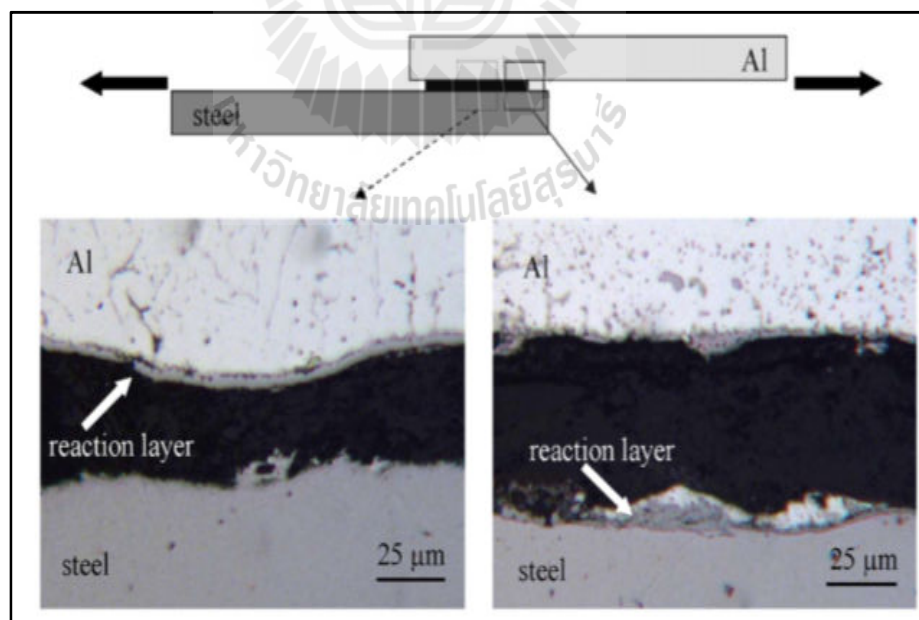
กัดกร่อนได้ง่าย เช่น สนิมที่เกิดขึ้นบริเวณช่วงล่างรถยนต์ บริเวณแก้มข้างประตูรถยนต์ที่สัมผัส น้ำ ดิน โคลน ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนบริเวณนั้นๆสั้นลง จึงทำให้ผู้ผลิต ชิ้นส่วนยานยนต์ไม่สามารถใช้เหล็กกล้าแผ่นเปลือยอย่างเดียวได้เมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นที่ ชิ้นส่วนรถยนต์ที่ประกอบด้วยจากเหล็กกล้าแผ่นเปลือยนั้นๆทำให้มีการนำเอาเหล็กกล้าแผ่นเคลือบ ผิวด้วยสังกะสีหรือที่รู้จักในชื่อ Galvanized steel มาผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ร่วมกับโลหะผสม อะลูมิเนียมแทนเหล็กกล้าแผ่นเปลือยเพื่อยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนรถยนต์ในส่วนที่มีโอกาส สูงในการสัมผัสบรรยากาศที่เอื้อให้เกิดการกัดกร่อนและทำให้เกิดการกัดกร่อนได้เร็วขึ้นเนื่องจาก เหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (Galvanized steel) มีสมบัติที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่า เหล็กกล้าแผ่นเปลือย



รูปที่ 1.4แสดงชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างอินเทอร์เฟซของ Steel และ weld metals

แต่ทว่าการศึกษาการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นเพื่อศึกษาผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อคุณภาพของรอยเชื่อมนั้นมี อย่างจำกัด เช่นการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่าง เหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับอะลูมิเนียมเกรด 1060 ด้วยกระบวนการเชื่อม MIG (H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He and H. Hackl, 2007) และภายหลังจากที่ Zhang และคณะได้ทำการตรวจสอบโครงสร้าง จุลภาคในแนวตัดขวางรอยเชื่อมพบว่ามีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นระหว่างรอยต่อ

เหล็กกล้ากับบริเวณเนื้อเชื่อม ทำให้เกิดการเชื่อมติด ดังแสดงในรูปที่ 1.4 โดยที่ความหนาและ ส่วนผสมของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนในการเชื่อม และยังได้ รายงานไว้ด้วยว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้เป็นจุดอ่อนแอของรอยเชื่อมเนื่องจาก ภายหลังจากการทดสอบแรงดึงชิ้นงานเชื่อมเกิดการขาดที่บริเวณกระแทกร้อนของอะลูมิเนียมแต่ อย่างไรก็ตามจากรายงานการศึกษาของ Zhang และคณะนี้ไม่ได้มีการกล่าวถึงอิทธิพลของชั้น สังกะสีต่อโครงสร้างจุลภาคหรือสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมแต่อย่างใด ต่อมาในปี 2008G. Sierra และคณะ ได้ศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น Galvanized steel กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วย กระบวนการเชื่อม GTAW (G. Sierra et al., 2008)ซึ่งจากผลการทดลอง G. Sierraและคณะได้รายงาน ว่ามีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นที่บริเวณ Reaction Layer และเมื่อนำชิ้นงานเชื่อม ไปทดสอบแรงดึงพบว่าการเกิดการแตกขาดขึ้นบริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ซึ่งภายหลังได้ทำการตรวจสอบประเภทของสารประกอบเชิงโลหะนี้ และ พบว่าเป็นสารประกอบเชิงโลหะประเภท FeAlSiZn เห็นได้จากรายงานดังกล่าวไม่มีการยืนยันผล ของชั้นสังกะสีต่อคุณภาพรอยเชื่อมอย่างชัดเจน และเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงอิทธิพลของชั้น ดังกล่าวให้ดีขึ้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสม อะลูมิเนียมแผ่นนี้ขึ้น



รูปที่ 1.5 ลักษณะของการแตกหักเสียหายบริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ภายหลังจากการทดสอบแรงดึง

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาผลของชั้นสังกะสีที่เคลือบบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับ โลหะผสมอะลูมิเนียม

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

1) ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมชั้นเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็กกล้า น่าจะมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานเชื่อมในทั้งในแง่ของโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อมและสมบัติเชิงกลของการเชื่อม กล่าวคือขณะเชื่อมชั้นสังกะสีน่าจะละลายลงในบ่อหลอมอะลูมิเนียมด้วยความหนาแน่นของสังกะสีที่มากกว่าอะลูมิเนียมน่าจะ ทำให้ชั้นสังกะสีที่ละลายผสมเข้ากับอะลูมิเนียมจมลงด้านล่างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมและด้วยการไหลของน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมไม่น่าจะดีพอเพราะการเย็นตัวของงานเชื่อมค่อนข้างเร็วอาจทำให้การผสมของอะลูมิเนียมกับสังกะสีเกิดความไม่สม่ำเสมอได้สำหรับในแง่ของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อมน่าจะควบคุมให้ได้คุณภาพคงที่ ณ สภาวะการเชื่อมหนึ่งยกขึ้น

2) การมีอยู่ของชั้นสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นน่าจะทำให้บริเวณการเชื่อมติดของชิ้นงานเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมกว้างกว่าชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียม เพราะว่าชั้นสังกะสีที่เคลือบบนแผ่นเหล็กกล้า นั้นมีจุดหลอมตัวต่ำ และเมื่อให้ความร้อนในการเชื่อมสังกะสีจะเกิดการละลายก่อนแล้วเหนียวนำไปห่ออะลูมิเนียมละลายผสม

3) เมื่อนำชิ้นงานทั้งไว้ที่สภาวะเกิดการกัดกร่อนเป็นระยะเวลาานอาจจะทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อมไม่ว่าเหล็กกล้าที่นำมาเชื่อมจะเป็นแผ่นเปลือยหรือแผ่นเคลือบสังกะสีต่ำลง และจากสมมติฐานข้อที่ 1) เนื่องจากผู้วิจัยคาดว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมอาจส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อมหลังทั้งไว้ในสภาวะเกิดการกัดกร่อนน่าจะ ไม่คงที่รุนแรงขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการต้านทานต่อความล้าของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีน่าจะให้ ความสามารถทนต่อความล้าได้ต่ำกว่า

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในการศึกษาอิทธิพลของชั้นเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมนี้ จะทำการศึกษากการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมแผ่นอลูมิเนียมเกรด 5052 เท่านั้นและกระบวนการ

เชื่อมที่เลือกใช้ในการศึกษานี้ คือ กระบวนการเชื่อมทั้งสแตนอาร์คร่วมกับเทคนิคการบัดกรีแข็งด้วยตัวเอง (Self-Brazing Technique) ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมแผ่นอะลูมิเนียม 5052 ความหนา 1 มิลลิเมตร ที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อนาที ด้วยกระแสไฟต่างๆ ควบคุมที่ปริมาณความร้อนลงสู่ชิ้นงานในช่วงประมาณ 18-28 กิโลจูลโดยลักษณะการจัดวางชิ้นงานเชื่อมจะวางในลักษณะซ้อนเกยให้เหล็กกล้าแผ่นวางไว้ด้านบน ขณะเชื่อมต้องควบคุมการหลอมตัวของเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีให้เกิดการหลอมเพียงบางส่วนเพื่ออำนวยความสะดวกในการเป็ยกของอะลูมิเนียมผสมบนเหล็กกล้าแผ่น ทั้งนี้ในการทดลองจะทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยที่มีส่วนผสมทางเคมีเดียวกันกับเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมแผ่นอะลูมิเนียม 5052 ที่สภาวะเดียวกัน เพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบผล ภายหลังกการเชื่อมจะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ร่วมกับ EDS เพื่อศึกษาลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นและบ่งชนิดของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นได้ แล้วนำผลที่ได้ไปศึกษาวิเคราะห์ถึงผลของชั้นเคลือบต่อลักษณะรอยเชื่อมติดหลังจากนั้นทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเฉือนหลังการทิ้งไว้ในสภาวะที่เกิดการกัดกร่อนสูงและทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อความล้าของชิ้นงานเชื่อมเท่านั้น

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจถึงอิทธิพลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำต่อคุณภาพของรอยเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับ โลหะผสมอะลูมิเนียม
- 2) รู้ถึงลักษณะการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นแตกต่างกันระหว่างชิ้นงานเชื่อมที่ใช้เหล็กเคลือบสังกะสี และชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าที่ปราศจากชั้นเคลือบสังกะสี

## 1.6 รายการอ้างอิง

- Patrick Waurzyniak (2009), Advanced Materials in Automotive, **Manufacturing Engineering magazine** [on-line], Available: <http://www.sme.org/MEMagazine/Article>.
- Simona (2009), 2010 Mercedes E-Class Coupe [on-line], Available: <http://www.topspeed.com/cars/Mercedes/2010>, Access on 27/10/2014.
- A.I. Taub, P.E. Krajewski, A.A. Luo, and J.N. Owens (2007), The Evolution of Technology for Materials Processing the Automotive Example, **JOM**, February 2007, pp.48-57.
- Katayama, S. (2002). Dissimilar materials joining by laser. **Welding Technology**. (50-2): 69-73

- 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
- ภูษิต มิตรสมหวัง, รัตนบริสุทธิกุล, ศิริรัตน์ รัตนจันทร์ และ โยชิฮารุ มูโต (2552), การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอะลูมิเนียมผสมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมทิก, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552, จังหวัดเชียงใหม่
- รัตนบริสุทธิกุล, สุกิจ พอใจ, อำไพศรี ไหวพริบ, อุบลวรรณ ว่องกิตติพงษ์ และ ชิตพงศ์ สารปริง (2555), ผลของแท่งโลหะรองหลังงานเชื่อมต่อชิ้นงานโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียม, **วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 55**, มกราคม-เมษายน 2555, หน้า 12-17.
- ภูษิต มิตรสมหวัง และ รัตนบริสุทธิกุล (2553), อิทธิพลของตัวแปรงานเชื่อมต่อคุณภาพของรอยเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 5052-H32, **วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 52**, มกราคม-เมษายน 2553, หน้า 13-18
- ภูษิต มิตรสมหวัง และ รัตนบริสุทธิกุล (2551), การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับอะลูมิเนียมเกรด 5052, **วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 51**, กันยายน-ธันวาคม 2551, หน้า 21-25.
- M.J. Torkamany, S. Tahamtan, J. Sabbaghzadeh (2010), Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd:YAG pulsed laser, **Materials and Design 31(2010)**, pp.458–465.
- EmelTaban, Jerry E.Gould, John C.Lippold (2010), dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization, **Materials and Design 31(2010)**, pp.2305–2311.
- Takehiko Watanabe, Hirofumi Takayama, Atsushi Yanagisawa (2006), Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding, **Journal of Materials Processing Technology 178 (2006)**, pp. 42–349.
- Gerhard Liedl, Robert Bielaka, Julia Ivanova, Norbert Enzinger, Gunter Figner, Jürgen Bruckner, Haris Pasic, Milan Pudar, Stefan Hampel (2011), **Joining of Aluminum and Steel in Car Body Manufacturing, Physics Procedia 12 (2011)**, pp. 150–156.
- G. Sierra, P. Peyre, F. DeschauxBeaume, D. Stuart and G. Fras (2008). Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes, **Materials Characterization 59(2008)**, pp. 1705-1715.
- F. Haddadi, D. Strong and P.B. Prangnell (2012). Effect of Zinc Coating on Joint Properties and Interfacial Reactions in Aluminum to steel Ultrasonic Spot Welding, **JOM. Vol. 64No.3**, Published online March 2, 2012, pp. 407-413.

H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He and H. Hackl (2007). Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium-zinc-coated steel joint made by a modified metal inert gas welding-brazing process, **Materials Characterization** 58(2007), pp. 588-592.

LV Auto Import Co.,Ltd. (2011), **หลักในการบำรุงรักษารถยนต์ (Part I)**, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย [ออนไลน์], แหล่งที่มา : <http://lv-autoimport.blogspot.com/2011>.

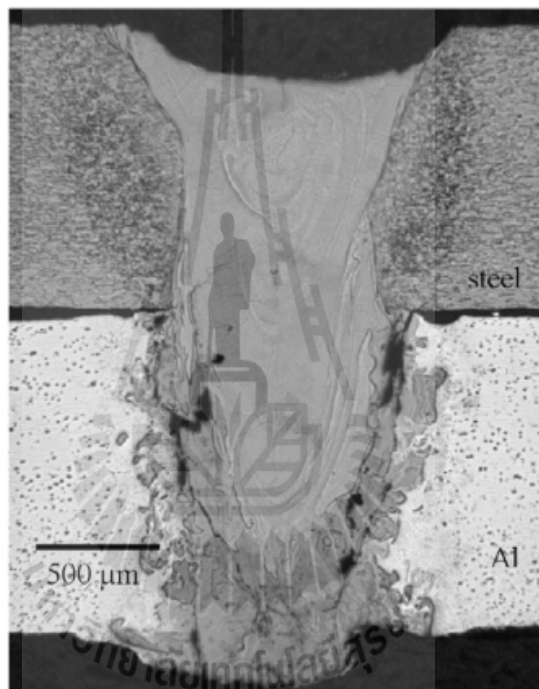
Rust Don't come.....รู้จัก ป้องกัน “สนิม”, **offroadmagazine** (2014), กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย [ออนไลน์], แหล่งที่มา:<http://www.grandprix.co.th/offroadmagazine/rust-dont-come>.



## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

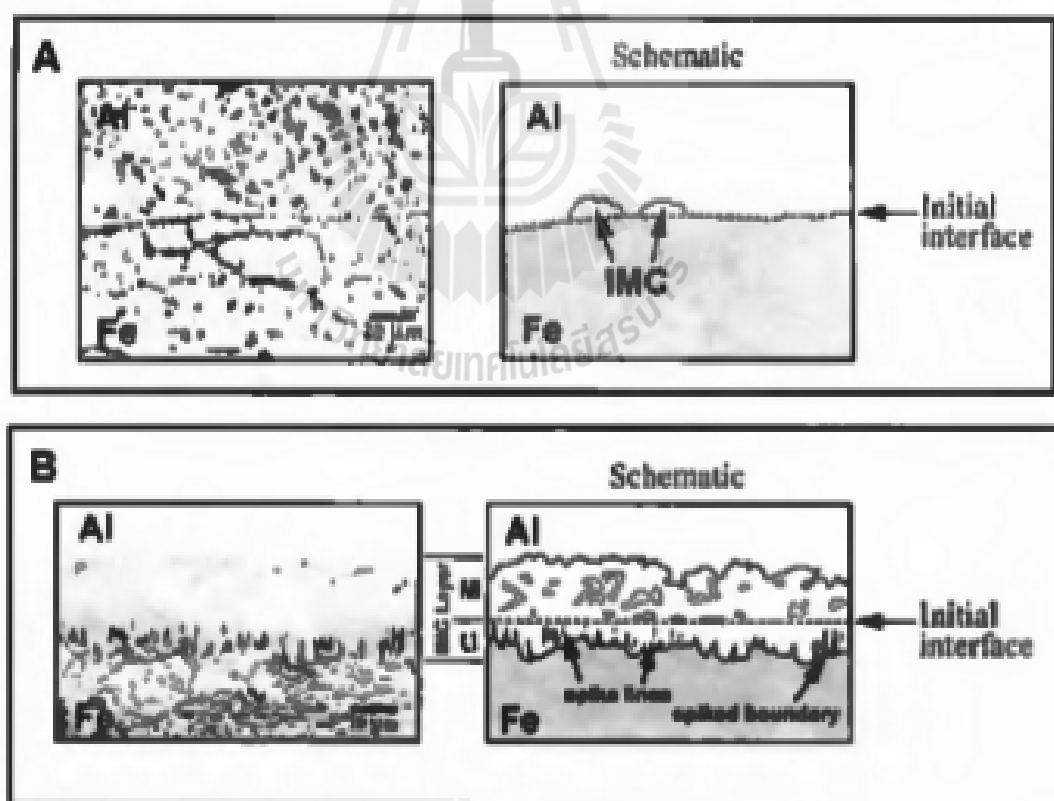
#### 2.1 การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น



รูปที่ 2.1 เทคนิคการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding)

ในช่วง 20 ปี ที่ผ่านมามีการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมอย่างมาก โดยแรกเริ่มการศึกษาการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นทำโดยอาศัยการหลอมละลายรวมกันของโลหะทั้งสอง หรือที่รู้จักกันในนามของเทคนิคการเชื่อมแบบหลอมผสม (Fusion welding) ซึ่งในการเชื่อมโดยอาศัยเทคนิคการเชื่อมแบบการหลอมผสม (Fusion welding) รอยเชื่อมที่ได้ไม่สวยงามและยังเกิดสารประกอบเชิงโลหะจำนวนมาก (Intermetallic compound layers, IMP) ยังผลให้เกิดรอย

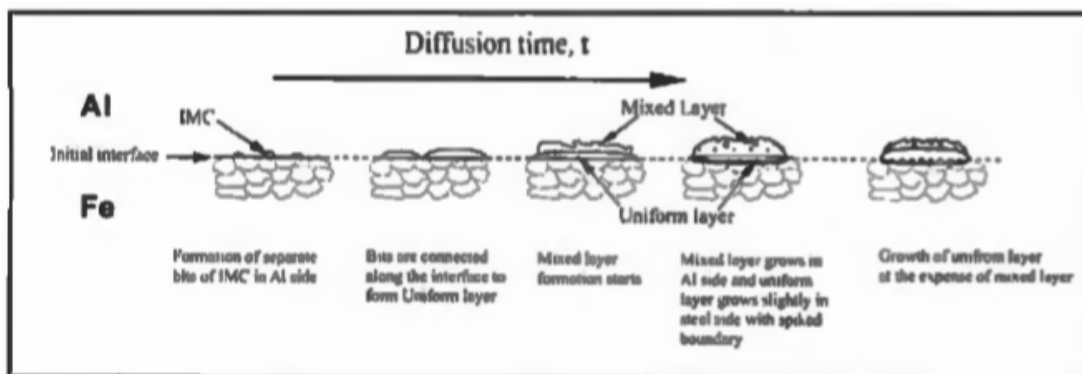
แตกขึ้นในรอยเชื่อมจำนวนมากหลังการเชื่อมติดดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.1(G. Sierra et al., 2007) และด้วยสมบัติของสารประกอบเชิงโลหะที่มีความแข็งและเปราะสูง(Yasuyama et al., 1996) ยังผลให้รอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นนักวิจัย จึงได้พยายามที่จะลดการเกิดสารประกอบเชิงโลหะเหล่านี้ลง โดยอาศัยเทคนิคที่สามารถทำการเชื่อมติดได้โดยไม่ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะทั้งสองหรือกล่าวอีกอย่างก็ทำให้ติดกัน โดยที่โลหะทั้งสองยังอยู่ในสถานะของแข็ง (Solid-Solid state) เช่น การเชื่อมด้วยวิธีการแพร่ (Diffusion welding) การเชื่อมโดยการกวนผสม(Friction stir welding) เป็นต้น โดยการเชื่อมด้วยวิธีการแพร่(Diffusion welding)อาศัยการแพร่ของโลหะทั้งสองชนิดในสถานะของแข็ง ณ อุณหภูมิสูงทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมระหว่างชั้นผิวสัมผัสของโลหะทั้งสอง (Interfacial layer) ที่มีปริมาณไม่มากและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในการเชื่อมจะขึ้นกับอุณหภูมิ(Holding temperature) และระยะเวลาในการแพร่ (Diffusion time) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3(M. J. RATHOD and M. KUTSUNA, 2004)



รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

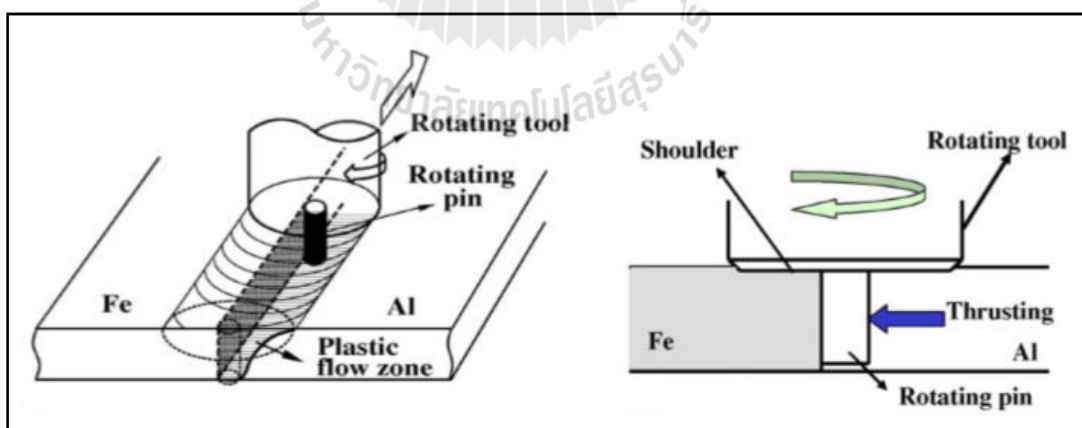
A) 823 K และ B) 873 K





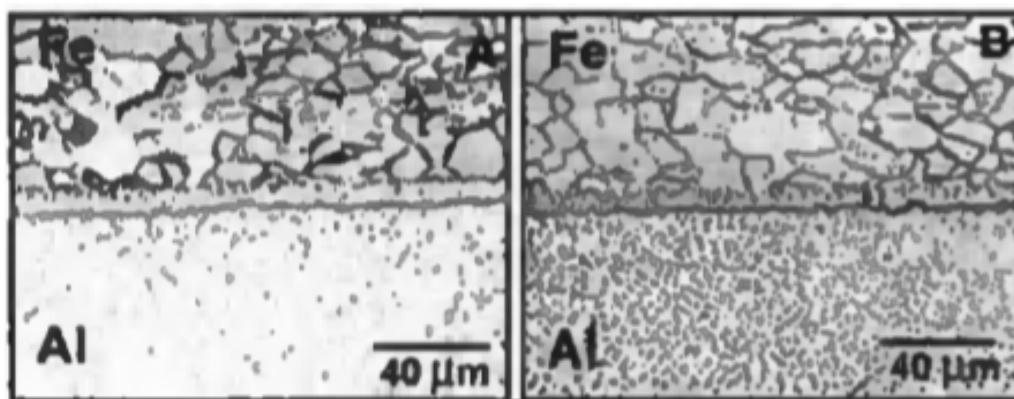
รูปที่ 2.3 การเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นกับเวลาในการแพร่

ส่วนการเชื่อมแบบกวนผสม (Friction stir welding) อาศัยการกวนให้เนื้อโลหะทั้งสองเกิดการผสมกันและเกิดการเชื่อมติด โดยที่การเชื่อมติดขึ้นกับความเร็วของ Rotating pin และความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของ Pin กับชิ้นงานเชื่อม ฯลฯ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (Takehiko Watanabe et al., 2006) แต่ด้วยการเชื่อมโดยใช้เทคนิคทั้งสองนี้เทคนิคแรกต้องใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานเพื่อให้เกิดการแพร่ ส่วนเทคนิคที่สองจะสามารถเชื่อมได้ดีเฉพาะโลหะที่อ่อนนุ่มและการก่อดังนั้นทำนายนยาก ดังนั้นในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมด้วยการเชื่อมทั้งสองแบบจึงไม่เป็นที่นิยมหรือนำมาใช้ในการเชื่อมจริง



รูปที่ 2.4 การจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม ด้วยกระบวนการเชื่อม Friction Stir Welding

ในขณะที่มีการพัฒนาการเชื่อมในสถานะของแข็งนั้นก็มีการพัฒนาเทคนิคการบัดกรีแข็งและได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมหรือที่รู้จักในชื่อเทคนิคการบัดกรีแข็งด้วยโลหะพื้น (Self-brazing technique) โดยทำให้เกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วนและเกิดการเชื่อมติดระหว่างการทำปฏิกิริยาของของเหลวและของแข็ง โดยในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมจะอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมกับเหล็กกล้าที่อยู่ในสถานะของแข็งเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมและเกิดการเชื่อมติดขึ้นซึ่งในการเชื่อมด้วยเทคนิค Self-brazing นี้จะทำให้เราสามารถควบคุมการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ โดยที่การก่อตัวชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมและปริมาณความร้อนจะขึ้นกับความเร็วและความเข้มข้นของพลังงานความร้อนที่จ่ายให้กับชิ้นงานในการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.5 (M. J. RATHOD and M. KUTSUNA, 2004) ถ้าความเร็วในการเชื่อมต่ำปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมจะสูงสารประกอบเชิงโลหะจะเกิดได้มากขณะที่ถ้าความเร็วในการเชื่อมสูงปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมก็จะต่ำสารประกอบเชิงโลหะก็จะเกิดขึ้นได้น้อย เทคนิคการเชื่อมแบบอาศัยการบัดกรีแข็งด้วยโลหะพื้น (Self-brazing) จึงเป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์ในการเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดอย่างกว้างขวางนอกจากนี้ยังได้มีผู้ศึกษาว่าสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นประเภทใด จากการศึกษาเหล่านั้นพบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นด้วยกันสองเฟสคือ Fe-rich phase ประกอบไปด้วย  $Fe_3Al$  กับ  $FeAl$  และ Al-rich phase ที่ประกอบไปด้วย  $FeAl_3$  กับ  $Fe_2Al_3$  (Rathod et al., 2004) ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะแต่ละประเภทจะมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 2.1 (Das et al., 1994 and Yasuyama et al., 1996)



รูปที่ 2.5 ผลความเร็วในการเชื่อมต่อการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

A) 1.8 เมตร/นาที และ B) 2.0 เมตร/นาที

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียม

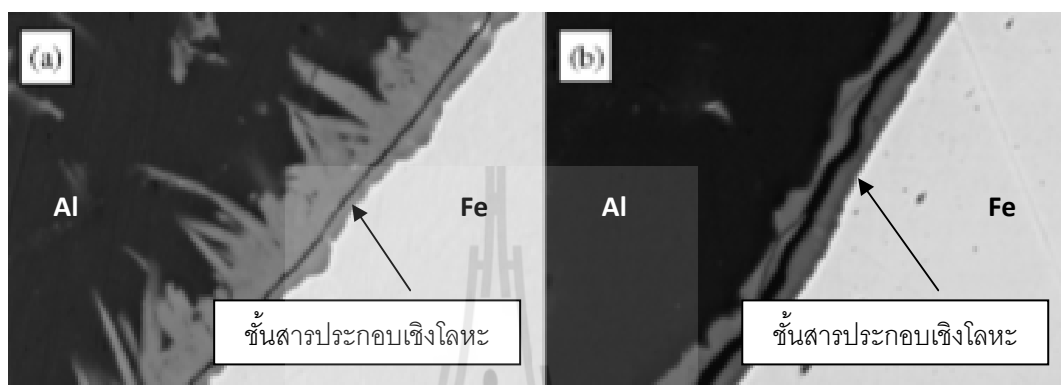
Table 1 — Composition and Crystal Structures of Intermetallic Compounds of Fe-Al			
Type of Intermetallic Compound	Wt-% of Fe	Pearson Symbol	Crystal Structure
Fe <sub>3</sub> Al	86.06	cF16	FCC
FeAl	67.31	cP8	Cubic
FeAl <sub>2</sub>	50.72	aP18	Triclinic-anorthic
Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	45.16	mP22	Monoclinic
FeAl <sub>3</sub>	40.70	mC102	BC monoclinic
FeAl <sub>6</sub> metastable	25.55	oC28	Orthorhombic
Fe <sub>2</sub> Al <sub>9</sub> metastable	31.39	mP22, D8 <sub>d</sub>	Monoclinic
FeAl <sub>x</sub> metastable	Unknown	Unknown	Unknown

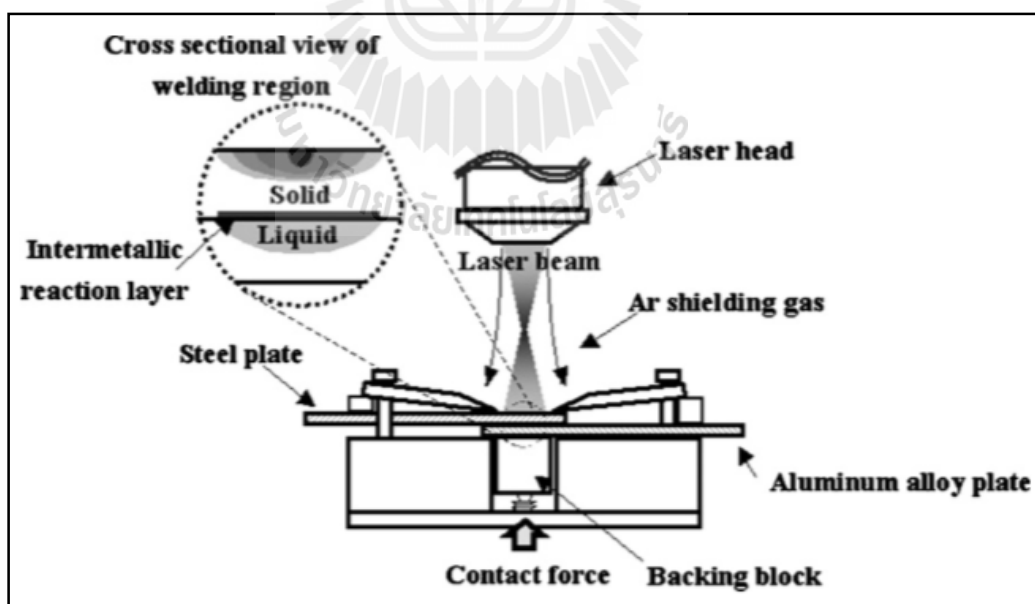
Table 2 — Mechanical Properties of Cast Fe-Al Intermetallic Compounds				
Type of Intermetallic Compound	Vickers Hardness (9.8 N)	Fracture Toughness K <sub>IC</sub> , MPa·m <sup>1/2</sup>	Compressive Strength, MPa	Compressive Strain, %
FeAl <sub>3</sub>	892	2.15	200	0.00
Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	1013	2.30	240	0.00
FeAl <sub>2</sub>	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown
FeAl	470	Unknown	670	0.45
Fe <sub>3</sub> Al	330	Unknown	560	0.80

จากสมบัติของสารประกอบเชิงโลหะในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าสารประกอบเชิงโลหะที่ให้ความแข็งแรงสูงสุดคือสารประกอบเชิงโลหะในกลุ่มของ Fe-rich phase ที่ประกอบไปด้วย Fe<sub>3</sub>Al และ FeAl แต่ด้วยการควบคุมการเกิดสารประกอบเชิงโลหะประเภท Fe-rich phase ขณะทำการเชื่อมนั้นสามารถทำได้ยากและจนถึงปัจจุบันยังไม่มีรายงานวิจัยใดที่สามารถควบคุมการเกิดสารประกอบเชิงโลหะประเภทนี้และในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคการบัดกรีแข็งด้วยโลหะพื้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมากก็ยังเป็นเฟส Al-rich phase คือ Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> phase ซึ่งมีความแข็งสูงและทำให้ความแข็งแรงของสารประกอบเชิงโลหะต่ำ รอยเชื่อมจึงมีความสามารถในการรับแรงได้ต่ำกว่ารอยเชื่อมที่สารประกอบเชิงโลหะประเภท Fe-rich phase อยู่นั่นเอง ดังนั้นสิ่งเดียวที่นักวิจัยทำได้เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมคือลดปริมาณการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะประเภท Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> โดยการลดความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ดังนั้นต่อมาจึงได้มีผู้วิจัยเพื่อยับยั้งการเกิดสารประกอบเชิงโลหะในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม (Rattana Borisutthekul et al., 2007) โดยการใส่แผ่นโลหะรองหลังในการเชื่อมจะทำให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดได้บางลงและกว้างมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีผู้วิจัยชนิดของลวดเชื่อมที่มี

ผลต่อการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะและพบว่าลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของซิลิกอน (Si) จะช่วยยับยั้งการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเนื่องจาก Si จะช่วยลดการแพร่ของเหล็กเข้าไปในรอยเชื่อมส่งผลให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และทำให้ความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมสูงขึ้น (Song et al., 2009)

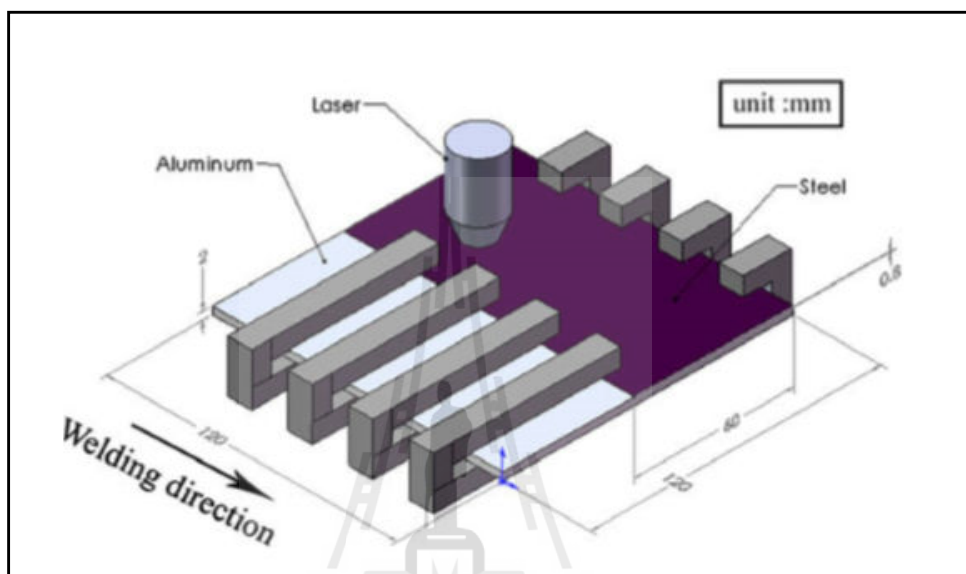


รูปที่ 2.6 ความหนาของ IMP เมื่อไม่ใช้ลวดเชื่อมที่ไม่มี/และมีส่วนผสมของ Si  
A) ไม่มีซิลิกอน และ B) ใช้ลวดเชื่อมที่มีซิลิกอน 4.43-9.84%Si

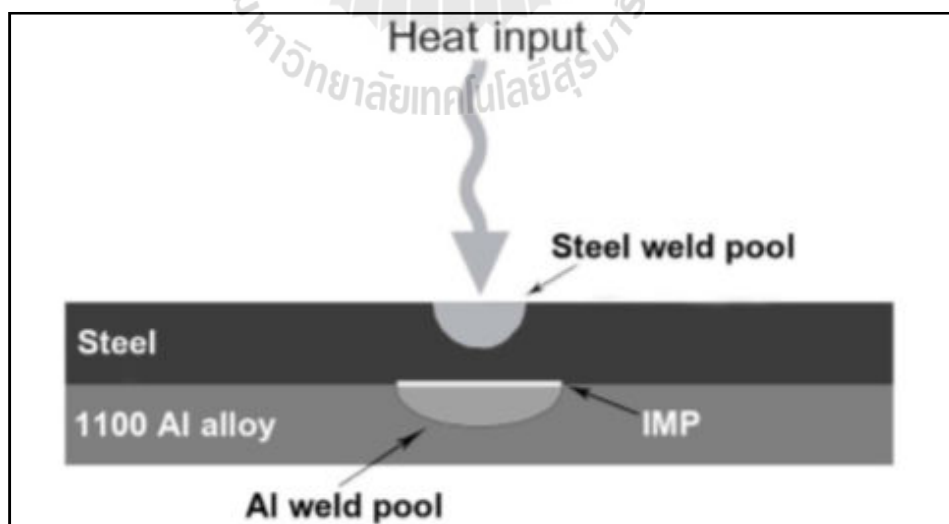


รูปที่ 2.7 การจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม  
ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์

ด้วยการเชื่อมด้วยเทคนิคบัดกรีแข็งด้วยโลหะพื้นนี้เป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อนจึงสามารถใช้ได้กับกระบวนการเชื่อมที่หลากหลาย เช่น การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ โดยลักษณะการจัดวางชิ้นงานเชื่อมและการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 2.7 (RattanaBorisutthekul et al., 2007)



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงการจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมของเหล็กกล้ากับอะลูมิเนียมผสม



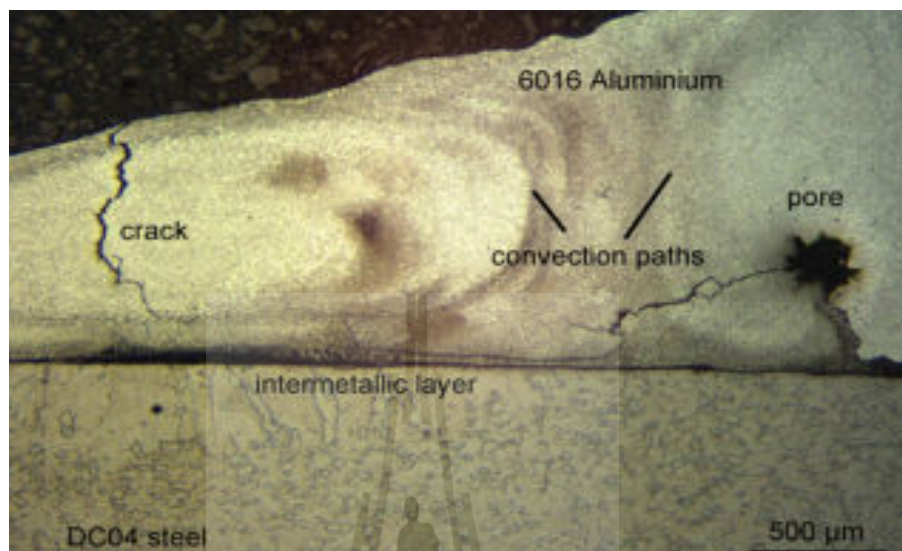
รูปที่ 2.9 แผนภาพการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1100-H12

หรือการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 5754 ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd: YAG pulsed laser ซึ่งทำการเชื่อมแบบซ้อนเกยของเหล็กกล้าและอะลูมิเนียม ซึ่งลักษณะการจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 2.8 (M.J. Torkamany, S. Tahamtan and J. Sabbaghzadeh, 2010) หรือการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 1100-H12 ด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดึงดังแสดงในรูปที่ 2.9(ภูษิตมิตรสมหวังและคณะ, 2009)หรือการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบแก๊สเมทอลอาร์คเวลดึงและแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดึง(Cao et al., 2013, Gatzten et al., 2014 )เป็นต้น

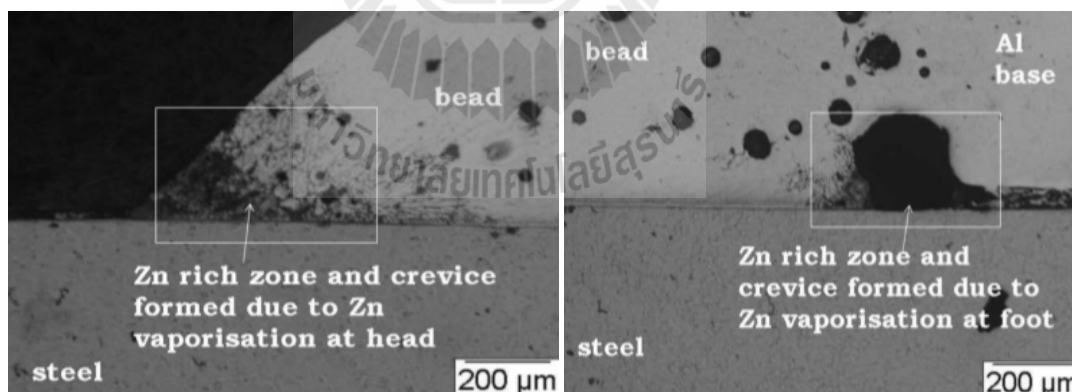
## 2.2 การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (Galvanized steel) กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

จากเนื้อหาก่อนหน้านี้ทำให้ทราบกันดีแล้วว่าการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นมีการนำเอาเทคนิคการเชื่อมแบบบัดกรีแข็งด้วยโลหะพื้น (Self-brazing) มาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดสองชนิดนี้ให้ผลการเชื่อมที่ดี ดังนั้นเมื่อมีความพยายามเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมจึงได้มีความพยายามที่จะนำเอาเทคนิคการเชื่อมแบบเดียวกันนี้มาใช้ผ่านกระบวนการเชื่อมหลากหลายและมีการค้นพบปรากฏการณ์ต่างๆมากมาย เช่น การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (Galvanized steel) กับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์แบบที่มีการเติมเนื้อลวดเชื่อมพบโพรงก๊าซของสังกะสีเนื่องจากการระเหยเป็นไอของชั้นสังกะสีที่เคลือบบนเหล็กกล้าแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (P. Peyre et al., 2007) และโพรงก๊าซนั้นจะพบมากในบริเวณขอบนอกสุดของเนื้อเชื่อมซึ่งขณะเชื่อมมีอุณหภูมิต่ำกว่ากลางเนื้อเชื่อมนอกจากนี้ยังพบว่ามีการเกิด Zn Rich zone ซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบของเหล็ก อะลูมิเนียมและสังกะสีในบริเวณดังกล่าวด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.11(Krishma et al., 2014) แต่ในรายงานวิจัยของ Peyre และ Krishma ไม่กล่าวถึงผลของ Zn rich zone และโพรงอากาศที่เกิดขึ้นว่ามีผลต่อเสถียรภาพของรอยเชื่อมทั้งที่การเกิดโพรงอากาศนี้น่าจะเป็นข้อบกพร่องที่ทำให้รอยเชื่อมที่มีความสามารถในการรับแรงต่ำลงแต่กลับพบว่ารอยเชื่อมในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมจะสามารถรับแรงได้สูงกว่ากรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยเช่นเดียวกับการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบแก๊สเมทอลอาร์คเวลดึงและแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดึง (Cao et al., 2013, Gatzten et al., 2014 ) โดย Cao และ Gatzten ได้เสนอว่าการเกิด Zn rich zone และโพรงอากาศจากไอระเหยของสังกะสีไม่ทำให้ความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมต่ำลง เนื่องจากการมีชั้นเคลือบสังกะสีอยู่นั้นในการเชื่อมจะทำให้เกิดเป็ยกเกิดได้มากกว่าการที่ไม่มีชั้นเคลือบสังกะสีอยู่และทำให้รอยเชื่อมติดกว้างกว่านั่นเอง ซึ่งขัดแย้งกับการ

รายงานของ Honggang Dong ที่เสนอว่าการเกิด Zinc rich zone นั้นทำให้รอยเชื่อมมีความสามารถในการรับแรงต่ำลง (Honggang Dong et al., 2012)



รูปที่ 2.10 โพรงอากาศที่เกิดจากไอระเหยของสังกะสีในการเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์

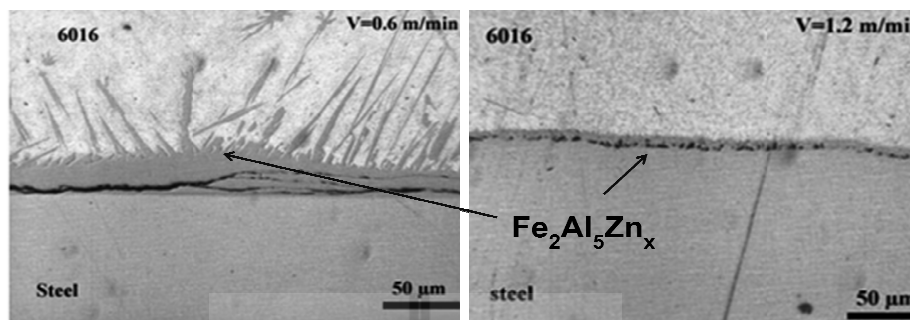


รูปที่ 2.11 โพรงอากาศที่เกิดจากไอระเหยของสังกะสีเกิดมากบริเวณขอบเนื้อเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์

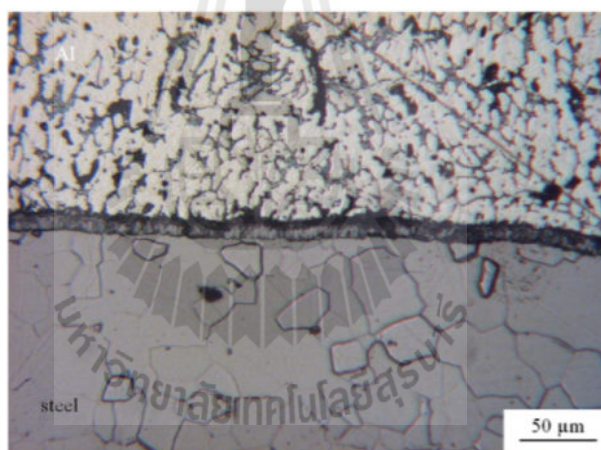
นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยต่อการเชื่อมติดระหว่างผิวสัมผัสของเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับเนื้อเชื่อมอะลูมิเนียมพบสารประกอบเชิงโลหะที่ก่อตัวขึ้นเป็นประเภท  $Fe_2Al_3$  ที่มี Zn ผสมอยู่ด้วย ดังรูปที่ 2.12 (P. Peyre et al., 2007) และความหนาของชั้น



สารประกอบเชิงโลหะนี้จะลดลงเมื่อความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้นหรือปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมต่ำลง(P. Peyre et al., 2007, Shao et al.,2014)



รูปที่ 2.12 ผลของความเร็วในการเชื่อมต่อลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์



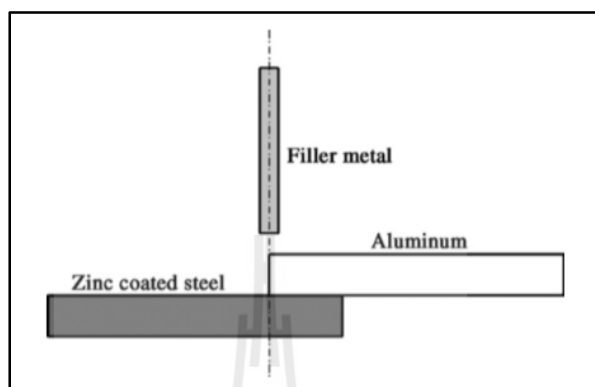
รูปที่ 2.13 ลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการเชื่อมแบบแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดิ่ง

เช่นเดียวกับการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดิ่งที่พบสารประกอบเชิงโลหะประเภทเดียวกันดังรูปที่ 2.13(G. Sierra et al., 2008)และพบอีกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีความหนามากขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมสูงขึ้น

นอกจากนี้แล้วยังได้มีนักวิจัยยังพยายามใช้กระบวนการเชื่อมและเทคโนโลยีต่างๆมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสม



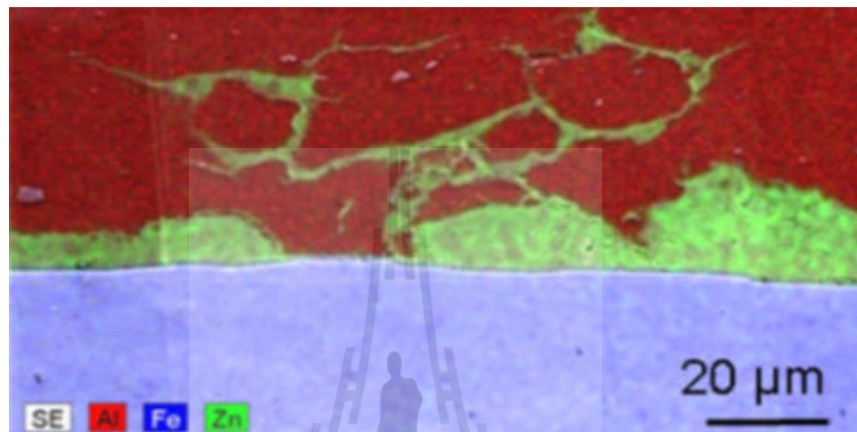
อะลูมิเนียม เช่น การเชื่อมโลหะผสมอะลูมิเนียมกับเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีด้วยกระบวนการเชื่อม Modified metal inert gas (H.T. Zhang et al., 2007)การจัดวางชิ้นงานเชื่อมและการเชื่อมแสดงดังรูปที่ 2.14 (H.T. Zhang et al., 2007)



รูปที่ 2.14 การจัดวางชิ้นงานและการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม MIG

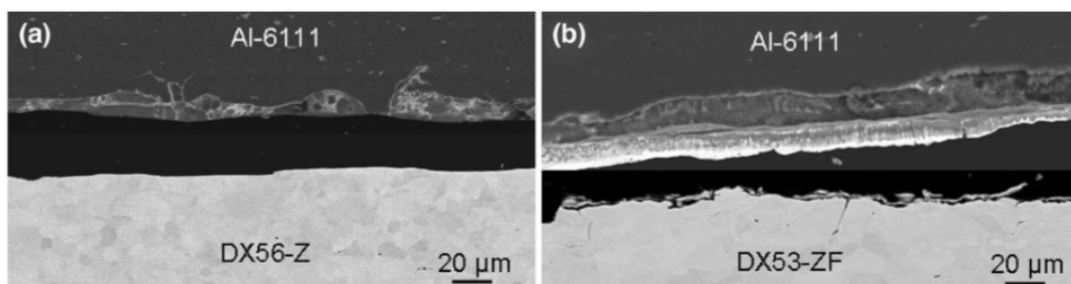
หรือจะเป็นการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อม Ultrasonic Spot Welding (F. Haddadi et al., 2012) เพื่อศึกษาชนิดของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อสมบัติของรอยเชื่อมและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสด้านใน โดยได้ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยกันสองเกรดคือ DX56-Z (Hot-dipped zinc coated steel) และ DX53-ZF (Galvannealed zinc coated steel) กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด Al6111-T4 จากการศึกษาของHaddadiและคณะพบว่าชั้นเคลือบสังกะสีของเหล็ก DX56-Z ประกอบไปด้วย  $\eta$ (Zn-Fe) และ  $Fe_5Al_{5-x}Zn_x$  และชั้นเคลือบสังกะสีของเหล็กเกรด DX53-ZF ประกอบไปด้วย  $FeZn_{13}$ ,  $FeZn_{10}$ ,  $Fe_5Zn_{21}$  และ  $Fe_3Zn_{10}$  ซึ่งแต่ละเฟสในชั้นเคลือบสังกะสีนั้นขึ้นกับกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีนั้นๆ โดยในการเชื่อมกระทำการโดยการจัดวางชิ้นงานเชื่อมในลักษณะซ้อนเกย จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการพบว่าทั้งสองชั้นเคลือบมีการแพร่กระจายของสังกะสีหรือชั้นเคลือบดังกล่าวเข้าไปในโลหะพื้นอะลูมิเนียมก่อตัวเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.15(F. Haddadi et al., 2012) แต่ลักษณะการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของลักษณะของชั้นเคลือบและพบว่าเหล็กกล้า DX53-ZF ชั้นเคลือบประกอบไปด้วยเหล็กและสังกะสีนั้นมีความเปราะสูงและมีอุณหภูมิในการหลอมตัวสูงกว่าชั้นเคลือบของ DX56-Z ที่ประกอบไปด้วย เหล็ก สังกะสีและอะลูมิเนียมที่มีจุด

หลอมตัวต่ำกว่า การที่มีจุดหลอมตัวของชั้นเคลือบสูงจะต้องใช้เวลาในการเชื่อมมากขึ้นจึงจะได้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงขึ้น แต่ในขณะที่ชั้นเคลือบที่มีจุดหลอมตัวต่ำชั้นเคลือบเกิดการหลอมละลายได้อย่างรวดเร็วและสามารถแทรกซึมเข้าไปยังอะลูมิเนียมได้ง่ายแสดงให้เห็นว่าจุดหลอมเหลวของชั้นเคลือบเองมีผลต่อการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการแพร่ของชั้นเคลือบสังกะสีเข้าสู่โลหะพื้นอะลูมิเนียม

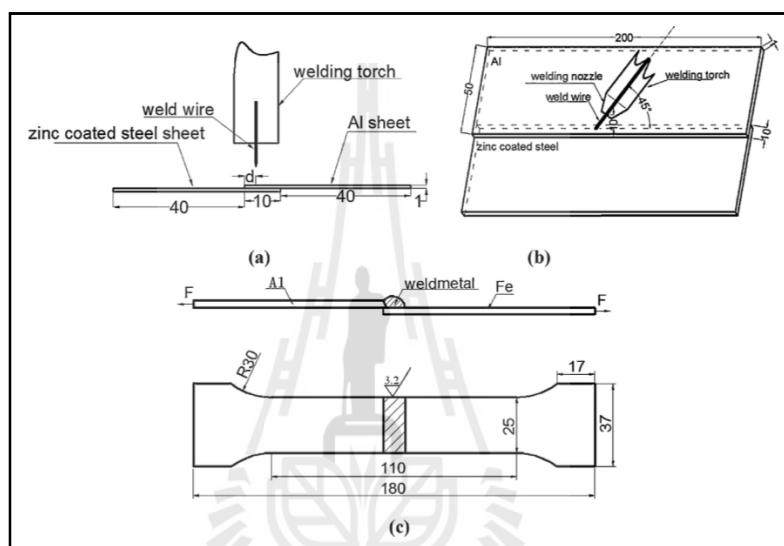
และภายหลังจากที่ Haddadi ได้ทำการทดสอบแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมสามารถต้านทานแรงดึงเฉือน (Shear strength) พบว่าชิ้นงานเกิดการขาดตามแนวการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างผิวสัมผัสการเชื่อมติดของเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นดังแสดงในรูปที่ 2.16(F. Haddadi et al., 2012)



รูปที่ 2.16 ลักษณะการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะแผ่นอะลูมิเนียมผสมภายหลังการทดสอบแรงดึง

a) DX56-Z และ b) DX53-ZF

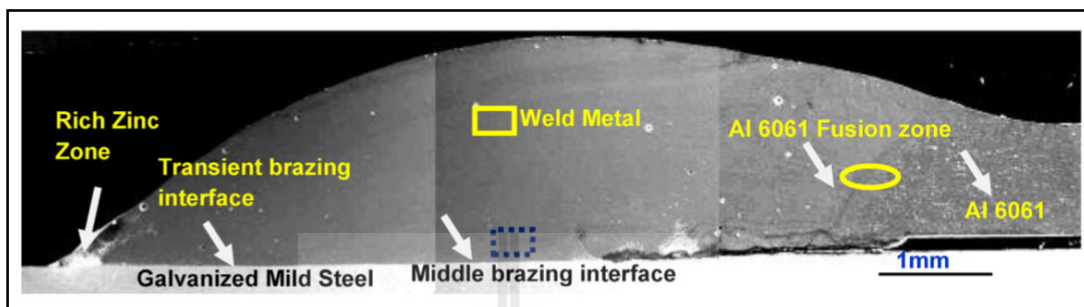
หรือจะเป็นการเชื่อมของโลหะผสมอะลูมิเนียมกับเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบเลเซอร์ของ Gerhard Liedl และคณะในปี 2011 ที่ทำการจัดวางชิ้นงานเชื่อมอยู่ด้วยกันสองแบบ คือแบบต่อชนและแบบซ้อนเกยและจากผลการทดลอง Gerhard Liedl ได้เสนอว่าการนำกระบวนการเชื่อมเลเซอร์มาใช้ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียม ทั้งแบบต่อชนและซ้อนเกยนั้น จะทำให้เกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะแคบลงและมีความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะต่ำกว่า 10 ไมครอน



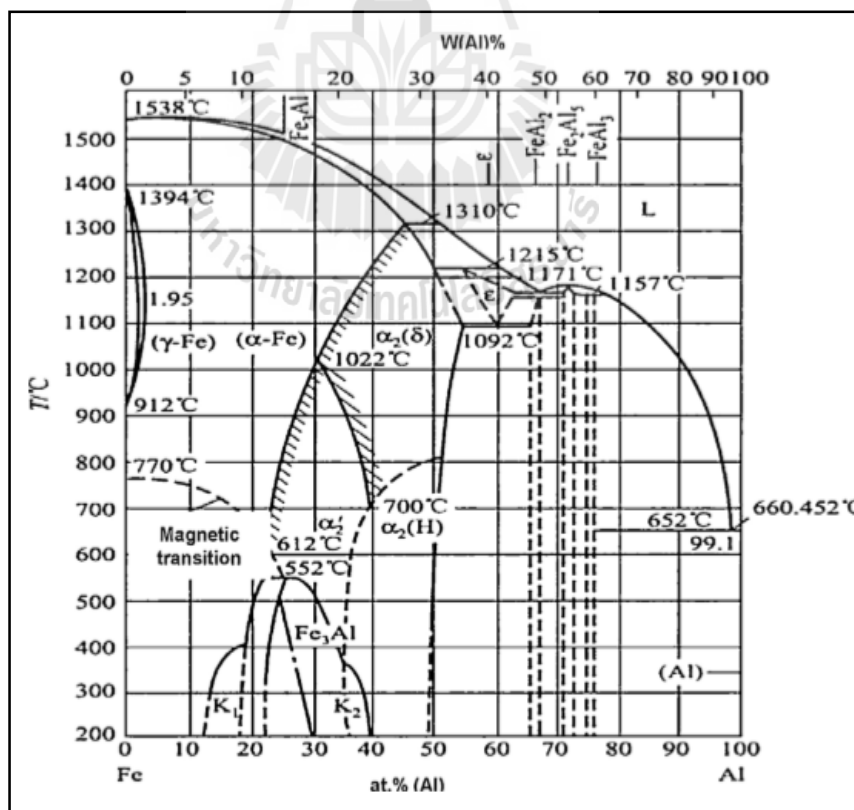
รูปที่ 2.17 แสดงการจัดวางชิ้นงานเชื่อมและการเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี Q235 กับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม Cold Metal Transfer (CMT)

นอกจากนี้แล้วยังมีการศึกษาชนิดของลวดเชื่อมที่เติมลงไปในงานเชื่อมของ Cao และคณะในปี ค.ศ. 2013 ซึ่งทำการเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี Q235 กับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม Cold metal transfer (CMT) โดยอาศัยเทคนิคการบัดกรีแข็งร่วมด้วย ในการเชื่อมจะใช้ลวดเชื่อม Al4043 (Al-Si) ที่ความเร็วในการเติมเนื้อลวดเชื่อมอยู่ในช่วง 4-6 เมตรต่อนาทีและใช้แก๊สอาร์กอนในการปกคลุมรอยเชื่อม ซึ่งลักษณะการจัดวางชิ้นงานเชื่อมและการเชื่อมในลักษณะซ้อนเกยแสดงในรูปที่ 2.17 (Cao et al., 2013) โดยให้โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะแผ่นบนและเมื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อมจะพบว่าสามารถแบ่งออกเป็น 7 บริเวณด้วยกัน คือ บริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี (Galvanized Mild Steel) บริเวณโลหะพื้นอะลูมิเนียม (Al6061 base) บริเวณโลหะอะลูมิเนียม

หลอมเหลว (Al6061 Fusion zone) บริเวณโลหะเชื่อม (Weld metal) บริเวณ Transient brazing interface บริเวณ Rich Zinc Zone ที่ขอบนอกสุดของเนื้อเชื่อมและบริเวณ Middle brazing interface ดังรูปที่ 2.18 (Cao et al., 2013)

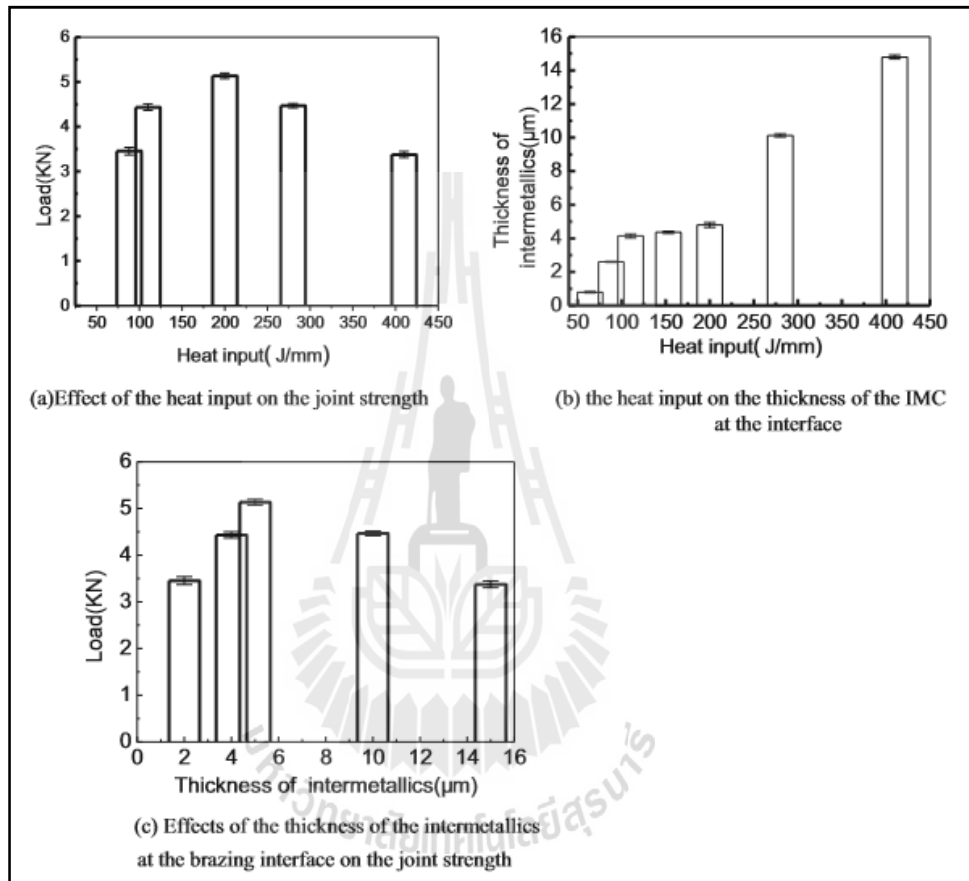


รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี Q235 กับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม Cold metal transfer (CMT)



รูปที่ 2.19 แผนภูมิสมดุลของระบบเหล็ก-อะลูมิเนียม

หลังจากCao และคณะทำการวิเคราะห์เนื้อเชื่อมด้วย SEM ร่วมกับ EDS เพื่อตรวจสอบหาปริมาณธาตุและประเภทของสารประกอบที่เกิดขึ้นในบริเวณต่างๆ โดยอาศัยแผนภูมิสมมูลของระบบเหล็กและอะลูมิเนียม (Fe-Al phase diagram) ในรูปที่ 2.19 (Guo et al., 2009) ในการบ่งประเภทของสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ



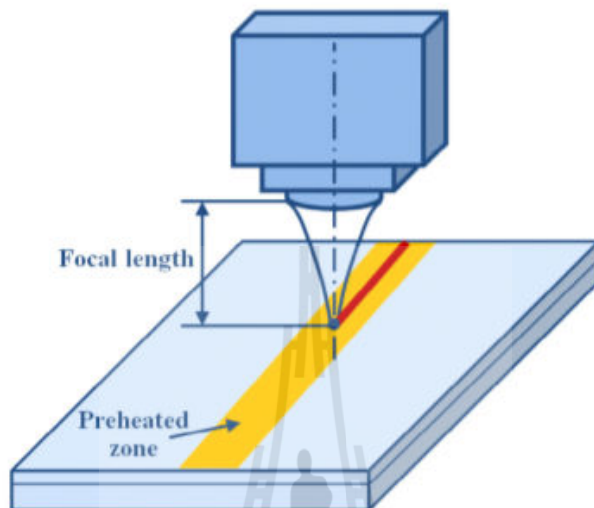
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของรอยเชื่อม ปริมาณความร้อนในการเชื่อมและความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของชิ้นงานเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี Q235 กับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม Cold metal transfer (CMT)

จากผลการทดลองของ Cao และคณะได้เสนอว่าการใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของSi ช่วยยับยั้งการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะ และให้ความหนาของสารประกอบเชิงโลหะบางกว่าการเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมที่ไม่มี Si อยู่ และยังได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อม ปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมและความ

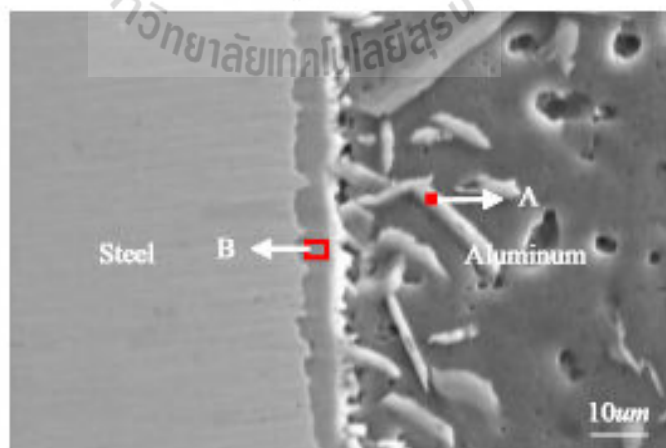
หนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของชิ้นงานเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี Q235 กับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม Cold metal transfer (CMT) ได้ว่าเมื่อปริมาณความร้อนในการเชื่อมสูงขึ้นความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมจะสูงขึ้นด้วยจนกระทั่งเมื่อปริมาณความร้อนในการเชื่อมสูงเกิน 200J/mm ความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมจะลดลงและเมื่อปริมาณความร้อนที่สูงขึ้นงานในการเชื่อมสูงขึ้นทำให้ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อแสดงความสัมพันธ์ของความแข็งแรงของรอยเชื่อมกับความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะพบว่าเมื่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้นในช่วง 2-6 ไมครอน จะทำให้ความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะหนามากกว่า 6 ไมครอนกลับพบว่าความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมนั้นต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 2.20 (Cao et al., 2013) และรอยเชื่อมประกอบไปด้วย Weld metal, Aluminium heat-affected-zone, rich-zinc zone และ Brazing interface ระหว่าง weld metal และบริเวณที่ไม่เกิดการหลอมของ Galvanized mild steel เนื้อเชื่อมประกอบไปด้วย เฟสของ  $\alpha$ -Al solid solution, Al-Si second phase,  $\gamma$ -Fe solid solution สารประกอบเชิงโลหะประกอบไปด้วย  $Fe_3Al$  phase,  $FeAl_2$  phase,  $FeAl_3$  phase,  $Fe_2Al_5$  phase และ  $\alpha$ -Al+Si eutectic compound ที่ก่อตัวขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของ Galvanized steel- Brazing interface และ Weld metal นั้นเอง

จะเห็นได้ว่าตลอดเวลา 10 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมอย่างต่อเนื่องและล่าสุดในปี 2014 Junjie Ma และคณะได้ทำการศึกษาศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีความแข็งแรงสูง (High strength dual phase steel DP590) กับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด AA6061 ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า Two-pass laser welding โดยจัดวางชิ้นงานซ้อนกันและให้เหล็กกล้าเป็นโลหะแผ่นบน แล้วกราดแสงเลเซอร์ลงบนเหล็กกล้าแผ่นบนดังแสดงในรูปที่ 2.21 (Junjie Ma et al., 2014) จากผลการทดลองของ Junjie Ma พบว่าที่ปริมาณความร้อนในการเชื่อมต่ำและควบคุมความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ประมาณ 5 ไมครอน ความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมสูงนอกจากนี้สังกะสีที่ปรากฏในชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นสามารถปรับปรุงความแข็งแรงให้กับรอยเชื่อมอีกด้วย และในปีเดียวกันนั้น Shao และคณะได้ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (Galvanized steel) กับโลหะอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม Pulsed double electrode gas metal arc (Pulsed DE-GMA) welding brazing และภายหลังการเชื่อม Shao ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับอะลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 2.22 (Shao et al., 2014) และเมื่อทำการ

วิเคราะห์ด้วย EDS analysis พบว่าพื้นที่สารประกอบเชิงโลหะในตำแหน่ง A และ B ประกอบไปด้วย  $\text{FeAl}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  ตามลำดับ โดยที่  $\text{FeAl}_3$  ที่ก่อตัวในลักษณะแพร่เข้าไปยังเนื้อโลหะอะลูมิเนียม และมีลักษณะคล้ายเข็มแหลมและ  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  ก่อตัวเป็นแถบอยู่ใกล้กับเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี



รูปที่ 2.21 แสดงการวางชิ้นงานและการเชื่อมเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีความแข็งแรงสูงกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด AA6061 ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า Two-pass laser welding

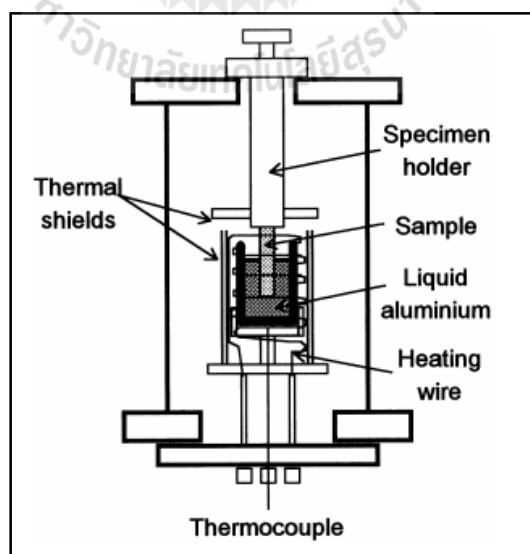


รูปที่ 2.22 EDS analysis ของรอยเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (Galvanized steel) กับโลหะอะลูมิเนียม

### 2.3 ลักษณะการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม

ในการศึกษาการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมรัตน และ Kobayashi ได้เสนอว่าชั้นสารประกอบเชิงที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม นั้น เกิดขึ้นจากการที่โลหะผสมอะลูมิเนียมเกิดการหลอมเหลวและทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าแผ่นที่อยู่ในสถานะของแข็ง (Solid state) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้คือปฏิกิริยา การแพร่รวมของอะตอมเหล็กกับอะตอมอะลูมิเนียม (Borrisutthekul, R. et al., 2007; Kobayashi, S. and Yakou T., 2001) และชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมติดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยที่การศึกษาการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแบ่งออกเป็น การศึกษารูปร่างประเภทของสารประกอบเชิงโลหะ และการศึกษาการโตของสารประกอบเชิงโลหะ

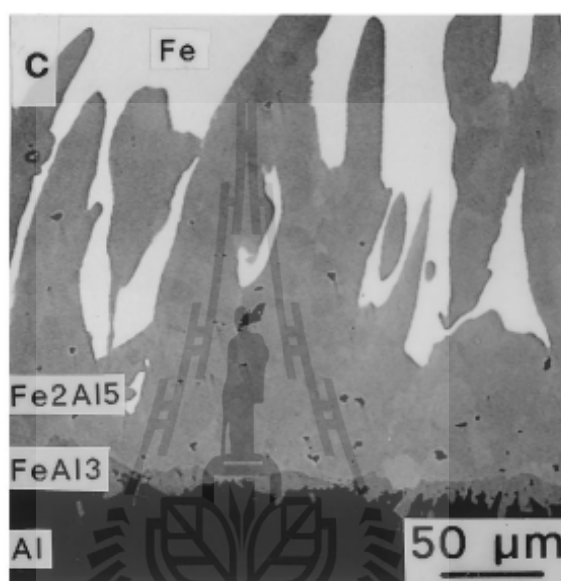
การศึกษารูปร่างและประเภทของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound layers, IMP) ระหว่างเหล็กในสถานะของแข็งและอะลูมิเนียมหลอมเหลวของ Bouche และคณะในปี 1998 โดยใช้การทดสอบที่เรียกว่า Immersion test หรือการทดสอบแบบจุ่ม โดยทำการจุ่มชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าลงไปในบ่ออะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (Bouche et al., 1998)



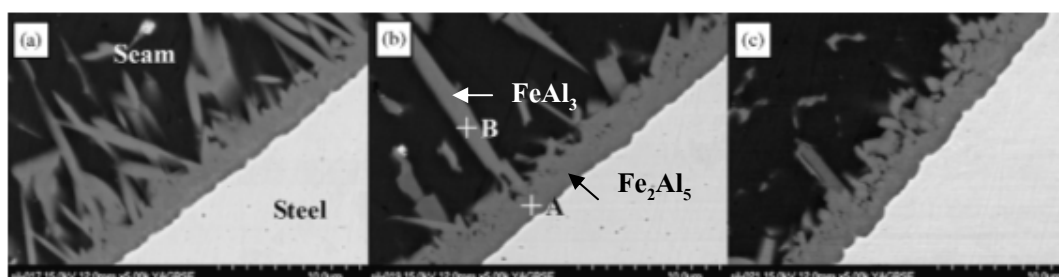
รูปที่ 2.23 แสดงการทดสอบแบบจุ่ม (Immersion test)



โดยจากผลการทดลองของ Bouche พบว่ามีชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของเหล็กที่อยู่ในสถานะของแข็ง (Solid steel) กับโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวและประกอบไปด้วย  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  phase และ  $\text{FeAl}_3$  phase ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (Bouche et al., 1998) ซึ่งประเภทของสารประกอบเชิงโลหะที่ได้ระบุโดยใช้แผนภูมิสมดุลของระบบเหล็ก-อะลูมิเนียม (Fe-Al binary phase diagram)

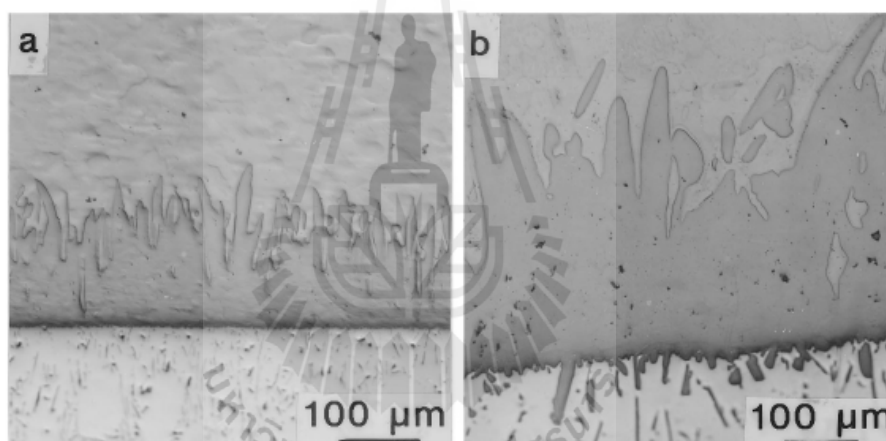


รูปที่ 2.24 ลักษณะรูปร่างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กที่อยู่ในสถานะของแข็งกับอะลูมิเนียมหลอมเหลว



รูปที่ 2.25 ลักษณะรูปร่างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม

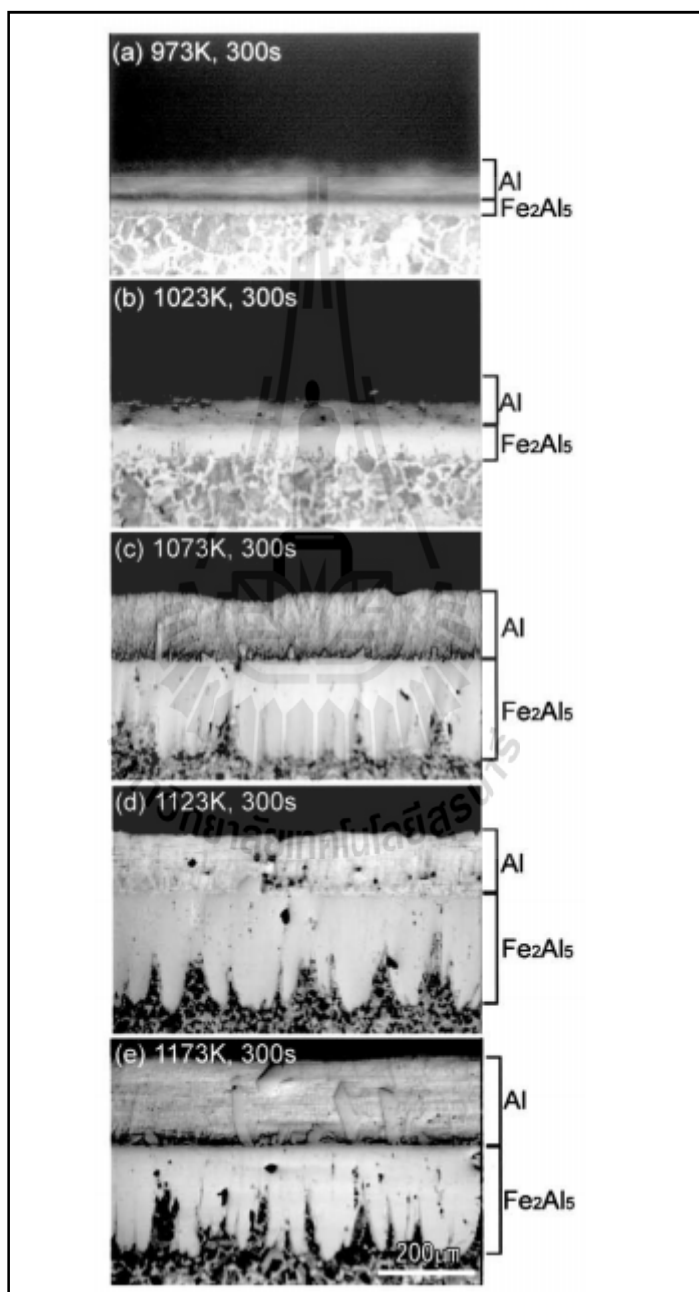
$Fe_2Al_5$  สารประกอบเชิงโลหะประเภทนี้จะเกิดขึ้นฝั่งที่ติดกับเหล็กและมีทิศทางการเกิดเข้ามายังเนื้อพื้นของเหล็กกล้า โดยมีลักษณะคล้ายลิ้นและมีพื้นที่การก่อตัวขาดลอกการติดกันระหว่างเหล็กกล้ากับอะลูมิเนียม ในการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียมมักพบการก่อตัวของ  $Fe_2Al_5$  เป็นแถบและเกิดอย่างสม่ำเสมอตลอดการเชื่อมติดดังแสดงในรูปที่ 2.25 (Song et al., 2009) ส่วน  $FeAl_3$  จะเกิดฝั่งที่ติดกับอะลูมิเนียมหลอมเหลว โดยมีทิศทางกระจายเข้าสู่โลหะพื้นอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเขตติดต่อระหว่างการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวนั่นเอง (Boucheet al., 1998) ซึ่งในการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมสารประกอบเชิงโลหะประเภทนี้จะเกิดขึ้นจะมีรูปร่างเป็นเข็มบางบริเวณคล้ายกับเม็ดข้าวและมีทิศทางเข้าสู่โลหะพื้นดังรูปที่ 2.22 (Shao et al., 2014) เช่นเดียวกันกับการทดสอบแบบจุ่มแต่ในการเชื่อม  $FeAl_3$  จะสามารถเกิดได้มากกว่าและเกิดไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.26 การก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กที่อยู่สถานะของแข็งกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับเวลาในการจุ่มแช่  
a) 30 วินาที b) 30 นาที

การศึกษาการโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วย พบว่าการโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้น หากใช้การเชื่อมด้วยวิธีการแพร่ (Diffusion welding) การโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะขึ้นกับเวลาในการแพร่ และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการแพร่ กล่าวคือ ถ้าเวลาในการแพร่มาก สารประกอบเชิงโลหะสามารถเกิดและโตได้มากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.26 (Boucheet al., 1998) และถ้าให้อุณหภูมิสูงขึ้น การแพร่จะเกิดได้ง่ายขึ้นและสารประกอบเชิงโลหะสามารถเกิดและโตได้มากเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.27 (Shigeaki Kobayashi et al., 2002) หรือจะเป็นการเชื่อม

โดยอาศัยเทคนิคการบัดกรีแข็งด้วยโลหะพื้นเองการโตของสารประกอบเชิงโลหะขึ้นกับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม โดยถ้าปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมสูงการเกิดสารประกอบเชิงโลหะจะสามารถเกิดได้มากและส่งผลให้สารประกอบเชิงโลหะมีความหนาเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 2.27 การก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมเชื่อมกับอุณหภูมิในการจุ่มแช่เหล็กในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่เวลาในการจุ่มแช่เท่ากัน

นอกจากนี้รัตน์ และคณะ และ Kobayashi และคณะ ได้ประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นกับเวลาที่เกิดการแพร่ในรูปของสมการดังสมการที่ 2.1(Borrisutthekul, R. et al., 2007; Kobayashi, S. and Yakou T., 2001)

$$X = K\sqrt{t} \quad (2.1)$$

โดยที่ $X$	คือ ความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ
$K$	คือ ค่าคงที่ของการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ(Kinetic constants)
$t$	คือ เวลาในการแพร่

โดยค่า  $K$  ในสมการที่ 2.1 ยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$K = K_0 \exp \sqrt{-\frac{Q}{RT}} \quad (2.2)$$

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

## 2.4 รายการอ้างอิง

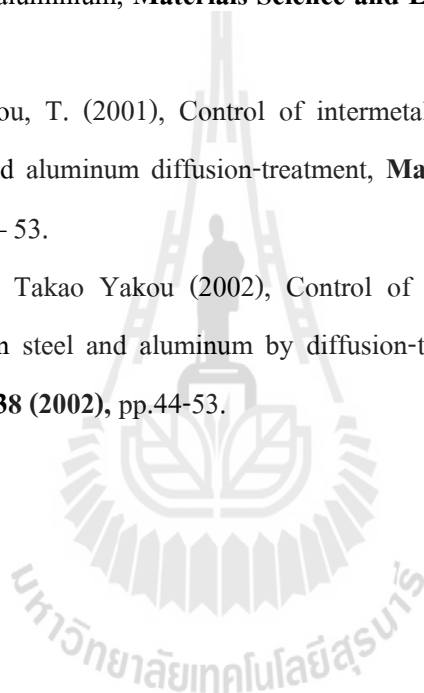
M. J. RATHOD and M. KUTSUNA (2004), Joining of aluminium alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding, **WELDING RESEARCH**, January 2004, pp.16-26.

Takehiko Watanabe, Hirofumi Takayama and Atsushi Yanagisawa (2006), Joining of Aluminium alloy to steel by friction stir welding, **Journal of Materials Processing Technology**, pp. 342-349.

RattanaBorrisutthekul, Taisei Yachi, Yukio Miyashita and Yoshiharu Mutoh (2007), Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminium alloy, **Materials Science & Engineering A (2007)**, pp.108-113.

- ภูษิต มิตรสมหวัง และ รัตน์บริสุททิกุล (2551), การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับ อะลูมิเนียมเกรด 5052, วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 51, กันยายน-ธันวาคม 2552, หน้า 21-25.
- ภูษิต มิตรสมหวัง, รัตน์บริสุททิกุล, ศิริรัตน์ รัตน์จันทร์ และโยชิฮารุ มูโด้ (2552), การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอะลูมิเนียมผสมแผ่นด้วย กระบวนการเชื่อมทิก, เอกสารการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552, AMM-006118.
- ภูษิต มิตรสมหวังและรัตน์บริสุททิกุล (2553), อิทธิพลของตัวแปรงานเชื่อมต่อคุณภาพของรอย เชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 5052-H32, วารสาร การเชื่อมไทย ฉบับที่ 52, มกราคม-เมษายน 2553, หน้า 13-18.
- M.J. Torkamany, S. Tahamtan and J. Sabbaghzadeh, (2010), Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminium alloy by Nd: YAG pulse laser, **Materials and design 31 (2010)**, pp. 458-465.
- รัตน์บริสุททิกุล, สุกิจ พอใจ, อำไพศรี ไหวพริบ, อุบลวรรณ ว่องกิตติพงษ์ และชิตติพงษ์ สารปริง (2555), ผลของแท่งโลหะรองหลังงานเชื่อมต่อชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่าง เหล็กกล้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียม, วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 55, มกราคม-เมษายน 2555, หน้า 12-17.
- H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He, H. Hackl (2007), Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium-zinc-coated steel joints made by modified metal inert gas welding-brazing process, **Materials Characterization 58 (2007)**, pp.588-592.
- G. Sierra, P. Peyre, F. DeschauxBeaume, D. Stuart and G. Fras (2008). Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes, **Materials Characterization 59(2008)**, pp. 1705-1715.
- F. Haddadi, D. Strong and P. B. Prangnell (2012), Effect of Zinc Coating on Joint Properties and Interfacial Reactions in Aluminium to Steel Ultrasonic Spot Welding, **JOM. Vol. 64 No. 3 (2012)**, pp. 407-413.
- R. Cao, Gang Yu, J. H. Chen, Pei-Chung Wang (2013), Cold metal transfer joining aluminium alloy-to-galvanized mild steel, **Journal of Materials Processing Technology 213(2013)**, pp.1753-1763.
- Cuo, Q. W., Wang, G. S., Guo, G. C. (2009), Binary alloy phase diagram of nonferrous metal. **Chemical industry press, Beijing.**

- Junjie Ma, MasoudHarooni, Blair Carlson, Radovan kovacevic (2014), Dissimilar joining of galvanized high strength steel to aluminium alloy in zero gap lap joint configuration by two-pass laser welding, **Materials and Design 58 (2014)**, pp. 390-401.
- L. Shao, Y. Shi, J.K. Huang, S.J. Wu (2014), Effect of joining parameter on microstructure of dissimilar metal joints between aluminium and galvanized steel, **Materials and Design (2014)**.
- K. Bouche, F. Barbier, A. Coulet, (1998), Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium, **Materials Science and Engineering A249 (1998)**, pp.167–175.
- 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)**, pp. 44 – 53.
- Shigeaki Kobayashi and Takao Yakou (2002), Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment, **Materials Science and Engineering A338 (2002)**, pp.44-53.



### บทที่ 3

## ผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

### 3.1 บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของชั้นสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์ค การทดสอบได้เลือกใช้การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 5052 และเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 5052 หนา 1.0 มิลลิเมตรเป็นวัสดุในการเชื่อม ในการเชื่อมชิ้นงานจะถูกวางในลักษณะซ้อนเกยให้เหล็กกล้าแผ่นวางไว้ด้านบนและให้ความเร็วในการเชื่อมคงที่ 0.60 เมตรต่อนาที จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ก่อตัวขึ้นในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียม นั้นจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวการเชื่อมติระหว่างเหล็กกล้ากับอะลูมิเนียม ขณะที่กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียม นั้นชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะที่ขอบของบ่อหลอมอะลูมิเนียม และชั้นสารประกอบเชิงโลหะนี้จะกว้างขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนลงสู่ชิ้นงานมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อนำชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณีไปทำการทดสอบแรงดึงจะพบว่าชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีที่มีชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอนั้นจะสามารถต้านทานต่อแรงดึงได้น้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบสังกะสีที่มีอยู่บนเหล็กกล้าแผ่นส่งผลทำให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะกระจายในโลหะพื้นอะลูมิเนียมไม่สม่ำเสมอนั้นจะทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่ำลง

### 3.2 บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตยานยนต์มีการนำโลหะแผ่นมาประกอบเป็น โครงสร้างตัวถังรถยนต์เพื่อลดน้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ลงซึ่งจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงของรถยนต์นั้นๆขึ้น สำหรับโลหะแผ่นที่นิยมนำมาประกอบโครงสร้างตัวถังรถยนต์นั้น ได้แก่ เหล็กกล้าแผ่น ส่วนโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นนั้นเริ่มนำมาใช้ประกอบเป็น โครงสร้างตัวถังรถยนต์เมื่อไม่นานมานี้ ดังนั้น

ในช่วง 10-20 ปีที่ผ่านมาจึงได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรดต่างๆด้วยกระบวนการเชื่อมต่างกันเพราะการประยุกต์ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมข้างต้น เช่น การศึกษาการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นพบว่าการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นระหว่างเหล็กกล้ากับอะลูมิเนียม ณ บริเวณรอยเชื่อมซึ่งชั้นสารประกอบเชิงโลหะดังกล่าวมีสมบัติที่เปราะและแตกง่ายทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่ำ (Katayama, S., 2002) การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมเกรด A5052 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการเชื่อม Laser roll welding (M. J. RATHOD and M. KUTSUNA, 2004) การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 5754 ด้วยกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ชนิด Nd: YAG pulsed laser (M.J. Torkamany, S. Tahamtan and J. Sabbaghzadeh, 2010) การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบเลเซอร์ (Borrisutthekul, R. et al., 2007) การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอะลูมิเนียมผสมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อม Frictions stir welding (Takehiko Watanabe et al., 2006) การเชื่อมเหล็กกล้า 1018 กับโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061-T4 ด้วยกระบวนการเชื่อม Friction welding (E.Taban et al., 2010) และการศึกษาการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบแก๊สทั้งสแตนเลสอาร์คเวลดิง (ภูษิต มิตรสมหวัง และคณะ, 2009) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานเหล็กกล้าแผ่นเปลือยในการผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ร่วมกับอะลูมิเนียมนั้นไม่สามารถตอบโจทย์การใช้งานของชิ้นส่วนรถยนต์ได้ทั้งหมดเนื่องจากความหลากหลายของสภาพแวดล้อมในการใช้งานที่ทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่ผลิตขึ้นจากเหล็กกล้าแผ่นเปลือยลดลง เช่น สภาพการกัดกร่อนสูง เป็นต้น จึงมีการนำเอาเหล็กกล้าแผ่นเคลือบผิวด้วยสังกะสีหรือที่รู้จักในชื่อ Galvanized steel มาผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์แทนเหล็กกล้าแผ่นเปลือยเพื่อยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนรถยนต์ในส่วนที่มีโอกาสสัมผัสบรรยากาศที่เอื้อให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีมีสมบัติที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าแผ่นเปลือย แต่งานวิจัยด้านการเชื่อมโลหะต่างชนิดแต่ในขณะการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเพื่อศึกษาผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อคุณภาพของรอยเชื่อมนั้นมีการศึกษาอย่างจำกัด เช่นการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับอะลูมิเนียมผสมด้วยกระบวนการเชื่อม MIG (H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He and H. Hackl, 2007) ภายหลังจากที่ Zhang และคณะได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางรอยเชื่อมพบว่าการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นบนรอยต่อระหว่างเหล็กกล้ากับเนื้อเชื่อมทำให้เกิดการเชื่อมติด โดยที่ความหนาและส่วนผสมของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนี้



จะขึ้นกับปริมาณความร้อนในการเชื่อม และยังได้รายงานไว้อีกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้เป็นจุดอ่อนแอของรอยเชื่อมเนื่องจากภายหลังจากการทดสอบแรงดึงชิ้นงานเชื่อมเกิดการขาดที่บริเวณกระตบร้อนของอะลูมิเนียมต่อมาในปี 2008 G. Sierra และคณะได้ศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น Galvanized steel กับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อม GTAW (G. Sierra, P. Peyre, F. DeschauxBeaume, D. Stuart and G. Fras, 2008)ซึ่งจากผลการทดลอง G. Sierra และคณะได้รายงานว่ามีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นที่บริเวณ Reaction Layer และเมื่อนำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบแรงดึงพบว่าการเกิดการแตกขาดขึ้นบริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งภายหลังได้ทำการตรวจสอบประเภทของสารประกอบเชิงโลหะนี้ และพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะประเภท  $FeAlSiZn$  เห็นได้จากรายงานดังกล่าว ไม่มีการยื่นย่นผลของชั้นสังกะสีต่อคุณภาพรอยเชื่อมอย่างชัดเจน และเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงอิทธิพลของชั้นดังกล่าวให้ดีขึ้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมนี้ขึ้นด้วยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound layers, IMP) และความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

### 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ด้วยการวิจัยนี้ต้องการที่จะศึกษาผลของชั้นสังกะสีที่เคลือบบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คเวลดิง (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) และเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณี ด้วยกัน คือ

1) การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย (ไม่มีชั้นเคลือบสังกะสี) กับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A5052 ความหนาของชิ้นงานเชื่อม 1.0 มิลลิเมตร ซึ่งต่อไปในรายงานระบุในชื่อกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย

2) การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบ (มีชั้นเคลือบสังกะสี) กับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A5052 ความหนาของชิ้นงานเชื่อม 1.0 มิลลิเมตร ซึ่งต่อไปในรายงานระบุในชื่อกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี

ในงานวิจัยนี้โลหะพื้นที่นำมาเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะพื้น

Materials	Chemical composition (wt.%)						
	Fe	C	Mn	Si	Mg	Cu	Al
Steel	Bal.	0.05	0.17	0.018	-	0.018	0.05
A5052	0.40 (max)	-	0.10 (max)	0.25 (max)	2.2-2.8	0.10 (max)	Bal.

ตารางที่ 3.2 สมบัติเชิงกลของโลหะพื้น

Materials	Mechanical properties		
	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	% Elongation
Steel	233	306	67
A5052	195	230	12

ส่วนขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงาน

เนื่องจากการทดลองนี้ใช้โลหะต่างชนิดในการเชื่อม 3 ชนิด การเตรียมชิ้นงานในการทดลองนี้จึงแบ่งออกเป็นเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกันดังนี้

3.3.1.1 การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (Galvanize Steel) ทำการเตรียมชิ้นงานโดยทำการตัดเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี SCGA 270C ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น Hydraulic Guillotine Shears (CNTA3150/63A) ดังรูปที่ 3.1 ให้ได้ขนาด (85)x(65)x(1) มิลลิเมตร และทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมโดยทำการเช็ดด้วยเอทานอลแล้วเป่าแห้ง



รูปที่ 3.1 เครื่องตัดโลหะแผ่น Hydraulic Guillotine Shears (CNTA3150/63A)



รูปที่ 3.2 เครื่องเจียรนัยราบผิวงาน Horizontal Surface Grinders (BRH20.02)

3.3.1.2 การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเปลือย ทำการเตรียมชิ้นงานโดยทำการตัดเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี SCGA 270C ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น Hydraulic Guillotine Shears (CNTA3150/63A) ให้ได้ขนาด (85)x(65)x(1) มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการเจียรนัยราบผิวชิ้นงานเพื่อกำจัดชั้นเคลือบสังกะสีออกด้วยเครื่องเจียรนัยราบผิวงาน Horizontal Surface Grinders (BRH20.02) ดังรูปที่ 3.2 โดยจะทำการเจียรนัยราบผิวเพียงด้านเดียวคือด้านที่สัมผัสกับโลหะผสมอะลูมิเนียมในการเชื่อมและเพื่อให้แน่ใจได้ว่าชั้นสังกะสีจะถูกกำจัดออกหมด ผู้วิจัยได้ทำการวัดความหนาของชั้นสังกะสีซึ่งมีความหนาสูงสุดประมาณ 10 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ผู้วิจัยจึงทำการเจียรนัยราบผิวออกไปทั้งสิ้นไม่เกิน 50 ไมครอน ดังนั้นขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเปลือยก่อนทำการเชื่อมจะมีขนาด (85)x(65)x(1-0.05) มิลลิเมตร และทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมโดยทำการเช็ดด้วยเอทานอลแล้วเป่าแห้ง

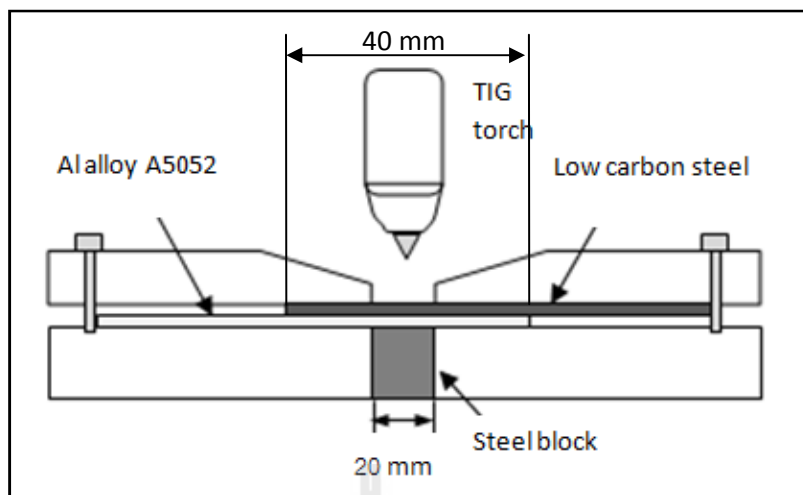


รูปที่ 3.3 ลักษณะของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่น (Galvanize Steel)

3.3.1.3 การเตรียมชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ทำการเตรียมชิ้นงานโดยทำการตัดโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด A5052 ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น Hydraulic Guillotine Shears (CNTA3150/63A) ให้ได้ขนาด (85)x(65)x(1) มิลลิเมตรและทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมโดยทำการขัดหยาบผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 เพื่อกำจัดออกไซด์ฟิล์มของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นและเช็ดด้วยเอทานอลแล้วเป่าแห้ง

### 3.3.2 การเชื่อม

สำหรับขั้นตอนการเชื่อมนั้นผู้วิจัยได้กำหนดให้วางชิ้นงานในลักษณะซ้อนเกยให้เหล็กกล้าแผ่นอยู่ด้านบนดังแสดงรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการจับยึดชิ้นงานและการขึ้นงานเชื่อมแบบซ้อนเกยด้วยกระบวนการเชื่อม TIG



รูปที่ 3.5 เครื่องเชื่อม ยี่ห้อ HOBART รุ่น TIGWAVE 350 AC/DC

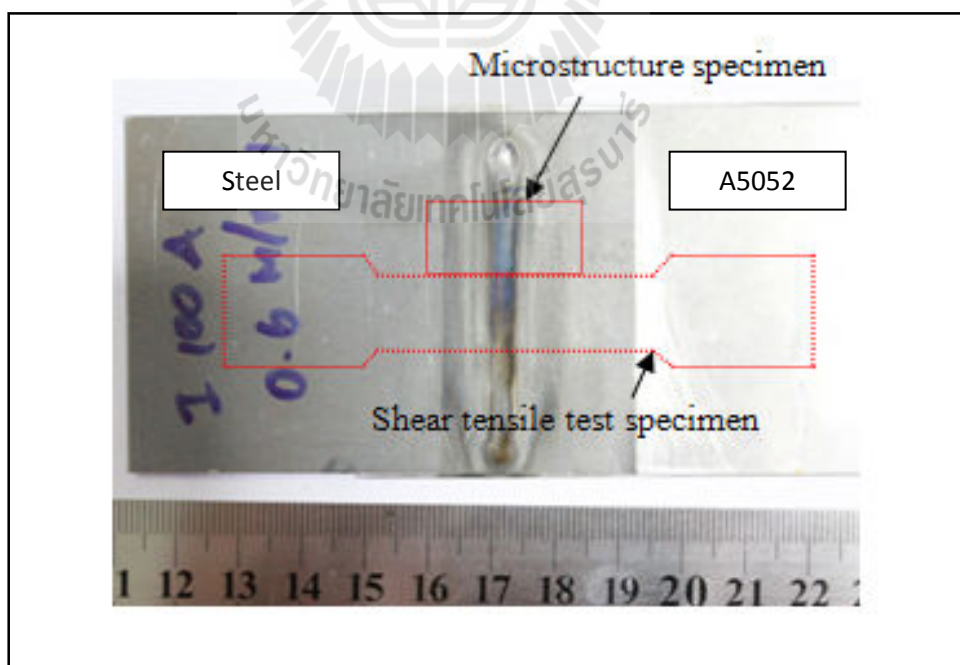
โดยในขั้นตอนของการเชื่อมผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องเชื่อม Tungsten Inert gas ยี่ห้อ HOBART รุ่น TIGWAVE 350 AC/DC ดังรูปที่ 3.5 และได้กำหนดสภาวะในการเชื่อมโดยมีรายละเอียดดังนี้

- ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ DCEN
- ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมคงที่ 0.60 เมตรต่อนาที

- กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 90-140 แอมแปร์
- ใช้แก๊สอาร์กอนในการปกคลุมรอยเชื่อมด้วยอัตราการไหล 8.0 ลิตรต่อนาที
- แท่งอิเล็กโทรดชนิด EWTn-2 (สีแดง) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร
- ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงานกับปลายอิเล็กโทรด 2.4 มิลลิเมตร
- ระยะห่างระหว่างปลายTorch กับปลายอิเล็กโทรด 3.2 มิลลิเมตร
- มุมหัวอิเล็กโทรด 45องศา

### 3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบแรงดึงเฉือน

3.3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ภายหลังจากเชื่อมแล้วเสร็จผู้วิจัยได้ทำการตัดชิ้นงานดังรูปที่ 3.6 และนำชิ้นงานเชื่อมไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางของรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อนร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์และประมวลผลภาพถ่าย (Olympus Stream Optical Microscopy and Image analysis) เพื่อวัดขนาดของบ่อหลอมและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและทำการวิเคราะห์ธาตุผสมบริเวณรอยเชื่อมติดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ร่วมกับ EDS รุ่น FE-SEM (JEOL JSM 7800F)

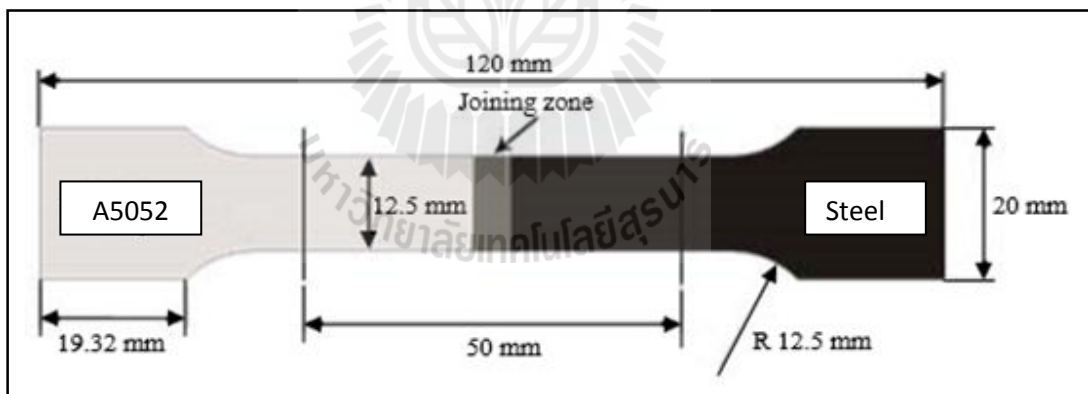


รูปที่3.6แสดงแผนภาพการตัดชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบแรงดึงเฉือน





รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบแรงดึงเหนือ Universal testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5582 (100kN)



รูปที่ 3.8 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงเหนือ

3.3.3.2 การทดสอบแรงดึงเหนือภายหลังการเชื่อมแล้วเสร็จทำการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงเหนือของชิ้นงานเชื่อมทุกสภาวะเชื่อมติดด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเหนือ Universal testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5582 (100kN) ดังรูปที่ 3.7 และลักษณะชิ้นงานเชื่อมที่นำมาทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเหนือจะทำการตัดจากชิ้นงานเชื่อมตรงกลางแผ่นดังแสดงในรูปที่ 3.6 และทำการตัดด้วยลวด (Wire Cut) โดยทำการตัดให้โดยบริษัทโคราชพีรี

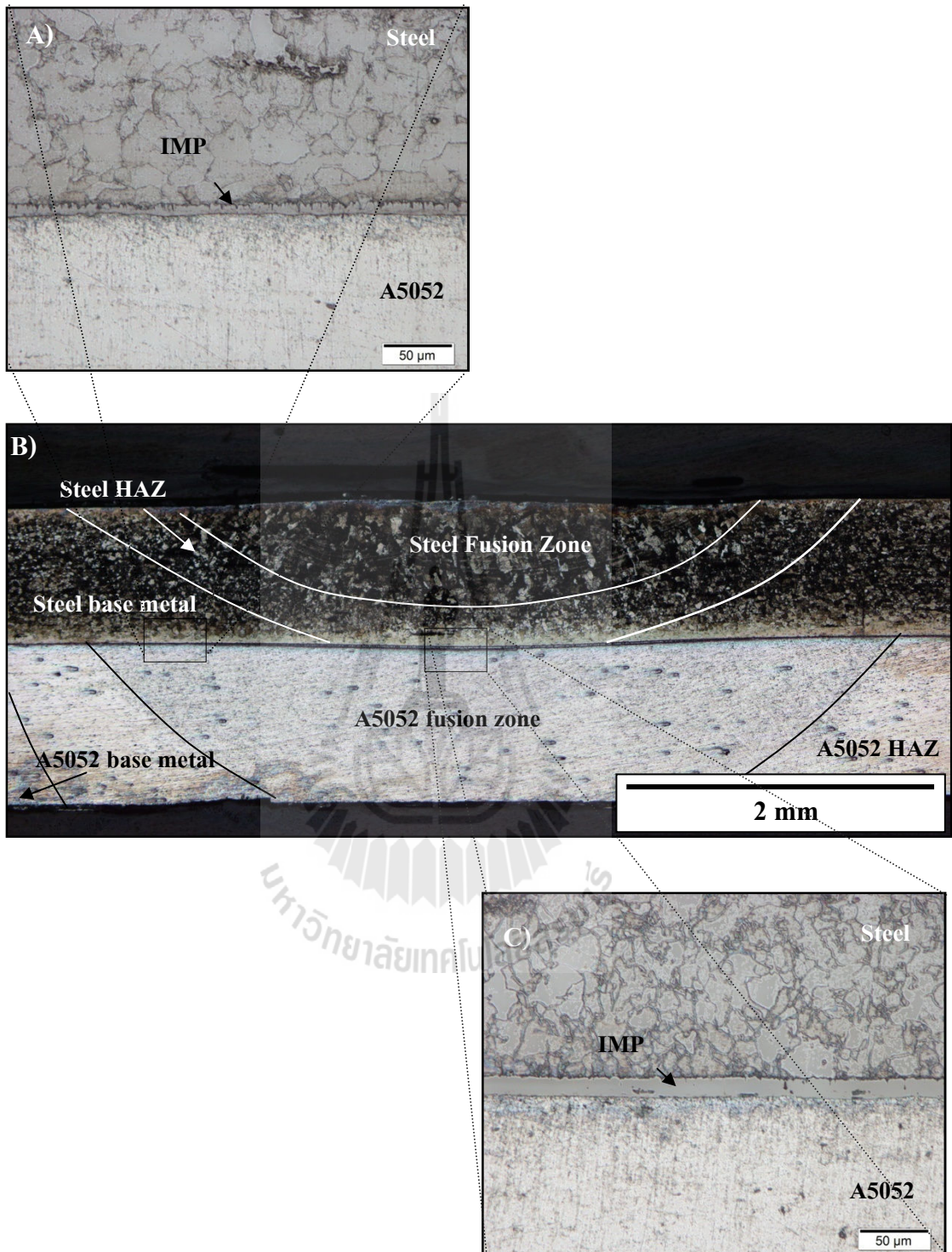
ซึ่งจำเป็นทำให้ได้ขนาดดังแสดงรูปที่ 3.8 หลังจากนั้นทำการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานเชื่อมในแนวตัดขวางรอยเชื่อมเพื่อดูแนวการแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อนร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์และประมวลภาพถ่าย (Olympus Stream Optical Microscopy and Image analysis) และตรวจผิวหน้ารอยแตกด้วยกล้อง Stereo Leica EZ4

### 3.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

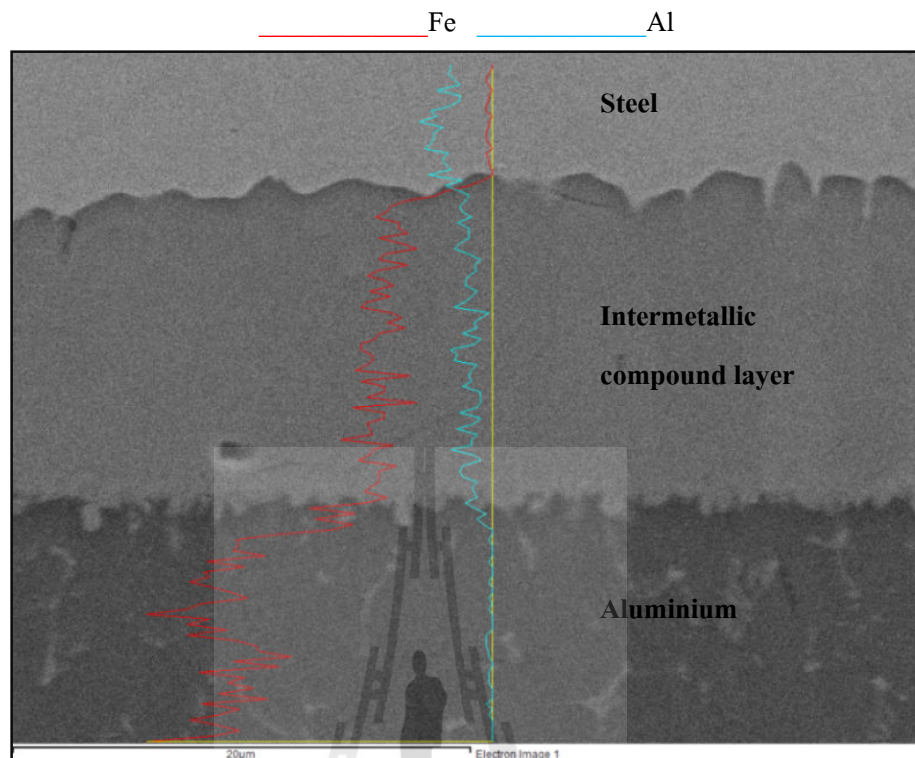
#### 3.4.1 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของแนวรอยเชื่อม

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (Optical Microscopy) ดังแสดงตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของแนวเชื่อมดังรูปที่ 3.9 จากรูปจะพบได้ว่าโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางรอยเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมกรณีเหล็กกล้าแผ่นเปลี่ยนนั้นมีบริเวณที่มีความแตกต่างกันอยู่ด้วยกัน 7 บริเวณ คือ บริเวณที่เหล็กกล้าหลอมละลาย (Steel Fusion zone) บริเวณกระทบร้อนในเหล็กกล้า (Steel HAZ) บริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า (Steel base metal) บริเวณโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Aluminium fusion zone) บริเวณกระทบร้อนโลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminium HAZ) บริเวณพื้นโลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminium base metal) และบริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound Layer, IMP) ซึ่งลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในกรณีการเชื่อมนี้จะมีผลต่อเนื่องตลอดแนวการเชื่อมติดและบริเวณใจกลางชิ้นงานสารประกอบเชิงโลหะจะหนาที่สุดและบางลงบริเวณขอบบ่อหลอมแสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 3.9(A) กับ 3.9(C) เนื่องจากในขณะที่ทำการเชื่อมความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมจะส่งผลให้บริเวณใจกลางบ่อหลอมอะลูมิเนียมมีอุณหภูมิสูงกว่าขอบบ่อหลอมและระยะเวลาการแพร่ ที่ชิ้นงานอุณหภูมิสูงนานกว่าจึงเกิดได้ จึงทำให้ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นใจกลางบ่อหลอมหนากว่าบริเวณขอบบ่อหลอมอะลูมิเนียมนั่นเอง ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางนี้ยังสอดคล้องกับรายงานการวิจัยการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมหลายงานก่อนหน้านี้ (R. Borrisutthekul et al., 2007, ฤชิต มิตรสมหวังและรัตนบริสุทธิกุล, 2009-2010) ที่พบการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้น ณ บริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียม



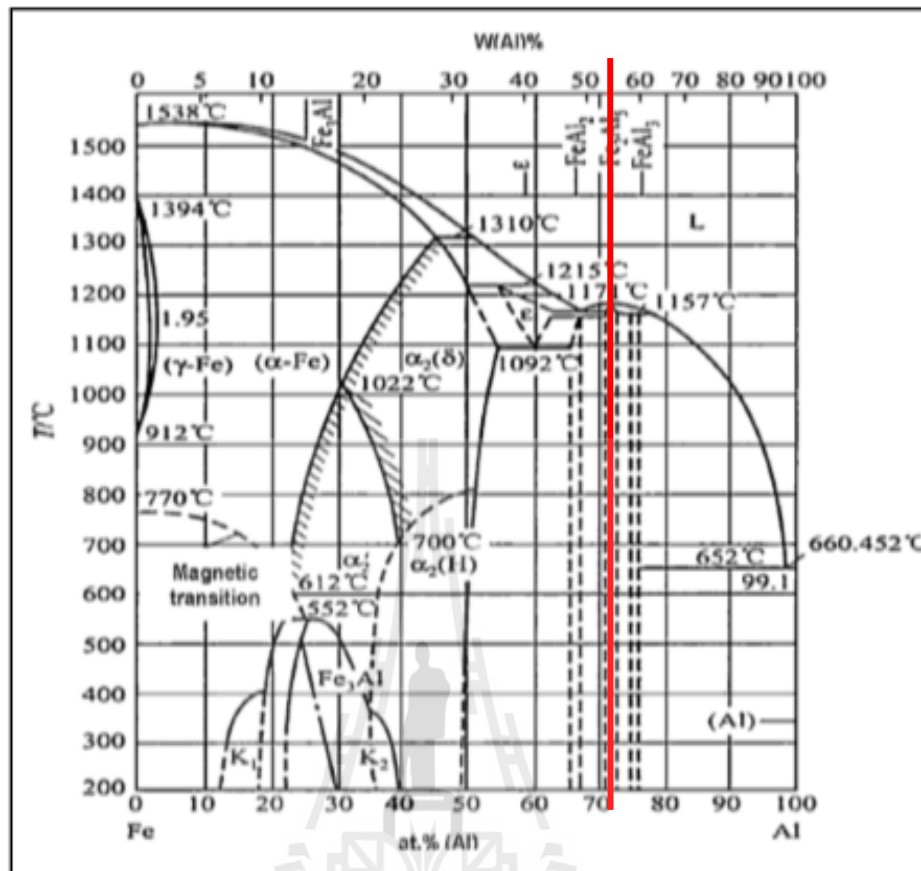


รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางรอยเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย (กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A ความเร็วในการเชื่อม 0.60 เมตร/นาที)



รูปที่ 3.10 แสดงการกระจายตัวของธาตุในภาคตัดขวางแนวการเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมกรณีเหล็กกล้าแผ่นเปลือย (ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120A ความเร็วในการเชื่อม 0.60 เมตร/นาที)

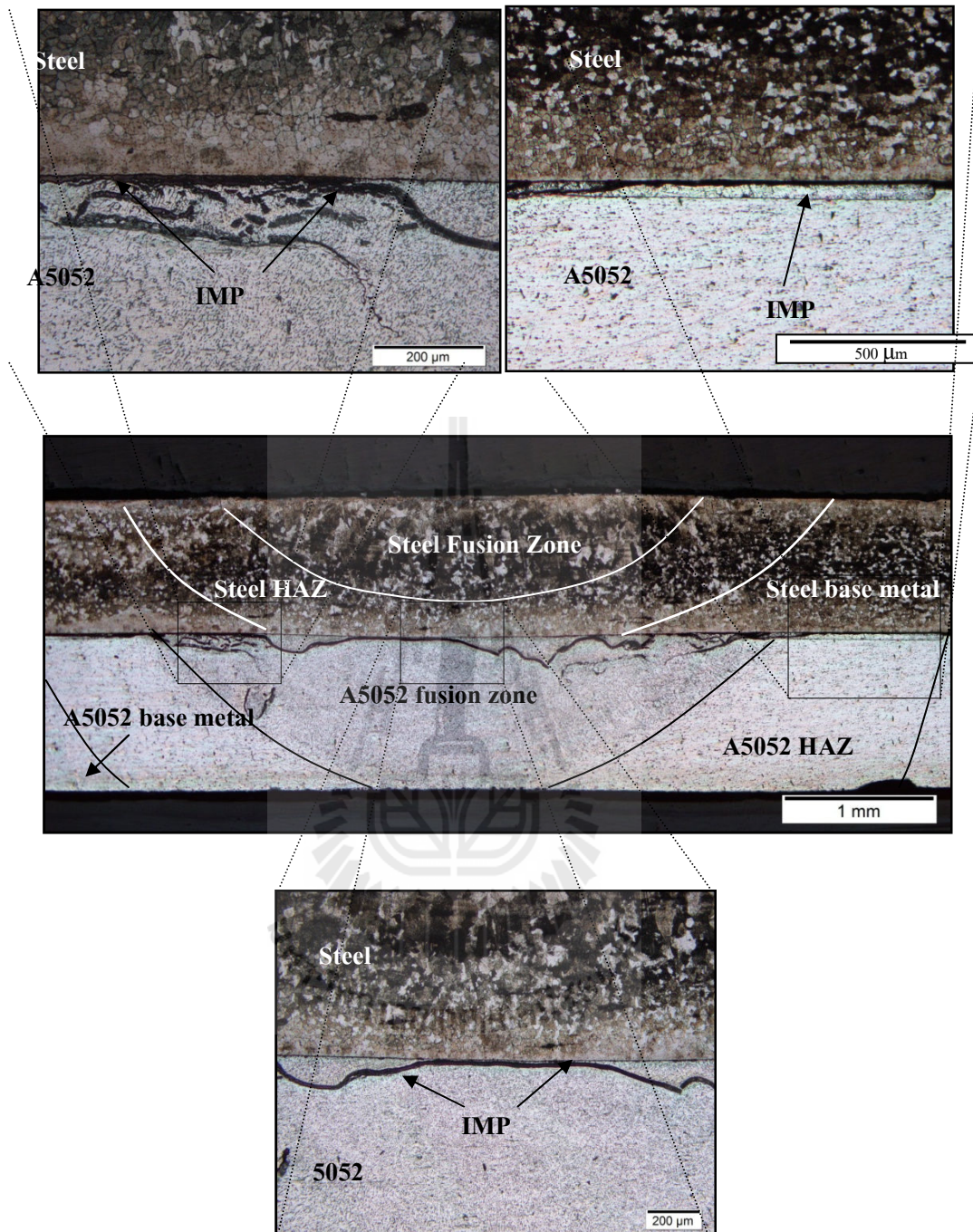
และเมื่อทำการตรวจสอบปริมาณธาตุประกอบที่เกิดขึ้นในแนวตัดขวางรอยเชื่อมพบว่าแนวรอยเชื่อมประกอบไปด้วย เหล็ก และ อะลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 3.10 และเมื่อนำสัดส่วนของธาตุบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะไปเทียบกับแผนภูมิสมดุลของระบบเหล็ก-อะลูมิเนียมในรูปที่ 3.11 (Guo et al., 2009) พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบเชิงโลหะประเภท  $Fe_2Al_5$  ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับเหล็กที่อยู่ในสถานะของแข็งเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะนี้ขึ้น เช่นเดียวกับหลายงานวิจัยการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นนั้นเป็น  $Fe_2Al_5$  (M. J. RATHOD และ M. KUTSUNA, 2004, G.Sierra et al., 2008)



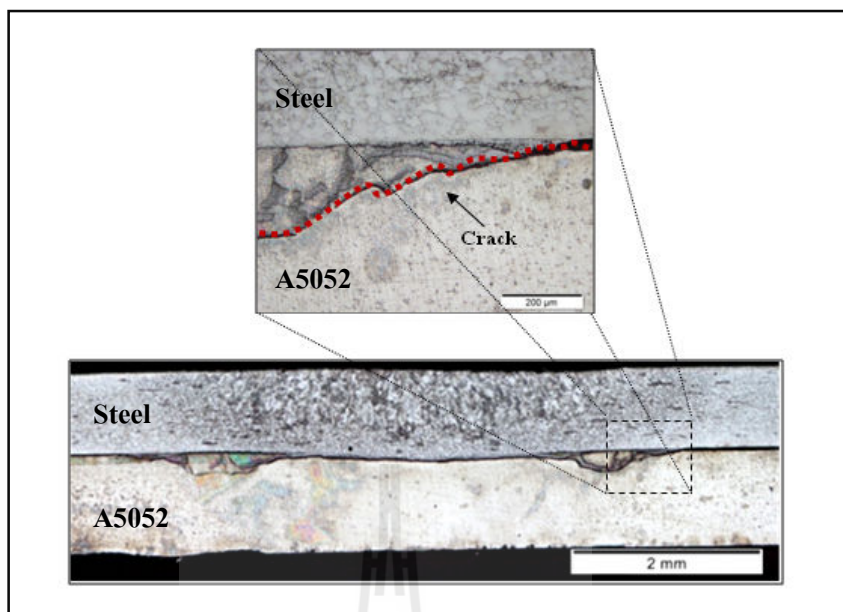
รูปที่ 3.11 แผนภูมิสมดุลของระบบเหล็ก-อะลูมิเนียม

ขณะที่กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีพบมีบริเวณของรอยเชื่อมต่อความแตกต่างกันอยู่ด้วยกัน 7 บริเวณเช่นกันกับกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยคือ บริเวณที่เหล็กกล้าหลอมละลาย (Steel Fusion zone) บริเวณกระทบร้อนในเหล็กกล้า (Steel HAZ) บริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า (Steel base metal) บริเวณโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Aluminium fusion zone) บริเวณกระทบร้อนโลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminium HAZ) บริเวณโลหะพื้นอะลูมิเนียมผสม (Aluminium base metal) และบริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound Layer, IMP) โดยที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจะแตกต่างไปจากกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยอย่างชัดเจนคือจะมีความไม่สม่ำเสมอตลอดการเชื่อมติดและแบ่งบริเวณการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะออกเป็นสองบริเวณอย่างชัดเจนคือชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดในบ่อหลอมอะลูมิเนียมและบริเวณนอกบ่อหลอมอะลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 3.12 และยังพบว่ามีการแยกเกิดขึ้นในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมปริมาณที่สูงๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.13

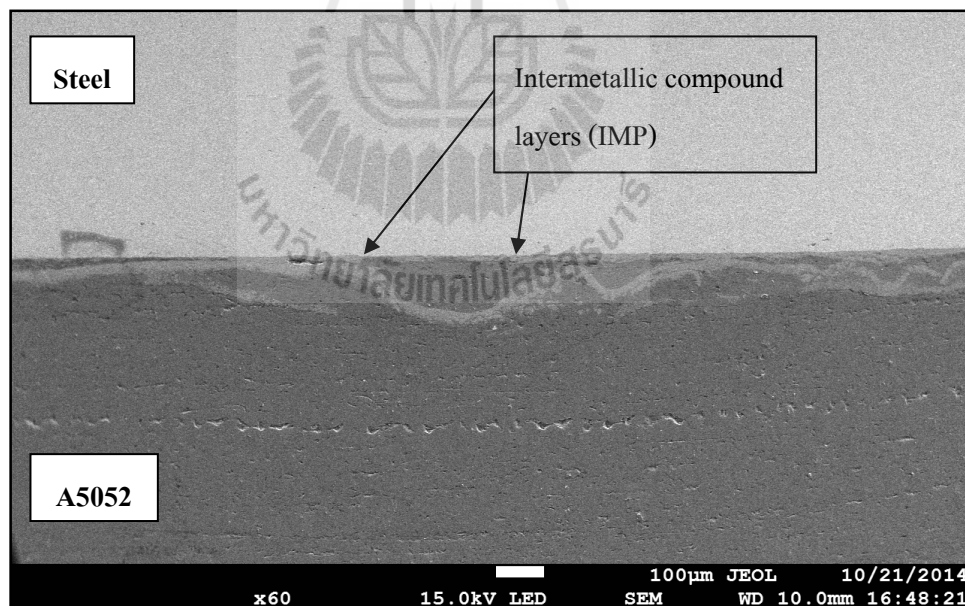




รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางรอยเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 110 A ความเร็วในการเชื่อม 0.60 เมตร/นาที)

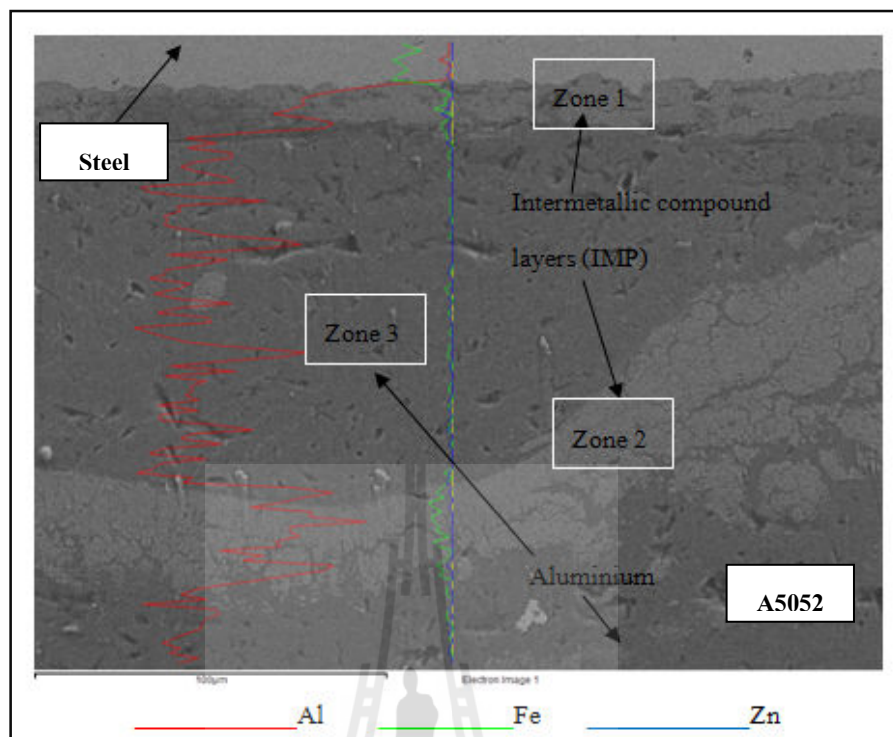


รูปที่ 3.13 บริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่สม่ำเสมอและมีรอยแตกเกิดขึ้น (กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 140A)



รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายแนวตัดขวางรอยเชื่อมโดยใช้ SEM ที่กำลังขยาย 600 เท่าของชิ้นงานเชื่อม เหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120A





รูปที่ 3.15 ผลจากการตรวจสอบ EDS line scanning ของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่กระแสไฟในการเชื่อม 120A

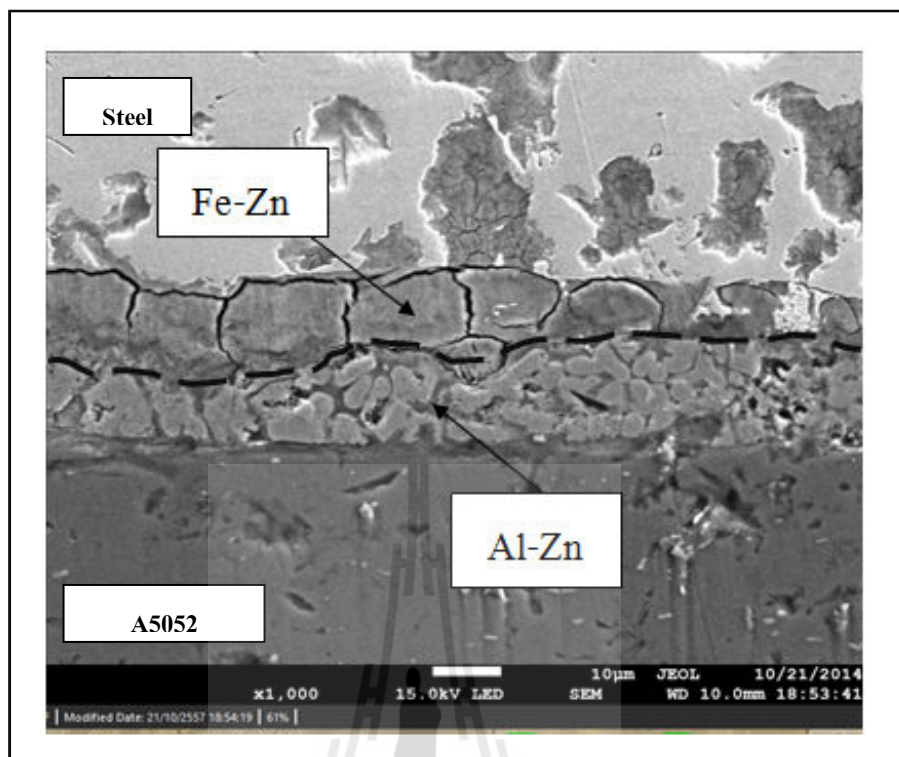
และจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 3.14 พบว่าบริเวณรอยเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่แตกต่างกันอยู่ด้วยกัน 3 บริเวณ คือบริเวณเหล็กกล้าที่อยู่ด้านบน บริเวณโลหะผสมอะลูมิเนียมที่อยู่ด้านล่างและบริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดการเชื่อมติดและเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDS analysis พบว่าแนวรอยเชื่อมประกอบด้วย เหล็ก อะลูมิเนียม และสังกะสี ดังแสดงในรูปที่ 3.15 เมื่อเราทำการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในแต่ละบริเวณในรูปที่ 3.15 ของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะพบว่า

Zone 1 ประกอบด้วย Al 73.56 atomic% Fe 22.88 atomic% และ Zn 3.56 atomic%

Zone 2 ประกอบด้วย Al 77.92 atomic% Fe 19.72 atomic% และ Zn 2.33 atomic%

นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจหาปริมาณธาตุประกอบบริเวณ Zone 3 ที่อยู่ระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะ Zone 1 และ Zone 2 พบว่ามีธาตุประกอบคือ

Zone 3 ประกอบด้วย Al 97.94 atomic% Fe 0.55 atomic% และ Zn 1.51 atomic%



รูปที่ 3.16 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณถัดจากบ่อหลอมอะลูมิเนียมในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี

ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อทำการตรวจสอบสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นบริเวณนอกบ่อหลอมอะลูมิเนียมที่อยู่ตรงรอยต่อระหว่างเหล็กกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่อยู่ในสถานะของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะแบ่งออกเป็นสองบริเวณที่แตกต่างกัน คือบริเวณสารประกอบเชิงโลหะที่อยู่ด้านบนติดกับเหล็กประกอบไปด้วย เหล็กและสังกะสี และบริเวณสารประกอบเชิงโลหะที่อยู่ด้านล่างติดกับอะลูมิเนียมประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมและสังกะสี ซึ่งสามารถอธิบายการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีได้ ดังนี้

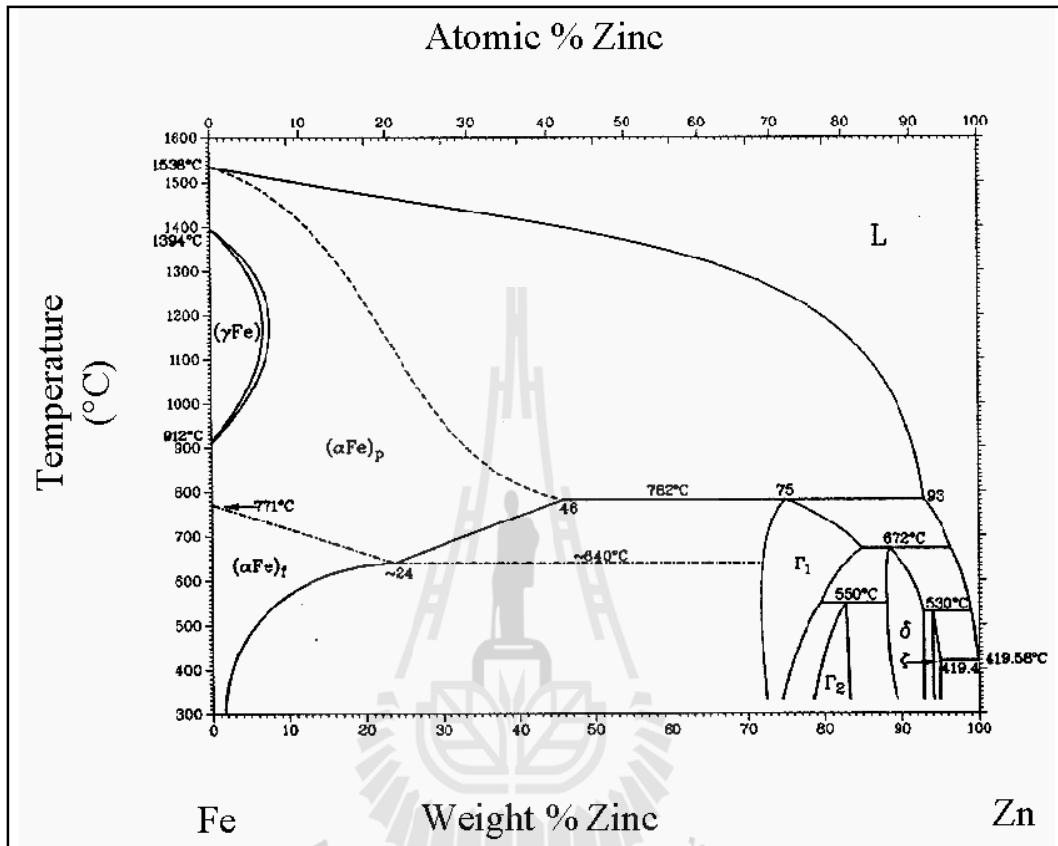
บริเวณสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในบ่อหลอมอะลูมิเนียม สารประกอบเชิงโลหะบริเวณนี้จะความไม่สม่ำเสมอและเกิดการตกลงของชั้นเคลือบเข้ามาในเนื้ออะลูมิเนียมเนื่องจากเมื่อให้ความร้อนในการเชื่อมชั้นเคลือบสังกะสีที่มีจุดหลอมละลายต่ำจะเกิดการละลายแล้วหลอมรวมกันกับโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมข้างล่าง และด้วยความหนาแน่นของสังกะสีที่สูงถึง 6.98 ก./ซม.<sup>3</sup>ที่จุดหลอมเหลวเพียง 419.63 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมเพียง 2.375 ก./ซม.<sup>3</sup>ที่จุดหลอมเหลว 660.32 องศาเซลเซียส ทำให้เมื่อให้ความร้อนลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมถึงจุด

หลอมตัวของโลหะทั้งสองและเกิดการหลอมละลายขึ้น ชั้นเคลือบสังกะสีที่ประกอบไปด้วย Fe และ Zn ที่มีความหนาแน่นสูงกว่าอะลูมิเนียมจึงพยายามจมลงสู่บ่อหลอมของอะลูมิเนียมประจวบเหมาะกับการหลอมของอะลูมิเนียมผสมขณะหลอมมีการไหลของน้ำโลหะ และการไหลนั้นจะช่วยให้เกิดการผสมแต่การผสมดังกล่าวจะไม่ค่อยดีและเมื่อบ่อหลอมมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงทำให้ชั้นสังกะสีไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับอะลูมิเนียมได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยจึงมักพบว่าในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นจะมีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอและมีบางส่วนตกลงมาในบริเวณบ่อหลอมอะลูมิเนียมนั่นเอง นอกจากนี้โดยทั่วไปแล้วงานเชื่อมจะเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและหดตัวลงเมื่อเนื้อเชื่อมเกิดการเย็นตัวดังนั้นบริเวณบ่อหลอมอะลูมิเนียมที่มีการหลอมเหลวจะเกิดการขยายตัวและหดตัวลงเมื่อเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้บริเวณนี้เองเกิดความเค้นตกค้างได้และด้วยในงานวิจัยนี้ที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะอย่างมากบริเวณขอบบ่อหลอมอะลูมิเนียมที่เมื่อขึ้นงานเชื่อมเกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะทำให้บ่อหลอมอะลูมิเนียมเกิดการเย็นตัวและหดตัวลงและส่งผลให้บริเวณรอยต่อระหว่างบ่อหลอมอะลูมิเนียมกับบริเวณที่ไม่เกิดการหลอมของอะลูมิเนียมนั้นได้รับอิทธิพลของความเค้นแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของเนื้ออะลูมิเนียมในขณะที่เกิดการแข็งตัว อีกด้วยทั้งบริเวณขอบบ่อหลอมอะลูมิเนียมมีการก่อตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของสารประกอบเชิงโลหะและไม่มีความเป็นเนื้อเดียวระหว่างชั้นเคลือบกับโลหะพื้นอะลูมิเนียมจึงทำให้บริเวณนี้เกิดการแตกได้ง่ายเมื่อได้รับความเค้นแรงดึง ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมักพบการแตกหักที่ขอบบ่อหลอมในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียม ผิดกับกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ชั้นดังกล่าวจะบางมากที่บริเวณขอบของบ่อหลอมที่ลดปัญหาการแตกหักที่ขอบบ่อหลอมลงได้ ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดการณ์ว่าความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีที่หนามากเป็นผลจากการผสมกันที่ไม่ดีของชั้นสังกะสีในโลหะผสมอะลูมิเนียมจึงต้องมีการควบคุมในกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีให้ชั้นเคลือบสังกะสีบางมากๆ เพื่อให้สังกะสีสามารถละลายและผสมกันได้ดีในโลหะผสมอะลูมิเนียม

บริเวณสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นนอกบ่อหลอมอะลูมิเนียมบริเวณนี้ สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจะต่างไปจากสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดในบ่อหลอมอะลูมิเนียมเนื่องไม่เกิดการหลอมละลายของโลหะผสมอะลูมิเนียมสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นนี้จึงไม่ได้เกิดขึ้นจากการที่น้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวทำปฏิกิริยากับเหล็กที่อยู่ในสถานะของแข็ง แต่อาจเกิดจากการที่ชั้นเคลือบสังกะสีเกิดการละลายที่นอกบ่อหลอมเมื่อได้รับความร้อนเนื่องจากสังกะสีมีจุดหลอมตัวต่ำกว่าอะลูมิเนียมจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีหลอมเหลวกับโลหะ



ผสมอะลูมิเนียมที่ยังอยู่ในสถานะของแข็งเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะอีกประเภทและประกอบไปด้วยสังกะสีกับอะลูมิเนียมนั่นเอง



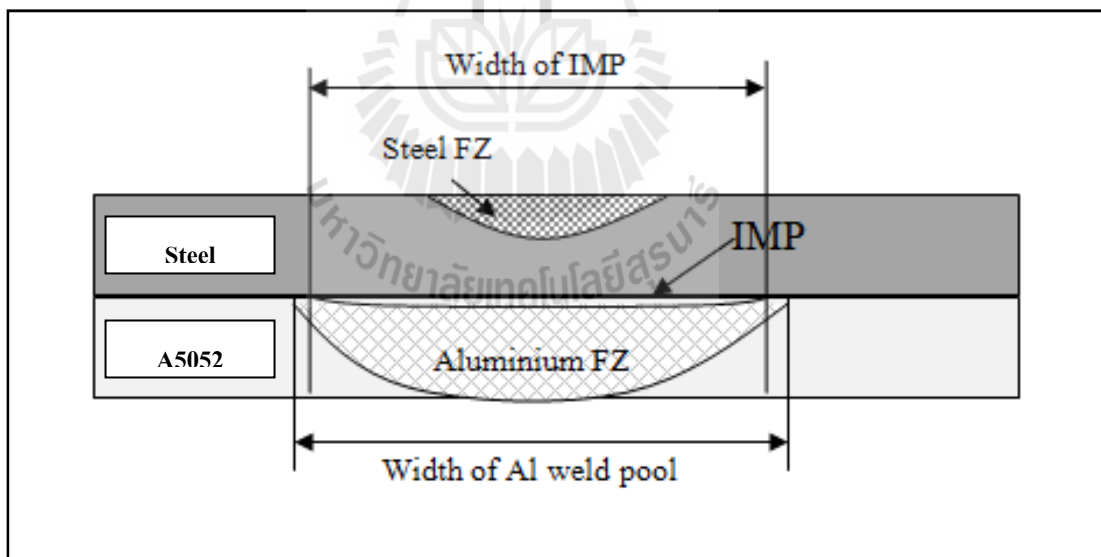
รูปที่ 3.17 แผนภูมิสมดุลของระบบเหล็กกับสังกะสี

และจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมในรอยเชื่อมด้วย SEM ร่วมกับ EDS analysis พบว่าสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในบ่อหลอมอะลูมิเนียมจะเป็นสารประกอบเชิงโลหะประเภท Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> และมี Zn ผสมอยู่เล็กน้อย ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าชั้นที่ตกลงมาในเนื้ออะลูมิเนียมและเกิดเป็นความไม่สม่ำเสมอของชั้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นเป็นชั้นเคลือบสังกะสีจริง และนอกจากนี้ยังพบมีบริเวณที่เกิด Eutectic phase ร่วมด้วย และเป็นสารประกอบเชิงโลหะที่งานวิจัยการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมพบก่อนหน้านี้ (P. Peyre et al., 2007, Shao et al., 2014) และสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นนอกบ่อหลอมอะลูมิเนียมเป็นสารประกอบเชิงโลหะที่ประกอบไปด้วยสังกะสีกับอะลูมิเนียมซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าเกิดปฏิกิริยา

ระหว่างสังกะสีหลอมเหลวกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ยังอยู่ในสถานะของแข็งเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ Al-Zn ด้านล่างที่ติดกับผิวอะลูมิเนียมจริง ส่วนสารประกอบเชิงโลหะ Fe-Zn นั้นเกิดจากกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีและไม่เกิดการละลายเนื่องจากชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับสังกะสีจุดหลอมละลายสูงดังแสดงในรูปที่ 3.17 จึงไม่เกิดการหลอมละลายที่ขอบบ่อหลอมอะลูมิเนียมเนื่องจากบริเวณถัดออกไปจากบ่อหลอมอะลูมิเนียมมีอุณหภูมิต่ำนั่นเอง

ดังนั้นในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจึงแตกต่างไปจากการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย เนื่องจากการมีชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่น ส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในเนื้อรอยเชื่อม และเกิดรอยแตกที่ขอบบ่อหลอมในกรณีการเชื่อมที่ใช้ปริมาณความที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมสูงๆ ซึ่งไม่พบในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย

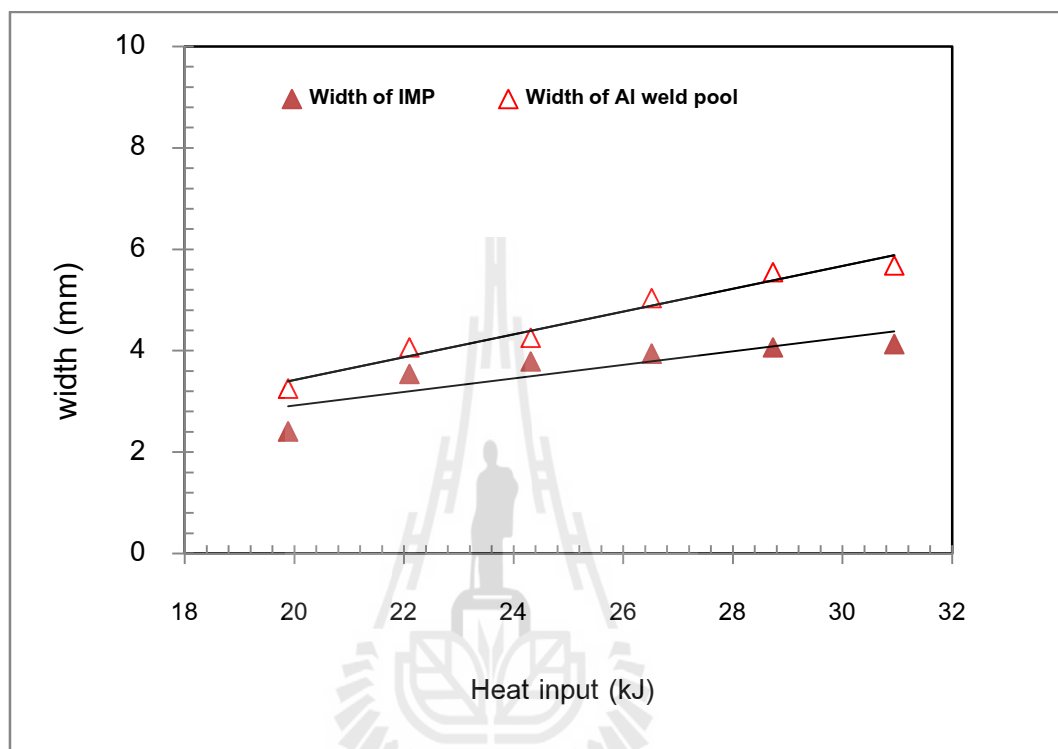
### 3.4.2 ความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ



รูปที่ 3.18 แผนภาพจำลองวิธีการวัดความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

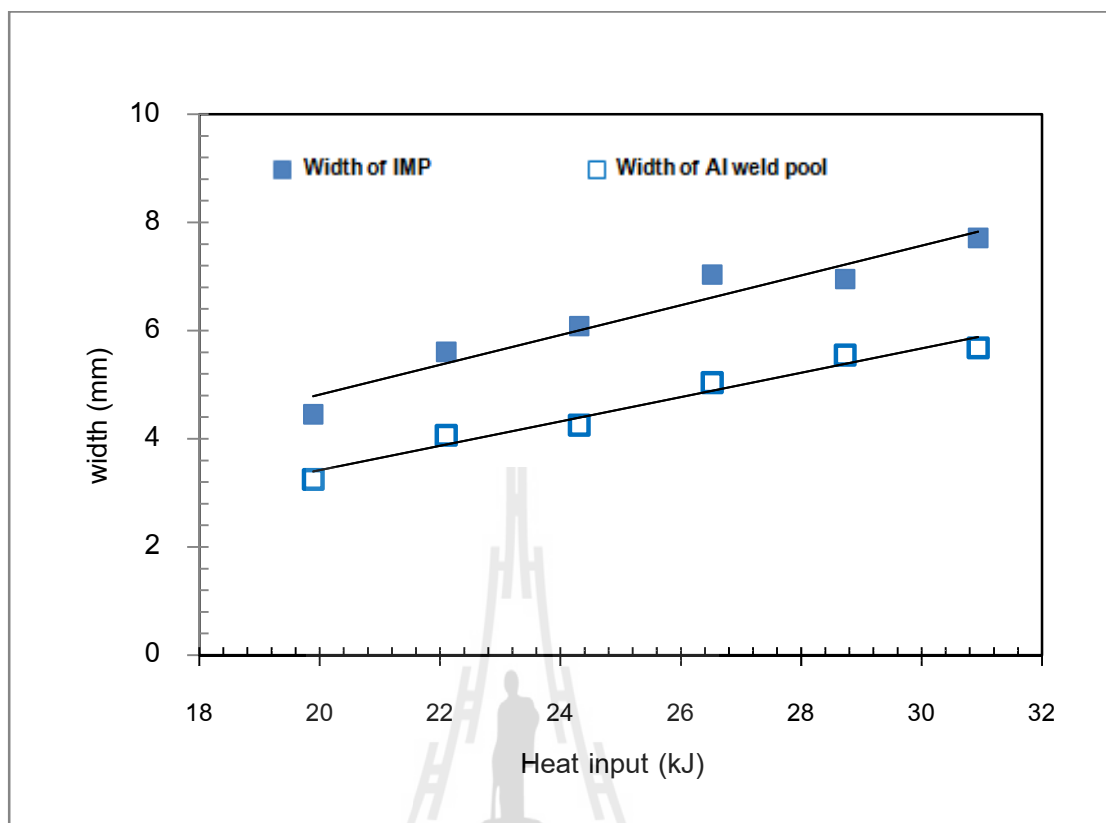
ความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ที่ทำการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image analysis) ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (Optical Microscopy) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 พบว่าในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น

เปลี่ยนความกว้างบ่อหลอมอะลูมิเนียมและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกว้างขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.19 นอกจากนี้และความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะไม่มากไปกว่าความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียม



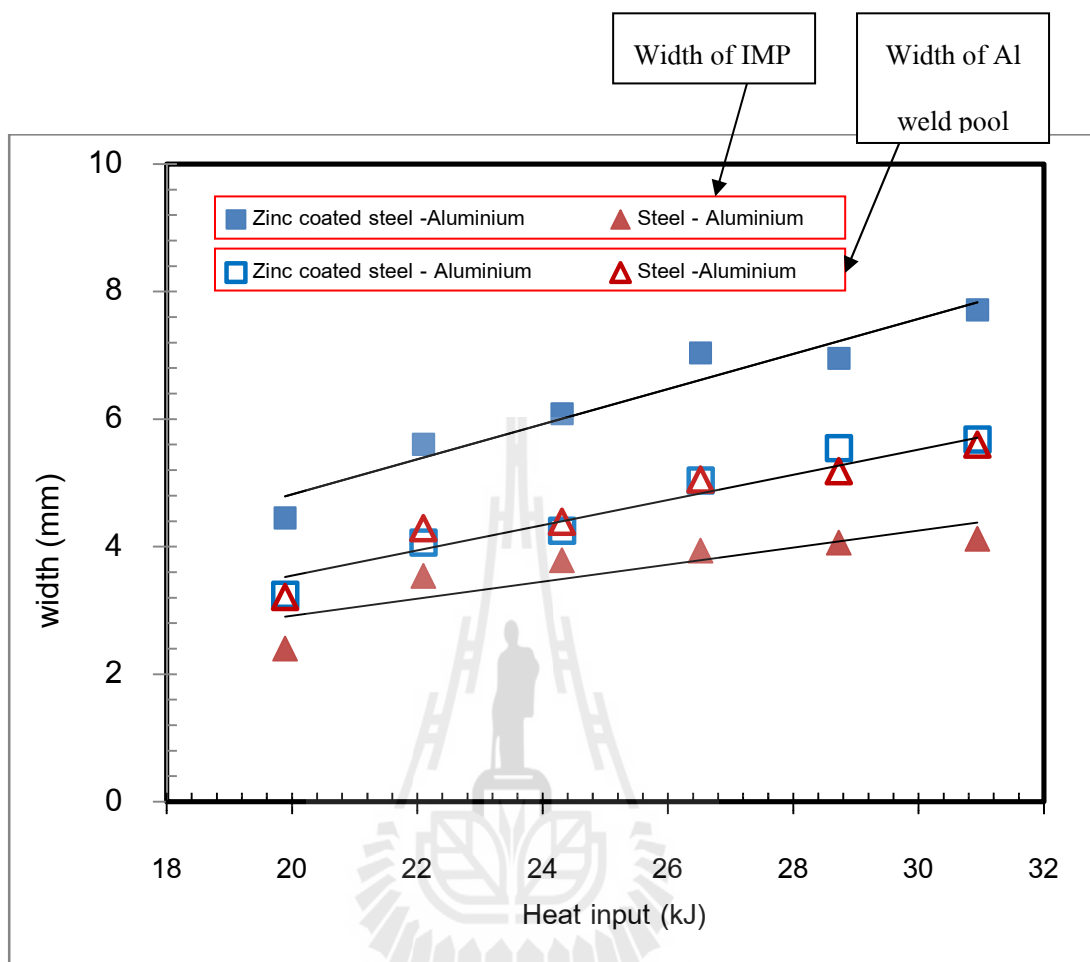
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนในการเชื่อมกับความกว้างของบ่อหลอมและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย

ส่วนในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี พบว่าความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะพบว่าความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมจะมีความกว้างเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนในการเชื่อมสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.20 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีนี้ความกว้างของสารประกอบเชิงโลหะจะมากกว่าความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนในการเชื่อมกับความกว้างของบ่อหลอมและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี

จากรูปที่ 3.19 และ 3.20 ที่แสดงความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นกับปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยและการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีตามลำดับ สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะและความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นกับปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมทั้งสองกรณีการเชื่อมดังรูปที่ 3.21 จะพบว่ามีความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะของทั้งสองกรณีการเชื่อมจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมสูงขึ้น โดยในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีความกว้างน้อยกว่าบ่อหลอมอะลูมิเนียม ที่เป็นเช่นนี้เพราะในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมโดยอาศัยเทคนิคการบัดกรีแข็งด้วยโลหะพื้นนั้นจะอาศัยปฏิกิริยาระหว่างน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับเหล็กเหล็กที่อยู่ในสถานะของแข็งเกิดเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะและเกิดการเชื่อมติดขึ้น

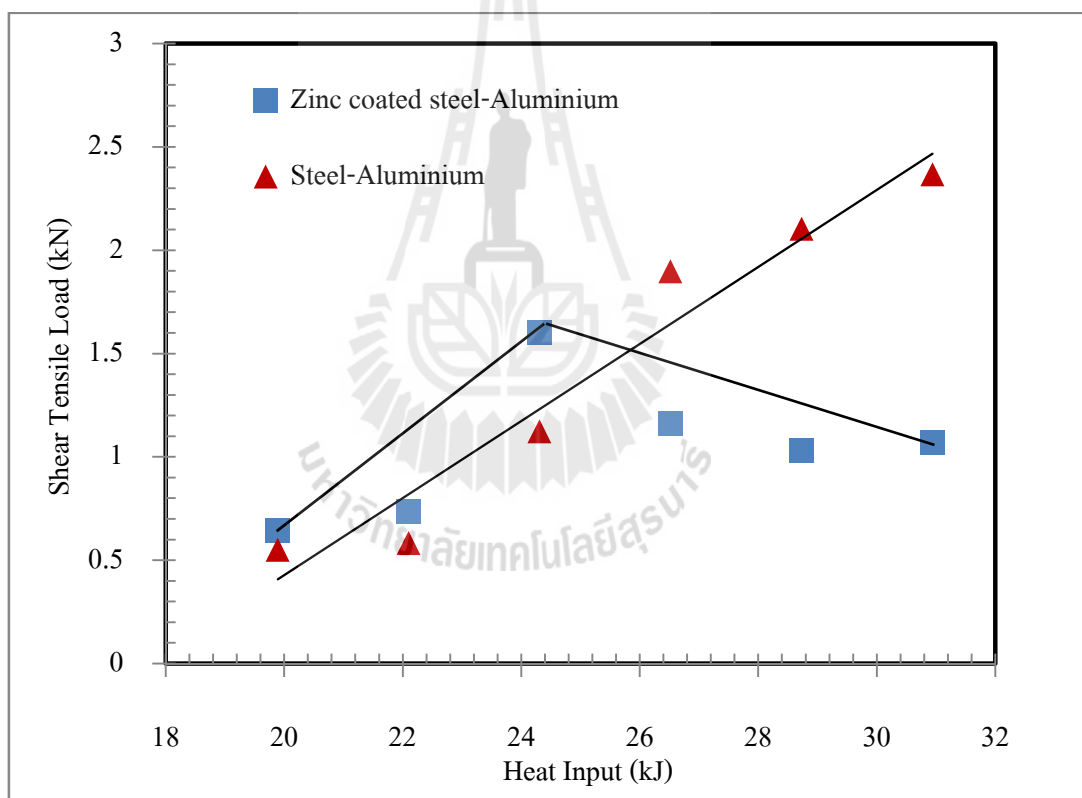


รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมกับความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะและความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียม

ฉะนั้นในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจึงไม่มากไปกว่าความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมนั่นเอง ในขณะที่กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจะมีความกว้างมากกว่าความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียม เนื่องในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีชิ้นสารประกอบเชิงโลหะสามารถเกิดได้กว้างกว่ากรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาของสังกะสีหลอมเหลวกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เป็นของแข็ง จึงทำให้ในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีนี้มีความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะกว้างกว่าบ่อหลอมอะลูมิเนียมและยังกว้างกว่าความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจะพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีจะมีความกว้างมากกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับแต่ความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมของทั้งสองกรณีการเชื่อมนั้นแทบไม่มีความแตกต่างกันหรือมีความแตกต่างกันน้อยมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะปริมาณความร้อนที่ใช้ในการการเชื่อมของทั้งสองกรณีการเชื่อมมีค่าเท่ากันจึงทำให้ความกว้างของบ่อหลอมอะลูมิเนียมไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นในงานวิจัยนี้เราสามารถควบคุมความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมได้เป็นอย่างดี

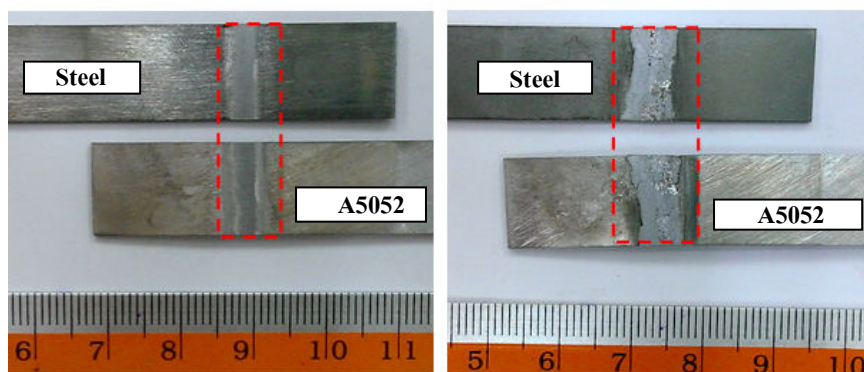
### 3.4.3 ความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงเฉือน



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมและความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม

จากผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเชื่อมที่สภาวะในการเชื่อมต่างๆด้วยการทดสอบแรงดึงเฉือนได้ผลการทดสอบแสดง

ความสามารถในการต้านทานต่อการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเชื่อมสัมพันธ์กับความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมดังรูปที่ 3.22 จากรูปจะพบว่ากรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยมีความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนในการเชื่อมสูงขึ้นและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเนื่องจากปริมาณความร้อนในการเชื่อมสูงขึ้นส่งผลให้ความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะนั้นกว้างขึ้นเช่นเดียวกับรายงานวิจัยของภุชิต และรัตน ที่เสนอว่าปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมสูงขึ้นส่งผลให้ความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะกว้างขึ้นและชิ้นงานเชื่อมสามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้น (ภุชิต มิตรสมหวังและรัตนบริสุทธิ์กุล, 2009-2012) ในขณะที่กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีนั้นจะมีความสามารถในการต้านทานการแตกหักเสียหายต่อแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมสูงขึ้นในช่วงแรกและลดลงเมื่อความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมสูงขึ้นและเมื่อผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมของทั้งสองกรณีการเชื่อมจะพบว่าในช่วงของปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมน้อยๆ กรณีชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีจะให้ความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงเหนือที่สูงกว่า และเมื่อปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกลับต่ำลงและต่ำกว่ากรณีชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย ที่เป็นเช่นนี้ผู้วิจัยคาดการณ์ว่าน่าจะเกิดจากการที่รอยเชื่อมติดหรือความกว้างของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะกรณีที่เชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีมีความกว้างมากกว่าทำให้สามารถรับแรงได้มากกว่าในช่วงความร้อนในการเชื่อมน้อยๆและเมื่อความร้อนลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมมากขึ้นทำให้พบรอยแตกที่ขอบบ่อหลอมของโลหะผสมอะลูมิเนียมในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีที่มีอิทธิพลมาจากการหดตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวในขณะที่แข็งตัวทำให้เกิดความเค้นแรงดึงสูงและบริเวณขอบบ่อหลอมเป็นบริเวณที่มีการก่อตัวของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะมากและเกิดอย่างไม่สม่ำเสมอมากและบริเวณนี้เองได้รับอิทธิพลของความเค้นแรงดึงสูงสุดเมื่อน้ำโลหะเกิดการแข็งตัว ทำให้มักพบรอยแตกเกิดขึ้น ณ บริเวณขอบของบ่อหลอมในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมสูงๆ และยังทำให้ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ได้ไม่สูงขึ้นไปดังเช่นกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย

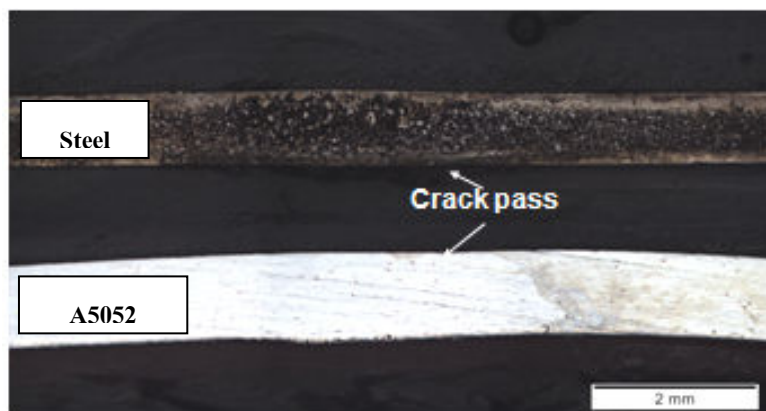


a) Steel –A5052 b) Zinc coated steel-A5052

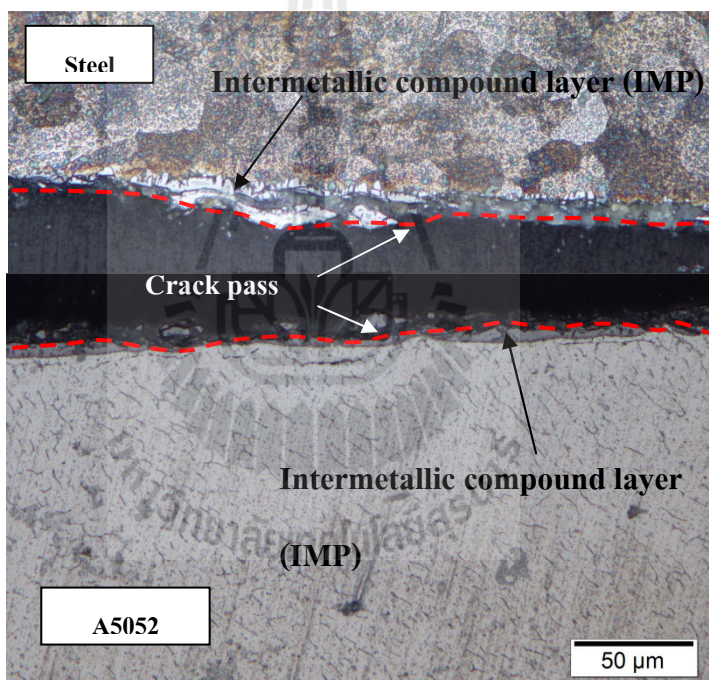
รูปที่ 3.23 ลักษณะผิวรอยเชื่อมภายหลังทดสอบแรงดึง-เฉือน (กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 140A)

นอกจากนี้เมื่อผู้วิจัยทำการตรวจสอบพื้นผิวของรอยแตกหักของชิ้นงานเชื่อม หลังจากทดสอบแรงดึงเฉือนดังรูปที่ 3.23 พบว่าชิ้นงานเชื่อมเกิดการแตกหักขึ้นที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะทุกสภาวะการเชื่อมทั้งสองกรณีการเชื่อมและไม่พบการเกิดการแตกหักขึ้นบนบริเวณกระพ้อหรืออะลูมิเนียมและในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยให้พื้นผิวการแตกหักค่อนข้างเรียบเพราะชิ้นงานเกิดการขาดที่ชั้นการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะซึ่งเกิดขึ้นบางระหว่างรอยต่อของเหล็กกล้าและโลหะผสมอะลูมิเนียมในขณะที่กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยให้พื้นผิวการแตกหักที่หยาบเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสารประกอบเชิงโลหะเนื้อรอยเชื่อม ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำเนื่องจากมีความเปราะ และแสดงตัวมันจุดอ่อนแอทำให้รอยแตกมักเลือกแตกตามการก่อตัวที่ไม่สม่ำเสมอของสารประกอบเชิงโลหะนี้และเมื่อทำการตรวจทิศทางการขยายตัวของรอยแตกของทั้งสองกรณีการเชื่อมดังรูปที่ 3.24 และ 3.25 พบว่ารอยแตกนั้นมีทิศทางการแตกขยายตัวไปตามแนวการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ





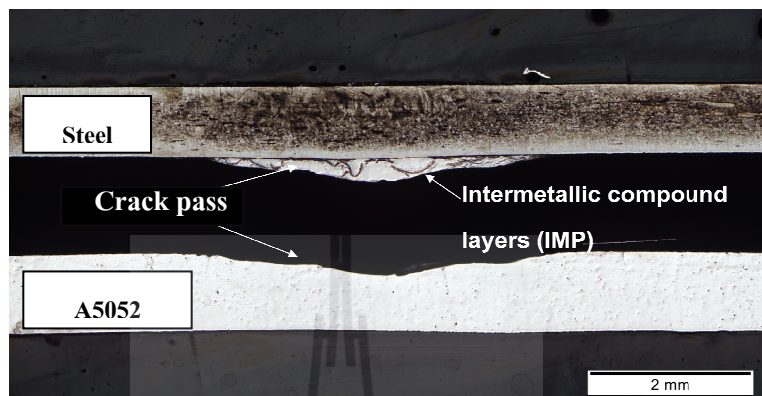
a) ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A



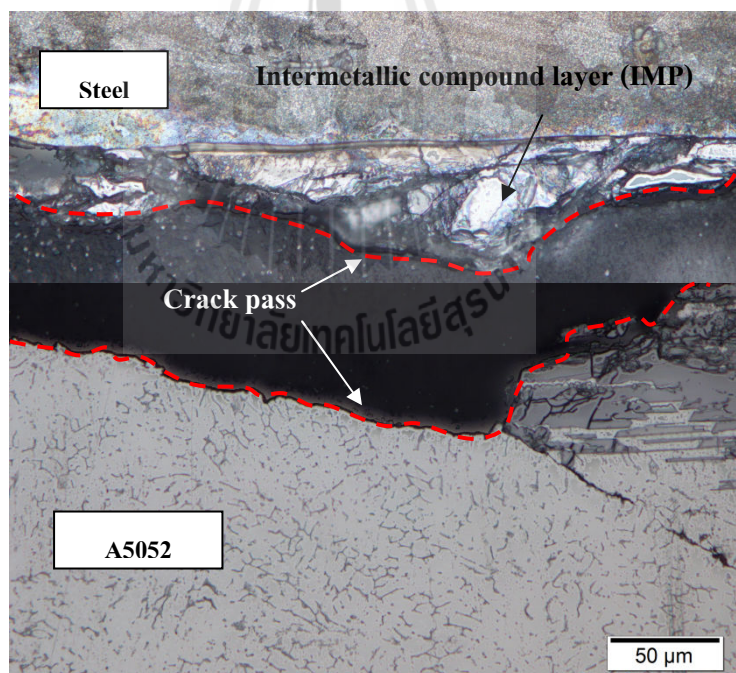
b) ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 140 A

รูปที่ 3.24 ภาพถ่ายการเดินทางของรอยแตกภายหลังทดสอบแรงดึงเนื้อของชิ้นงานเชื่อม  
กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย

ขณะที่กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีการขยายตัวของรอยแตกมีทิศทางตามการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่สม่ำเสมอและแตกเข้ามาในเนื้ออะลูมิเนียมและทำให้เกิดเป็นรอยบวมในเนื้อโลหะผสมอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.25



a) ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120A



b) ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 140A

รูปที่ 3.25 ภาพถ่ายพื้นผิวการแตกหักภายหลังจากทดสอบแรงดึงเดือนของชิ้นงานเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี

### 3.5 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

- 1) ในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นมีผลทำให้เกิดการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวการเชื่อมติด ซึ่งน่าจะเกิดจากการละลายไม่สมกันอย่างสม่ำเสมอของชั้นเคลือบสังกะสีในขณะที่ทำการเชื่อม และจะหนามากที่บริเวณขอบของบ่อหลอม ยังผลให้เมื่อเกิดการแข็งตัวมีความเค้นเกิดขึ้น ซึ่งยังผลให้มีการบรอยแตกขึ้นที่ขอบบ่อหลอมอะลูมิเนียม และรอยแตกดังกล่าวมีผลต่อความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อม ที่โดยปกติจะเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมากขึ้น
- 2) ชั้นเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็กกล้ามีผลทำให้รอยเชื่อมติดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมมีความกว้างมากขึ้น

### 3.6 รายการอ้างอิง

- Katayama, S. (2002).Dissimilar materials joining by laser. **Welding Technology**. (50-2): 69-73
- M.J. Torkamany, S. Tahamtan and J. Sabbaghzadeh, (2010), Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminium alloy by Nd: YAG pulse laser, **Materials and design 31 (2010)**, pp. 458-465.
- M. J. RATHOD and M. KUTSUNA (2004), Joining of aluminium alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding, **WELDING RESEARCH**, January 2004, pp.16-26.
- Takehiko Watanabe, Hirofumi Takayama and Atsushi Yanagisawa (2006), Joining of Aluminium alloy to steel by friction stir welding, **Journal of Materials Processing Technology**, pp. 342-349.
- 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
- ภูษิต มิตรสมหวัง, รัตนบริสุทธิกุล, ศิริรัตน์ รัตนจันทร์ และ โยชิฮารุ มูโต(2552), การศึกษาความเป็นไปได้ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับอะลูมิเนียมผสมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมทิก, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4-7พฤศจิกายน 2552, จังหวัดเชียงใหม่

- รัตน์บริสุทธุกุล, สุกิจ พอใจ, อำไพศรี ไหวพริบ, อุบลวรรณ ว่องกิตติพงษ์ และ ชิตพงษ์ สารปริง (2555), ผลของแท่งโลหะรองหลังงานเชื่อมต่อชิ้นงานโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียม, **วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 55**, มกราคม-เมษายน 2555, หน้า 12-17.
- ภูษิต มิตรสมหวัง และ รัตน์บริสุทธุกุล (2553), อิทธิพลของตัวแปรงานเชื่อมต่อคุณภาพของรอยเชื่อมโลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 5052-H32, **วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 52**, มกราคม-เมษายน 2553, หน้า 13-18
- ภูษิต มิตรสมหวัง และ รัตน์บริสุทธุกุล (2551), การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับอะลูมิเนียมเกรด 5052, **วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 51**, กันยายน-ธันวาคม 2551, หน้า 21-25.
- G. Sierra, P. Peyre, F. DeschauxBeaume, D. Stuart and G. Fras (2008). Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes, **Materials Characterization 59(2008)**, pp. 1705-1715.
- H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He and H. Hackl (2007). Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium-zinc-coated steel joint made by a modified metal inert gas welding-brazing process, **Materials Characterization 58(2007)**, pp. 588-592.
- Cuo, Q. W., Wang, G. S., Guo, G. C. (2009), Binary alloy phase diagram of nonferrous metal. **Chemical industry press**, Beijing.
- R. Cao, Gang Yu, J. H. Chen, Pei-Chung Wang (2013), Cold metal transfer joining aluminium alloy-to-galvanized mild steel, **Journal of Materials Processing Technology 213(2013)**, pp.1753-1763.
- K. Bouche, F. Barbier, A. Coulet, (1998), Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium, **Materials Science and Engineering A249 (1998)**, pp.167-175.
- L. Shao, Y. Shi, J.K. Huang, S.J. Wu (2014), Effect of joining parameter on microstructure of dissimilar metal joints between aluminium and galvanized steel, **Materials and Design (2014)**.
- RattanaBorrisutthekul, Taisei Yachi, Yukio Miyashita and Yoshiharu Mutoh (2007), Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminium alloy, **Materials Science & Engineering A (2007)**, pp.108-113.

## บทที่ 4

### ผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อความทนทานของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

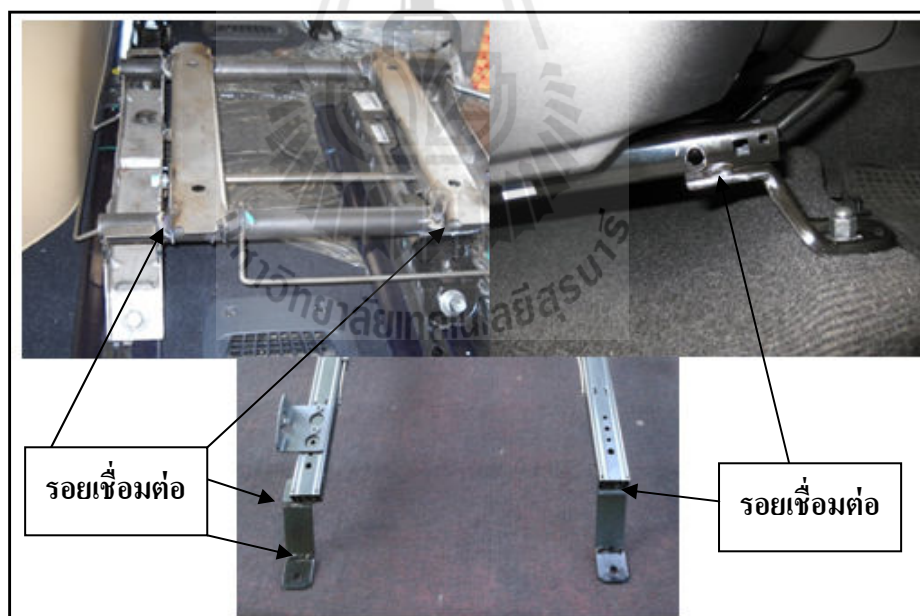
#### 4.1 บทคัดย่อ

การศึกษานี้จะทำการศึกษาผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อความทนทาน (durability) ของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น โดยทำการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงเฉือนภายหลังทิ้งไว้ในบรรยากาศที่เอื้อให้เกิดการกัดกร่อนเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วัน และการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อความล้าเท่านั้นจากผลการทดสอบความทนทาน 1) ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเฉือนภายหลังทิ้งไว้ในสภาวะกัดกร่อน พบว่าชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดทั้งเหล็กกล้าแผ่นเปลือยและเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมจะมีความสามารถในการรับแรงต่ำลงเมื่อทิ้งไว้ในสภาวะกัดกร่อนเป็นเวลานานขึ้นและเกิดการกัดกร่อนขึ้นที่ขอบรอยเชื่อมเหมือนกันหมด ดังนั้นไม่ว่าเหล็กที่นำมาเชื่อมจะเป็นแผ่นเปลือยหรือแผ่นเคลือบสังกะสีสามารถเกิดการกัดกร่อนขึ้นที่รอยเชื่อมได้เช่นเดียวกันและการมีชั้นเคลือบสังกะสีอยู่ไม่ทำให้รอยเชื่อมต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากชั้นเคลือบสังกะสีถูกทำให้เสื่อมสภาพไปในขณะทำการเชื่อมแล้ว และ 2) ผลการทดสอบความต้านทานต่อความล้าพบว่าไม่ว่าเหล็กกล้าแผ่นที่นำมาเชื่อมจะเป็นเหล็กกล้าแผ่นเปลือยหรือเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี จะให้ระดับของ F-N ใกล้เคียงกัน และจะสามารถต้านทานต่อความล้าได้ที่จำนวนรอบสูงขึ้นเมื่อระดับแรงดึงสูงสุดต่ำลง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ชั้นเคลือบสังกะสีไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานต่อความล้าเนื่องจากชิ้นงานเชื่อมภายใต้การทดสอบความต้านทานต่อความล้าเกิดการขาดที่โลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งหมด

#### 4.2 บทนำ

เพื่อให้เกิดความมั่นใจในคุณภาพของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียมว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริง มีความทนทาน อุตสาหกรรมผู้ประยุกต์ใช้งานรอยเชื่อมจำเป็นต้องทำการทดสอบความทนทานของรอยเชื่อม ในการศึกษาความทนทานของชิ้นงานเชื่อมนี้ถ้าดูในมิติของการใช้งานหลักๆควรมีการทดสอบสองลักษณะคือมิติ

ของความทนทานของรอยเชื่อมต่อสภาวะที่กักกรองและทนต่อสภาวะการรับภาระกรรมซ้ำๆ เนื่องจากการใช้งานจริงของรถยนต์มีโอกาสสัมผัสกับสภาวะอากาศที่เอื้อให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงดังที่กล่าวไว้ในเนื้อหาบทที่ 1 และ 2 โดยบรรยากาศที่เอื้อให้เกิดการกัดกร่อนมากที่สุดคือบรรยากาศที่มีคลอไรด์ไอออน ออกซิเจน และอากาศที่มีความชื้นสูง บรรยากาศเหล่านี้จะเหนี่ยวนำให้ชิ้นส่วนรถยนต์เกิดการกัดกร่อนได้เร็วยิ่งขึ้นและทำให้อายุการใช้งานสั้นลงนอกจากนี้การใช้งานชิ้นส่วนรถยนต์ในหนึ่งคันขณะใช้งานมักมีภาระกรรมซ้ำๆ ในลักษณะเป็น Cyclic loading ที่ส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าเมื่อชิ้นงานเชื่อมนั้นถูกแรงซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) มากกระทำในลักษณะซ้ำที่สามารถพบได้บ่อยในการใช้งานจริงของรถยนต์ เช่น ชิ้นส่วนที่ทำเป็นรางเบาะเลื่อนหน้าในรถยนต์ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งชิ้นส่วนบริเวณนี้มีโอกาสใช้โครงสร้างผสมที่ประกอบขึ้นด้วยโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมขณะใช้งานเลื่อนเบาะรถยนต์บริเวณนี้มีแนวโน้มที่จะได้รับแรงในรูปแบบของแรงเลื่อนอันเกิดจากแรงกระแทกซ้ำไปมาอยู่ตามจำนวนรอบการเลื่อนเบาะรถหรือได้รับแรงคดเนื่องจากการโค้งงอของตัวถังรถ



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างรางเบาะเลื่อนรถยนต์

แม้จะมีความต้องการผลการศึกษาความทนทานของรอยเชื่อมต่อแต่รายงานวิจัยการศึกษาความทนทานของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเปลือย เหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี



กับโลหะผสมอะลูมิเนียมต่อแรงดึงเดือนเมื่อทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศการกัดกร่อนสูงและความล้า นั้นมีรายงานการวิจัยอยู่ไม่มากนัก ซึ่งในอดีตการศึกษาความต้านทานต่อความล้า นั้นมีการศึกษา เฉพาะการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน เช่น การศึกษาความทนทานของงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นต่างๆ ด้วยกระบวนการเชื่อม Spot welding (S. K. KHANNA, 2010) พบว่าชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่น ต่างๆจะสามารถต้านทานต่อความล้าได้ต่ำลงเมื่อระดับของ Load amplitude นั้นสูงขึ้น ทำให้ผล การศึกษาความทนทานของรอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมยังไม่เพียงพอ ยิ่งกว่านั้นยังไม่มีการศึกษาผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็กต่อความทนทานของชิ้นงานเชื่อม ด้วยเหตุนี้งานวิจัยส่วนนี้จึงได้ทำการศึกษาความทนทานของชิ้นงานเชื่อม โดยต้องการศึกษาผลของ ชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อความทนทานของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่าง เหล็กกล้าแผ่นคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น

### 4.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ด้วยงานวิจัยในส่วนนี้เป็นงานวิจัยส่วนที่สองที่ทำการศึกษาต่อออกจากงานวิจัยส่วนแรกคือ การศึกษาผลของชั้นสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อความทนทานของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิด ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียม ดังนั้นในงานวิจัยส่วนที่สองนี้จะทำการ เชื่อมชิ้นงาน 2 กรณีการเชื่อมเช่นเดียวกับงานวิจัยส่วนแรกคือ

1) การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย (ไม่มีชั้นเคลือบสังกะสี) กับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A5052 ความหนาของชิ้นงานเชื่อม 1.0 มิลลิเมตร ซึ่งต่อไปในรายงานระบุในชื่อกรณีการเชื่อม เหล็กกล้าแผ่นเปลือย

2) การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบ (มีชั้นเคลือบสังกะสีหรือ Galvanized Steel) กับโลหะ ผสมอะลูมิเนียมเกรด A5052 ความหนาของชิ้นงานเชื่อม 1.0 มิลลิเมตร ซึ่งต่อไปในรายงานระบุใน ชื่อกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี

และส่วนผสมทางเคมีและสมบัติเชิงกลของโลหะพื้นที่จะนำมาเชื่อม แสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ เช่นเดียวกับงานวิจัยส่วนแรก ส่วนขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 การเตรียมชิ้นงาน

ในขั้นตอนของการเตรียมชิ้นงานนั้นจะกระทำการเช่นเดียวกันกับงานวิจัยส่วน แรก แต่ขนาดชิ้นงานเชื่อมจะเปลี่ยนแปลงดังนี้

4.3.1.1 การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (Galvanized Steel) ทำการเตรียมชิ้นงาน โดยทำการตัดเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี SCGA 270C ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น Hydraulic Guillotine Shears (CNTA3150/63A) ดังรูปที่ 3.1 ให้ได้ขนาด (150)x(150)x(1) มิลลิเมตร และทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม โดยทำการเช็ดด้วยเอทานอลแล้วเป่าแห้ง

4.3.1.2 การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเปลือย ทำการเตรียมชิ้นงาน โดยทำการตัดเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี SCGA 270C ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น Hydraulic Guillotine Shears (CNTA3150/63A) ดังรูปที่ 3.1 ให้ได้ขนาด (150)x(150)x(1) มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการเจียรนัยราบผิวเพื่อกำจัดชั้นเคลือบสังกะสีออกด้วยเครื่องเจียรนัยราบผิวงาน Horizontal Surface Grinders (BRH20.02) ดังรูปที่ 3.2 โดยจะทำการเจียรนัยราบผิวเพียงด้านเดียวคือด้านที่สัมผัสกับโลหะผสมอะลูมิเนียมในการเชื่อมและเพื่อให้แน่ใจได้ว่าชั้นสังกะสีจะถูกกำจัดออกหมดผู้วิจัยได้ทำการวัดความหนาของชั้นสังกะสีซึ่งมีความหนาสูงสุดประมาณ 10 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ผู้วิจัยจึงทำการเจียรนัยราบผิวออกไปทั้งสิ้นไม่เกิน 50 ไมครอน ดังนั้นขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเปลือยก่อนทำการเชื่อมจะมีขนาด (150)x(150)x(1±0.05) มิลลิเมตร และทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม โดยทำการเช็ดด้วยเอทานอลแล้วเป่าแห้ง

4.3.1.3 การเตรียมชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่น ทำการเตรียมชิ้นงาน โดยทำการตัดโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นเกรด A5052 ด้วยเครื่องตัดโลหะแผ่น Hydraulic Guillotine Shears (CNTA3150/63A) ดังรูปที่ 3.1 ให้ได้ขนาด (150)x(150)x(1) มิลลิเมตร และทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม โดยทำการขัดหยาบผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 เพื่อกำจัดออกไซด์ฟิล์มของโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นและเช็ดด้วยเอทานอลแล้วเป่าแห้ง

#### 4.3.2 การเชื่อม

สำหรับขั้นตอนการเชื่อมนั้นผู้วิจัยได้กำหนดให้วางชิ้นงานในลักษณะซ้อนเกยให้เหล็กกล้าแผ่นอยู่ด้านบนเช่นเดียวกับงานวิจัยส่วนแรกดังแสดงรูปที่ 3.2 โดยในขั้นตอนของการเชื่อมผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องเชื่อม Tungsten Inert gas ยี่ห้อ HOBART รุ่น TIGWAVE 350 AC/DC ดังรูปที่ 3.5 และได้กำหนดสภาวะในการเชื่อมโดยมีรายละเอียดดังนี้และได้กำหนดสภาวะในการเชื่อมโดยมีรายละเอียดดังนี้

- ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ DCEN
- ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมคงที่ 0.60 เมตรต่อนาที
- กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 140 แอมแปร์
- ใช้แก๊สอาร์กอนในการปกคลุมรอยเชื่อมด้วยอัตราการไหล 8.0 ลิตรต่อนาที



- แท่งอิเล็กโทรดชนิด EWTn-2 (สีแดง) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร
- ระยะห่างระหว่างผิวชิ้นงานกับปลายอิเล็กโทรด 2.4 มิลลิเมตร
- ระยะห่างระหว่างปลายTorch กับปลายอิเล็กโทรด 3.2 มิลลิเมตร

#### 4.3.3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเดือนของชิ้นงานเชื่อมหลังถูกทิ้งไว้ในสภาวะเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง

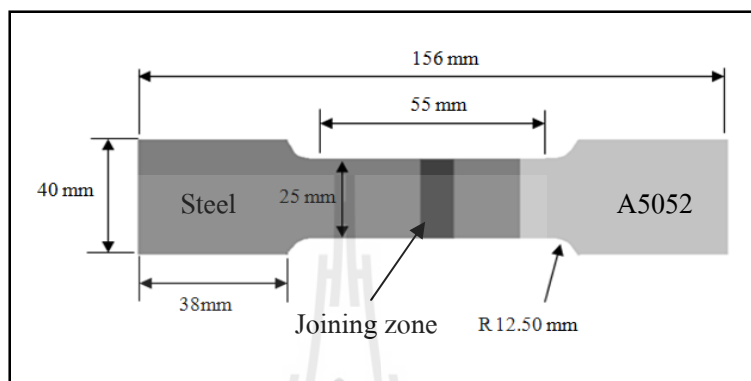


รูปที่ 4.2 แสดงภาชนะและการจุ่มแช่ชิ้นงานเชื่อมในสารละลายเกลือ

หลังจากที่ทำการเชื่อมแล้วเสร็จจะนำชิ้นงานเชื่อมไปทำการตัดด้วยลวด (Wire cut) โดยทำการตัดโดยบริษัทโคราชพรีซิชั่นจำกัด ให้ได้ขนาดดังรูปที่ 3.5 แล้วทำการถ่ายภาพเพื่อเก็บข้อมูลก่อนนำไปไว้ในสภาวะกัดกร่อน โดยนำไปจุ่มแช่ในภาชนะที่บรรจุสารละลายเกลือ (NaCl) เข้มข้น 10% และปิดภาชนะให้แน่นเพื่อรักษาให้ความเข้มข้นของสารละลายคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และทิ้งไว้ในสารละลายเกลือนี้เป็นเวลาต่างกันตั้งแต่ 0-30 วัน (ห่างกันอย่างละ 10 วัน) และเมื่อครบเวลาตามกำหนดในแต่ละครั้งนำชิ้นงานไปล้างและทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดและล้างด้วยแอลกอฮอล์อีกครั้งทำการถ่ายภาพชิ้นงานภายหลังกจุ่มแช่ในสารละลายเกลือ และนำชิ้นงานไปทำการทดสอบแรงดึงเดือนด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเดือน Universal testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5582 (100kN) ดังรูปที่ 3.7

#### 4.3.4 การทดสอบความต้านทานต่อความล้า

ภายหลังทำการเชื่อมแล้วเสร็จนำชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณีการเชื่อมไปตัดด้วยลวด (Wire cut) โดยทำการตัดโดยบริษัทโคราชพรีซิชั่นจำกัด ให้ได้ขนาดดังแสดงในรูปที่ 4.3 เพื่อให้ได้ชิ้นงานเชื่อมสำหรับทดสอบความล้า ก่อนการทดสอบทำการวัดขนาดของชิ้นงานแล้วบันทึกข้อมูล



รูปที่ 4.3 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบความล้า

โดยในการทดสอบความล้าผู้วิจัยได้ใช้เครื่องทดสอบความล้า INSTRON 8801 ดังรูปที่ 4.4 และกำหนดสภาวะในการทดสอบความล้าดังนี้

1. ลักษณะของแรงที่กระทำ Cyclic loading ใน โหมดของ Tensile-tensile loading
2. Frequency หรือจำนวนของรอบการทดสอบต่อระยะเวลาโดยกำหนดให้เท่ากับ 3 เฮิร์ต
3. Load Amplitude หรือปริมาณของโหลดที่กระทำต่อชิ้นงาน โดยหาได้จากสมการที่ 4.1

$$LoadAmplitude(F_a) = \frac{Maximumload(F_{max}) - Minimumload(F_{min})}{2} \quad (4.1)$$

4. Mean Load หรือค่าเฉลี่ยของปริมาณของโหลดที่กระทำต่อชิ้นงาน โดยหาได้จากสมการที่ 4.2

$$Mean Load(F_m) = \frac{MaximumLoad(F_{max}) + MinimumLoad(F_{min})}{2} \quad (4.2)$$

5. Load ratio ( $R$ ) = 0.1

6. ระดับของ Maximum load 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 และ 1.5 kN และสามารถคำนวณหาค่า Maximum Load, Minimum Load, Load amplitude และ Means Load ในแต่ละสภาวะการทดสอบได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 เครื่องทดสอบความล้า INSTRON 8801

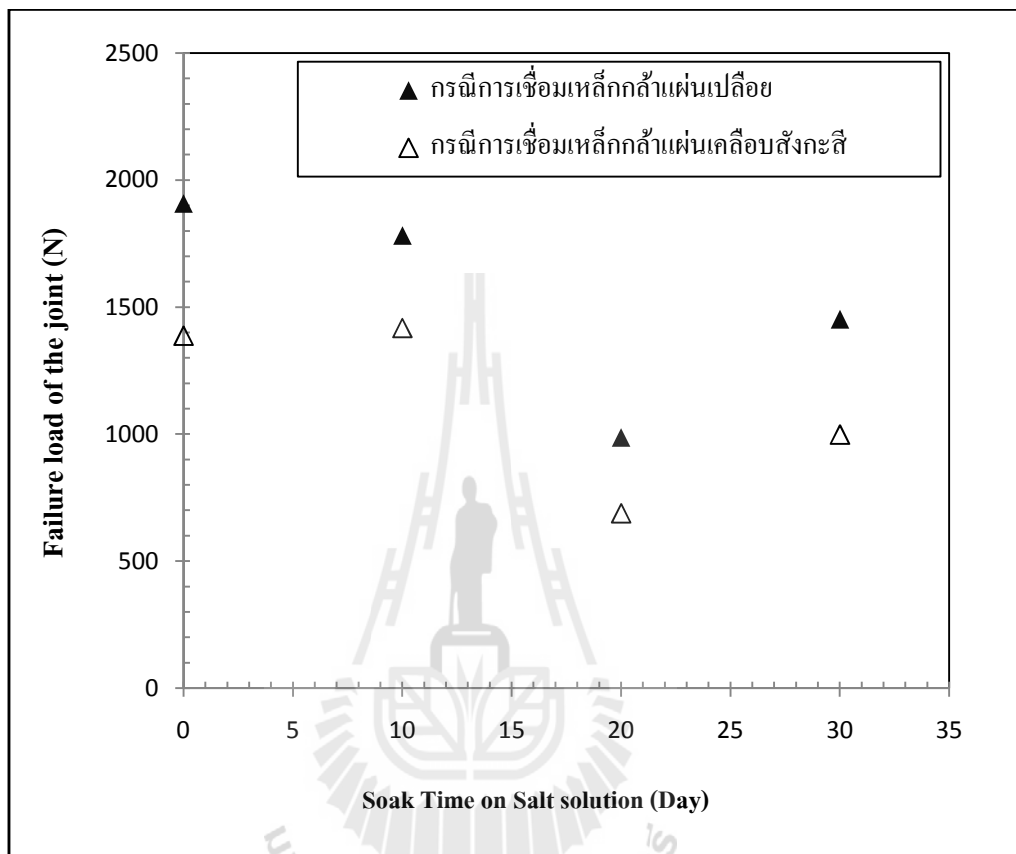
ภายหลังทำการทดสอบนำข้อมูลที่ได้อมาพล็อตกราฟเพื่อหา S-N curve และนำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักด้วยกล้อง Stereo Leica EZ4 และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ร่วมกับ EDS รุ่น FE-SEM (JEOL JSM 7800F)

ตารางที่ 4.1 แสดงสภาวะการทดสอบความล้าของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณี

$F_{\max}$ (kN)	$F_{\min}$ (kN)	$F_a$ (kN)	$F_m$ (kN)	R	Frequency (Hz)
1.5	0.15	0.675	0.825	0.1	3
1.4	0.14	0.630	0.770	0.1	3
1.3	0.13	0.585	0.715	0.1	3
1.2	0.12	0.540	0.660	0.1	3
1.1	0.11	0.495	0.605	0.1	3
1.0	0.10	0.450	0.550	0.1	3

#### 4.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

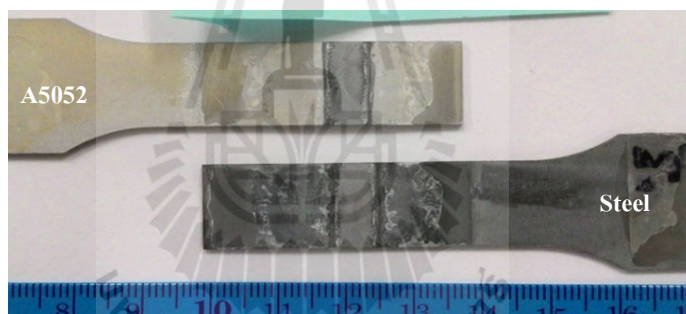
##### 4.4.1 ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมหลังทิ้งไว้ในสภาวะกักคร่อน



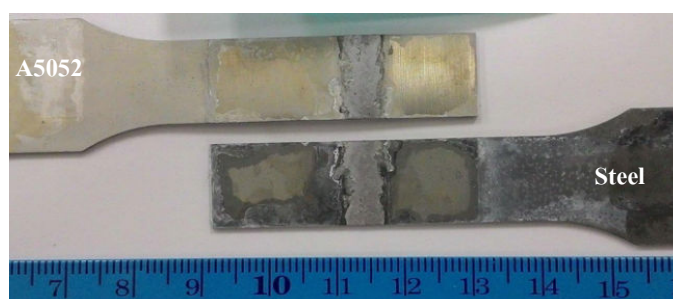
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงเนื่องกับเวลาในการจุ่มแช่สารละลายเกลือของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียม

จากการทดสอบแรงดึงเนื่องของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณีภายหลังทิ้งไว้ในสภาวะกักคร่อนเป็นเวลา 1020 และ 30 วัน ได้ผลแสดงดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานกับระยะเวลาในการจุ่มแช่ในสารละลายเกลือเทียบกับชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ได้ทำการจุ่มแช่ในสารละลายเกลือหรือ 0 วัน ดังรูปที่ 4.5 จากรูปพบว่าชิ้นงานเชื่อมกรณีเหล็กกล้าแผ่นเปลือยจะสามารถรับแรงได้สูงกว่ากรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีในทุกๆระยะการเก็บรักษา และทั้งสองกรณีการเชื่อม ชิ้นงานเชื่อมความสามารถในการรับแรงมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อระยะเวลาในการจุ่มแช่สารละลายเกลือเป็นเวลานานขึ้น โดยที่ชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณีการเชื่อมเมื่อเวลาในการปล่อยทิ้งไว้ในสารละลายเกลือ 10 และ 20 วัน ในช่วงนี้ค่าความสามารถในการรับแรงจะยังคงไม่

แน่นอนเนื่องจากว่าค่าความสามารถในการรับแรงยังไม่ได้ลดลงอย่างต่อเนื่องแต่จะขึ้นลงอย่างไม่มีนัยสำคัญใดๆ แต่สุดท้ายเมื่อเวลาในการปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะการกัดกร่อน 30 วัน พบว่าทั้งสองกรณีการเชื่อมชิ้นงานมีความต้านต่อแรงดึงเดือนได้ต่ำลง โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะกัดกร่อนหรือ 0 วันพบว่า ชิ้นงานเชื่อมกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียมมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเดือนลดลง 23.8 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเดือนลดลง 28.01 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ผลการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่ผู้วิจัยในข้อที่ 3 บทที่ 1 ว่าเมื่อนำชิ้นงานทิ้งไว้ในสภาวะเกิดการกัดกร่อนเป็นระยะเวลาานอาจจะทำให้ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมไม่ว่าเหล็กกล้าที่นำมาเชื่อมจะเป็นแผ่นเปลือยหรือแผ่นเคลือบสังกะสีต่ำลงการแตกหักของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณีการเชื่อมเกิดการแตกหักขึ้นที่ชั้นผิวสัมผัสรอยต่อ (Interfacial layer) ที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound layers) ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.6

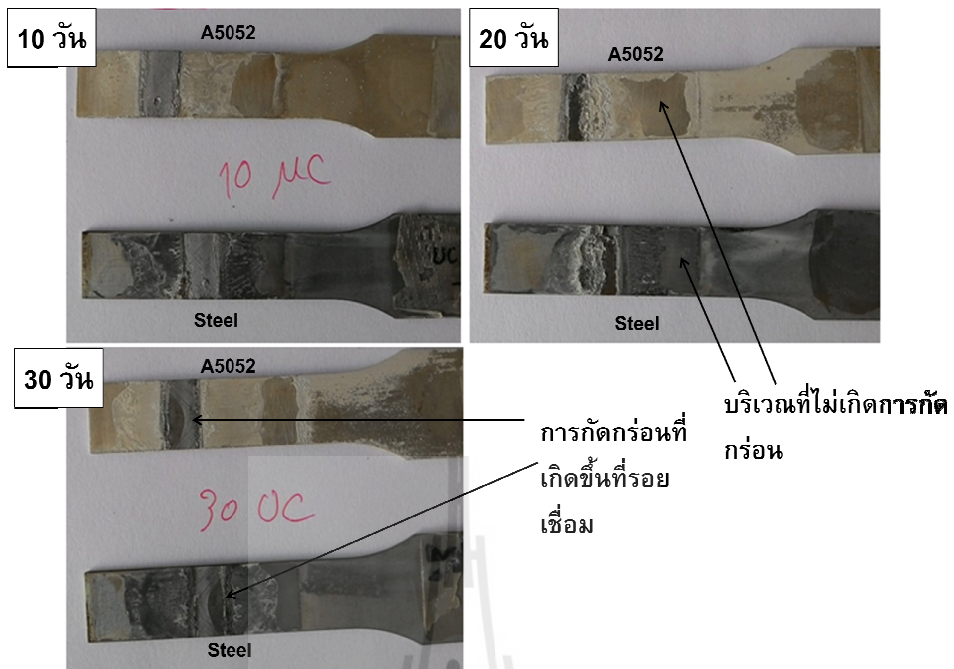


A) กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย

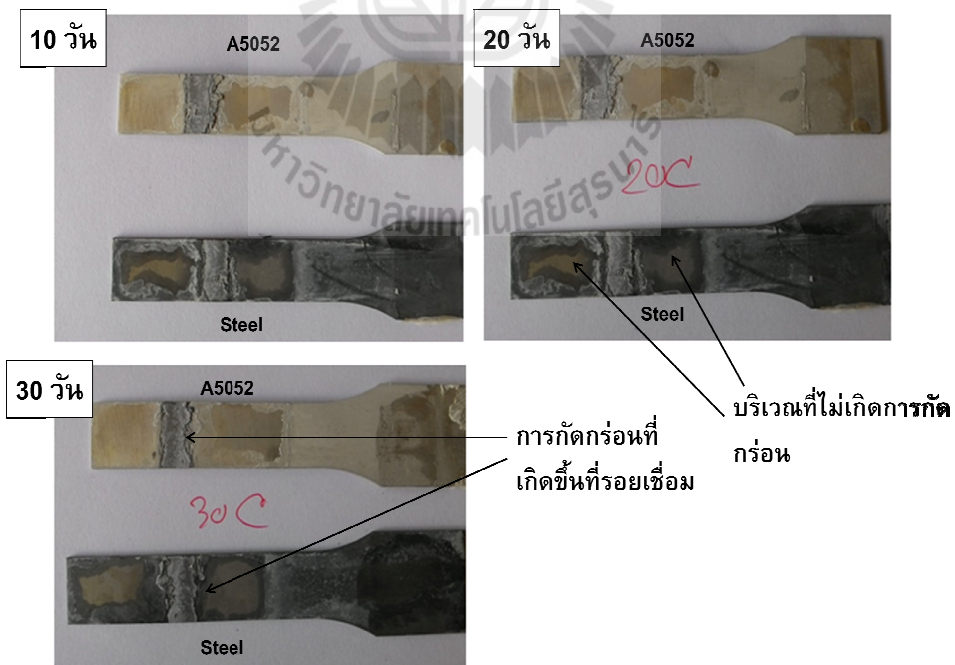


B) กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี

รูปที่ 4.6 ชิ้นงานที่จุ่มแช่ในสารละลายเกลือ 30 วัน หลังทดสอบแรงดึงเดือน



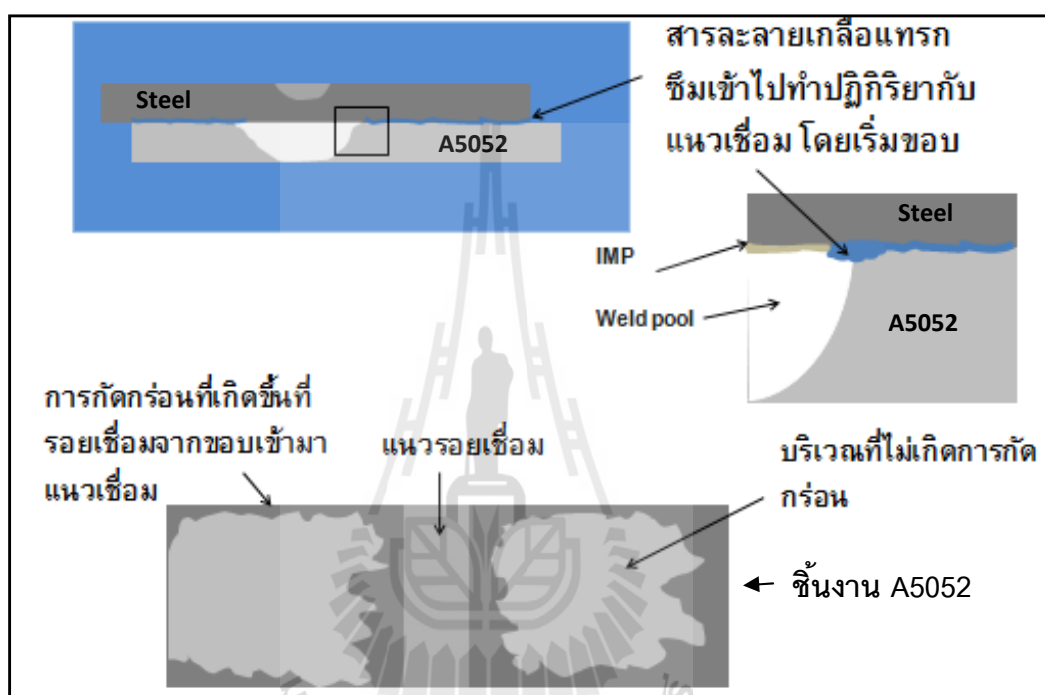
รูปที่ 4.7 ลักษณะผิวชิ้นงานเชื่อมหลังทิ้งไว้ในสารละลายเกลือเป็นเวลา 10 20 และ 30 วัน และทดสอบแรงดึงเหนือน กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย



รูปที่ 4.8 ลักษณะผิวชิ้นงานเชื่อมหลังทิ้งไว้ในสารละลายเกลือเป็นเวลา 10 20 และ 30 วัน และทดสอบแรงดึงเหนือน กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี



และเมื่อทำการตรวจสอบพื้นผิวการหักของชิ้นงานภายหลังการจุ่มแช่ในสารละลายเกลือแล้วทดสอบแรงดึงเดือนพบว่าชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งสองกรณีการเชื่อมทุกชิ้นงานเกิดการกัดกร่อนขึ้นที่ผิวของชิ้นงานเชื่อมและมีทิศทางการกัดกร่อนเข้ามายังรอยเชื่อม โดยเริ่มที่ขอบรอยเชื่อมทั้งฝั่งที่เป็นเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมซ้อกันยกกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8

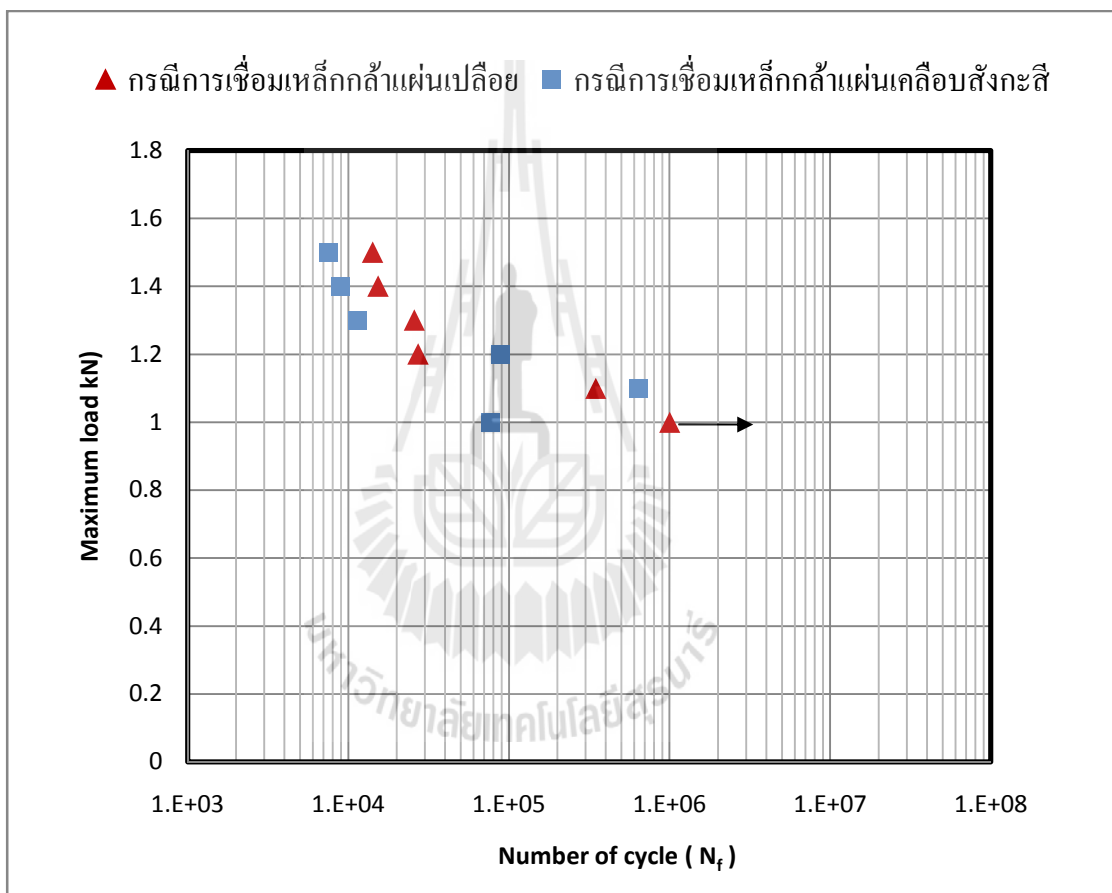


รูปที่ 4.9 แผนภาพลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจากการจุ่มแช่ในสารละลายเกลือ

อย่างไรก็ตามการทดสอบการกัดกร่อนได้แสดงให้เห็นว่าไม่ว่าเหล็กกล้าแผ่นที่นำมาเชื่อมจะมีชั้นเคลือบสังกะสีอยู่หรือไม่ก็ตามหากแต่สามารถเกิดการกัดกร่อนได้เหมือนกันทุกชิ้นงานเชื่อมและเกิดการกัดกร่อนขึ้นทั้งเหล็กกล้าและโลหะผสมอะลูมิเนียม อีกทั้งการกัดกร่อนยังเกิดเข้ามายังรอยเชื่อมโดยมีทิศทางเกิดโดยเริ่มจากขอบของชิ้นงาน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแผนภาพในรูปที่ 4.9 โดยเมื่อทำการจุ่มแช่ชิ้นงานเชื่อมในสารละลายเกลือเป็นเวลานานจะทำให้สารละลายเกลือพยายามแทรกซึมเข้ามายังรอยเชื่อมซึ่งเริ่มจากขอบชิ้นงาน โดยอาศัยช่องว่างระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมเข้ามาทำปฏิกิริยากับรอยเชื่อมแล้วเกิดการกัดกร่อนขึ้นในที่สุด ทั้งนี้การมีชั้นเคลือบสังกะสีอยู่ในการเชื่อมนั้นไม่ช่วยให้ชิ้นงานเชื่อมหรือรอยเชื่อมสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีขึ้นเนื่องจากชั้นเคลือบถูกเปลี่ยนแปลงและถูกทำลายไป

ขณะได้รับความร้อนในขณะที่ทำการเชื่อมก่อนหน้าแล้ว ดังนั้นในการทดสอบความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณีการเชื่อมเมื่อทิ้งไว้ในสภาวะกักกร่อนหรือสารละลายเกลือในงานวิจัยนี้ พบว่าการมีชั้นเคลือบสังกะสีอยู่ในการเชื่อมไม่ช่วยชิ้นงานเชื่อมต้านทานต่อการกัดกร่อนและการลดลงของความสามารถในการรับแรง

#### 4.4.2 ความสามารถในการต้านทานต่อความล้าของชิ้นงานเชื่อม

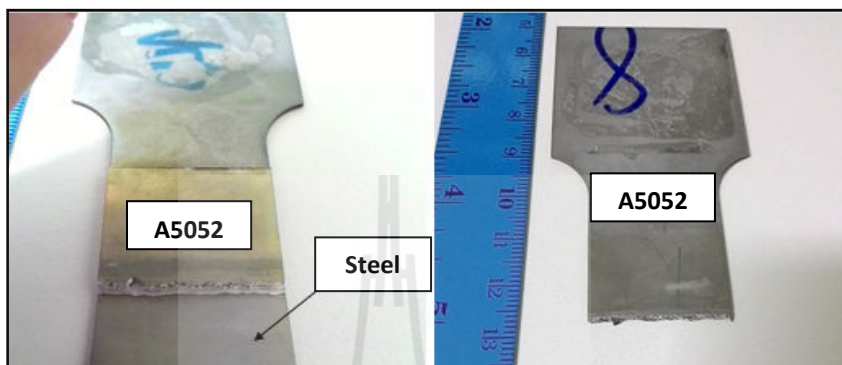


รูปที่ 4.10 F-N curve ของชิ้นงานเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับ โลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งสองกรณี

จากการทดสอบความต้านทานต่อความล้าของชิ้นงานเชื่อมทั้งกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยและกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี ได้ผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงดึงสูงสุดกับจำนวนรอบหรือ F-N curve ได้ดังรูปที่ 4.10 พบว่าทั้งสองกรณีการเชื่อมให้กราฟ F-N curve ที่ใกล้เคียงกันและทั้งสองกรณีการเชื่อมยังสามารถต้านทาน



ต่อความล้าได้ที่จำนวนรอบสูงขึ้นเมื่อระดับแรงดึงสูงสุดต่ำลง ภายหลังจากทดสอบความล้าชิ้นงานเชื่อมเกิดการขาดที่โลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ยกเว้นชิ้นงานเชื่อมกรณีเหล็กกล้าแผ่นเปลือยที่ระดับแรงดึงสูงสุด 1.0kN ที่พบว่าชิ้นงานที่ไม่ขาดซึ่งสามารถต้านทานต่อความล้าที่จำนวนรอบมากกว่าล้านรอบ



A) กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย

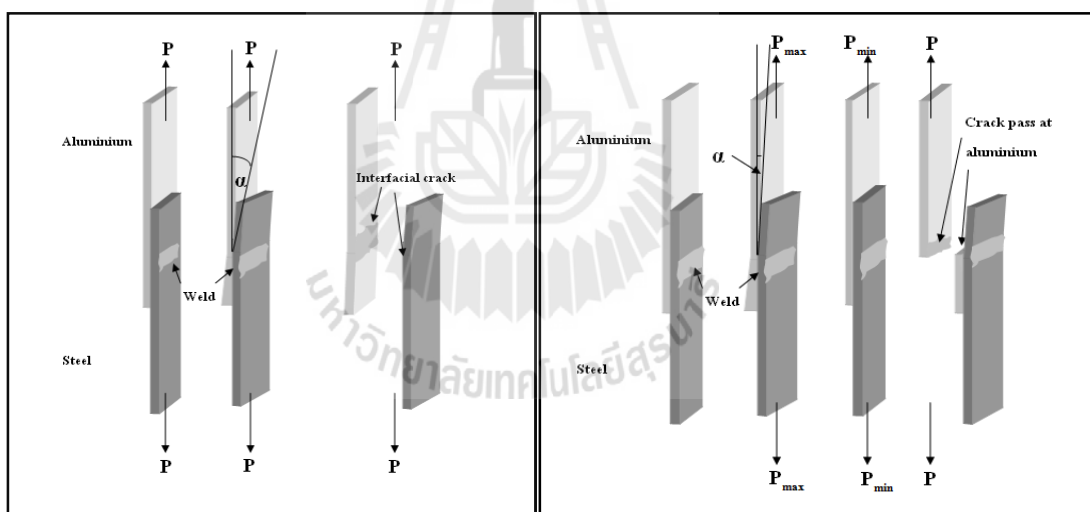


B) กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี

รูปที่ 4.11 ลักษณะการรอยแตกหลังทดสอบความล้า

จากผลการทดสอบความล้าดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่แตกต่างจากสมมติฐานการวิจัยที่ผู้วิจัยคาดว่าความต้านทานต่อความล้าของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีน่าจะต่ำกว่ากรณีเหล็กกล้าแผ่นเปลือยที่เป็นเช่นนี้ผู้วิจัยคาดว่าน่าจะเกิดการขยายตัวของรอยแตกเนื่องจากความล้าไปทางโลหะผสมอะลูมิเนียมมีความสำคัญกว่าดังจะเห็นจากการขาดของชิ้นงานรอยแตกของชิ้นงานเชื่อมกรณีเหล็กกล้าแผ่นเปลือยสามารถต้านทานต่อความล้าได้สูงกว่าชิ้น

สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอในกรณีชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีที่ปรากฏรอยแตกเกิดขึ้นที่ขอบของบ่อหลอมถึงแม้จะมีความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมากกว่ากรณีเหล็กกล้าแผ่นเปลือยก็ตาม แสดงให้เห็นว่ารอยแตกที่แสดงตัวเป็นจตุรรวมศูนย์ความเค้นนั้นมีผลต่อความสามารถในการต้านทานต่อความล้าของชิ้นงานเชื่อมที่ระดับโหลดสูงๆอย่างมาก โดยกลไกการเกิดความล้าจะเกิดเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีความเค้นรวมศูนย์ (Stress Concentration) ในบริเวณนั้น และในระยะที่สอง เมื่อมีความเค้นเข้าไปซ้ำมารอยแตกนี้ก็จะมีแนวโน้มเรื่อยๆ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด วัสดุก็จะแตกหักจากกันนอกจากนี้แล้วผู้วิจัยพบว่าชิ้นงานเชื่อมที่ทำการทดสอบความต้านทานต่อความล้าจะเกิดการแตกหักผ่านโลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งหมดซึ่งแตกต่างไปจากกรณีการทดสอบแรงดึงเนื่องที่ชิ้นงานเกิดการแตกหักผ่านชั้นสารประกอบเชิงโลหะซึ่งสามารถอธิบายการแตกหักที่แตกต่างกันในการทดสอบความล้าและทดสอบแรงดึงเนื่องได้ดังรูปที่ 4.12



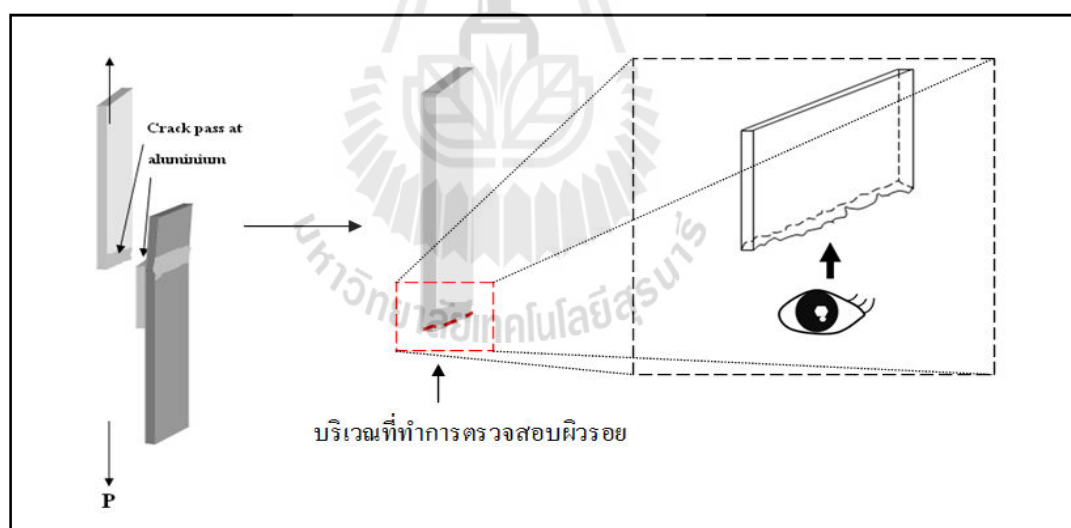
A) กรณีการทดสอบแรงดึงเนื่อง

B) กรณีการทดสอบความล้า

รูปที่ 4.12 แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดการแตกหักที่แตกต่างกันในการทดสอบแรงดึงเนื่องและทดสอบความล้าของชิ้นงานเชื่อม

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าในกรณีการทดสอบแรงดึงเนื่อง ชิ้นงานเชื่อมจะถูกดึงโดยแรงดึงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งชิ้นงานเชื่อมแยกออกจากกันระหว่างเหล็กกล้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียมและทำ

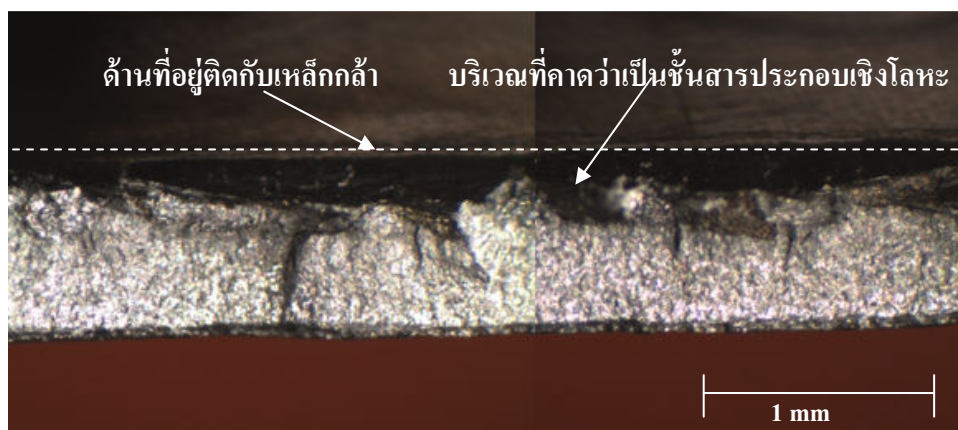
มุมระหว่างกันสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เป็นมุมแอลฟา ( $\alpha$ ) ทำให้การเปิดของรอยแตก (Crack opening) เปิดกว้างขึ้นและรอยแตกเล็กที่จะขยายตัวไปยังบริเวณที่อ่อนแอกว่านั้นก็คือบริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะแล้วเกิดการแตกขาดขึ้นตามทิศทางการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะในที่สุด ในขณะที่ในกรณีการทดสอบความล้าของชิ้นงานเชื่อมที่พบว่ามี การเกิดการขาดที่โลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกันทั้งหมด เนื่องจากว่าในการทดสอบความล้าของชิ้นงาน เชื่อมแรงดึงที่ให้กับชิ้นงานเชื่อมจะเป็น Cyclic loading และมีระดับของแรงดึงต่ำกว่ากรณีการ ทดสอบแรงดึงเฉือนมาก มุมระหว่างเหล็กกล้าแผ่นและโลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถเกิดขึ้นได้ น้อยกว่าการเปิดของรอยแตกจึงสามารถเกิดได้สองทิศทางคือ เกิดเข้ามายังเนื้อโลหะผสม อะลูมิเนียมและเกิดตามทิศทางการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ แต่ทว่าแรงดึงที่เป็น Cyclic loading ไม่ได้ให้แรงดึงกับชิ้นงานเชื่อมอย่างต่อเนื่องดังเช่นกับการทดสอบแรงดึงเฉือนที่ Crack opening จะเกิดผ่านมายังชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพียงอย่างเดียว ในการทดสอบความล้ารอยแตก จึงเลือกที่จะขยายตัวเข้ามายังเนื้อโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วย และเมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมมี พื้นที่หน้าตัดในการรับแรงลดลงจนกระทั่งระดับเกินค่า  $K_{IC}$  และเกิดการแตกหักขึ้นในที่สุดนั่นเอง



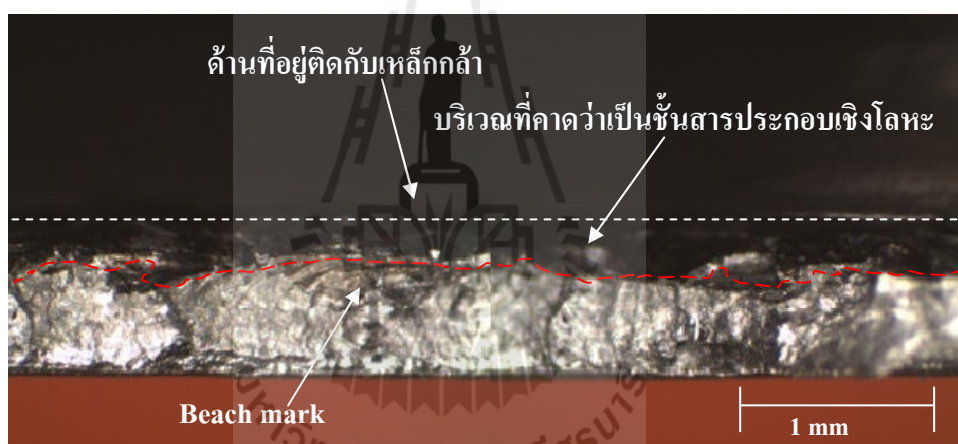
รูปที่ 4.13 แสดงทิศทางในการตรวจสอบผิวการแตกหักของโลหะผสมอะลูมิเนียม

นอกจากนั้นเมื่อทำการตรวจพื้นผิวการแตกหักตามทิศทางดังรูปที่ 4.13 ของชิ้นงาน โลหะผสม อะลูมิเนียมและสามารถแสดงพื้นผิวการแตกหักของโลหะผสมอะลูมิเนียมในกรณีการเชื่อม เหล็กกล้าแผ่นเปลือยและเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ พบว่า ลักษณะผิวการแตกหักของโลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งสองกรณีการเชื่อมไม่แตกต่างกันและผิวการ

แตกหักแสดงการแตกหักที่มีจุดเริ่มต้นของรอยแตกหลายที่ (Multi crack) และยังพบการแตกหักในลักษณะขั้นบันไดหรือ Multi step cracking ซึ่งน่าจะมีจุดเริ่มต้นของรอยแตกมาจากโพรง หลุม หรือบางอย่างที่ไม่ทราบชัดเจน ซึ่งหลุมเหล่านี้เองแสดงตัวเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมกรณีการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเปลือยพบว่าไม่สังเกตเห็นมีทิศทางของความเค้นพุ่งไปยังบริเวณจุดเริ่มต้นของการแตกหักชัดเจน แต่พื้นผิวการแตกหักแบ่งออกเป็นสองส่วนชัดเจนคือ ด้านบนที่ติดกับเหล็กกล้าและคาดว่าบริเวณนี้จะเป็นบริเวณของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเชื่อมดังรูปที่ 4.14 ซึ่งบริเวณที่เกิดการขาดของโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นเกิดขึ้นบริเวณใกล้กับขอบของบ่อหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม แสดงให้เห็นว่าบริเวณขอบบ่อหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถต้านทานต่อความล้าได้ต่ำกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะและในกรณีเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีพบว่าพื้นผิวการแตกหักมีลักษณะที่ขรุขระและแสดงให้เห็น beach mark ที่เกิดจากการรับแรงซ้ำไปมาเกิดขึ้นที่ชิ้นงานที่สามารถต้านทานต่อความล้าได้ที่จำนวนรอบสูงๆ พุ่งไปยังบริเวณที่มีการก่อตัวของสารประกอบเชิงโลหะซึ่งบริเวณนี้เองมีรอยแตกเกิดขึ้นในขั้นตอนของการเชื่อม โดยบริเวณที่เกิดการขาดของโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นเกิดขึ้นบริเวณใกล้กับขอบของบ่อหลอมอะลูมิเนียม ซึ่งบริเวณนี้พบว่ามียอยแตกเกิดขึ้นในขณะที่ทำการเชื่อมอยู่ก่อนแล้วจึงทำให้บริเวณนี้เองเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกและด้วยมีศูนย์รวมความเค้นอยู่ตรงรอยแตกนี้สูงมาก การแตกขาดจึงมักขาดบริเวณที่มีรอยแตกนี้อยู่และมีการขยายตัวของรอยตัวไปในทิศทางของโลหะผสมอะลูมิเนียมจนกระทั่งโลหะผสมอะลูมิเนียมเกิดการขาดออกจากกันดังรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าบริเวณขอบบ่อหลอมที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่สม่ำเสมอและการพบรอยแตกของกรณีชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีจะเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกและเมื่อมีความเค้นซ้ำไปซ้ำมารอยแตกนี้ก็จะได้ขึ้นเรื่อย ๆ และจะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของอะลูมิเนียมลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด โลหะผสมอะลูมิเนียมก็จะแตกหักจากกัน ดังนั้นที่กล่าวมานี้จึงเป็นสาเหตุที่ว่าไม่ว่าเหล็กกล้าแผ่นที่ทำมาเชื่อมจะเป็นเหล็กกล้าแผ่นเปลือยหรือเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีก็ตาม ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานต่อความล้าที่แตกต่างกัน เพราะทุกชิ้นงานเกิดการขาดที่โลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งหมดและให้ระดับของ F-N curve ไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.14 รอยแตกที่เกิดขึ้นบนโลหะผสมอะลูมิเนียมในกรณีชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย หลังทดสอบความล้าที่ปริมาณโหลด 1.2kN (ชิ้นงานขนาดที่จำนวน 27222 รอบ)



รูปที่ 4.15 รอยแตกที่เกิดขึ้นบนโลหะผสมอะลูมิเนียมในกรณีชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบ หลังทดสอบความล้าที่ปริมาณโหลด 1.2kN (ชิ้นงานขนาดที่จำนวน 88697 รอบ)

#### 4.5 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. ชิ้นงานเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ทิ้งไว้ในสภาวะเกิดการกัดกร่อนเป็นระยะเวลานานทำให้ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมต่ำลงไม่ว่าเหล็กกล้าที่นำมาเชื่อมจะเป็นแผ่นเปลือยหรือแผ่นเคลือบสังกะสี เหตุที่เป็นเช่นนี้ ผู้วิจัยเชื่อว่าน่าจะเกิดจากขณะเชื่อมชั้นสังกะสีบริเวณขอบของรอยเชื่อมน่าจะเสื่อมสภาพไปหมดแล้ว ยิ่งไปกว่านั้นผู้วิจัยยังพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ทิ้งไว้ในสภาวะการกัดกร่อนอย่างยาวนาน

น่าจะประกอบไปด้วยลักษณะของผิวของชิ้นงานเชื่อมบริเวณปลายของรอยเชื่อมติดและลักษณะของการเชื่อมเกินกว่าขีดกันเพียงใด

2. หลังการทดสอบความล้าของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งสองกรณี การเชื่อมพบว่าชิ้นงานเชื่อมสามารถทนต่อความล้าได้ที่จำนวนรอบมากขึ้นเมื่อได้รับแรงดึงสูงสุดที่ลดลง นอกจากนี้ความสามารถในการทนทานต่อความล้าของชิ้นงานทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน และการแตกหักของชิ้นงานทดสอบเกิดผ่านเนื้อโลหะผสมอะลูมิเนียม ซึ่งบ่งชี้ว่าชิ้นเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็กกล้าไม่น่ามีผลต่อความทนทานต่อความล้าของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิด

#### 4.6 รายการอ้างอิง

S. K. KJANNA and X. LONG, (2010), Fatigue behavior of spot welded joints in steel sheets, **Woodhead Publishing Limited(2010)**, pp.65-100.

V.-X. Tran, J. Pan, (2010), Fatigue behavior of dissimilar spot friction welds in lap-shear and cross-tension specimens of aluminium and steel sheet, **International Journal of Fatigue** **32(2010)**, pp.1167-1179.

นริน อุทัย, xfer-เบาะ-แถว 3 เลื่อนและหมุนได้, <https://www.h-1club.net.>, 28/2/2557.

<https://humanracing.co.th.>, 28/2/2557.

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

ในอุตสาหกรรมผลิตยานยนต์ในปัจจุบันและอนาคตเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีและโลหะผสมอะลูมิเนียมเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการนำมาผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ดังนั้นการเชื่อมต่อโลหะทั้งสองจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่ด้วยรายงานการวิจัยการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเพื่อศึกษาผลของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการเชื่อมนั้นมีอยู่อย่างจำกัด จึงทำให้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาศึกษาการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชั้นสังกะสีที่เคลือบบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียม จากผลการวิจัยสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. ในการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมแผ่นชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นมีผลทำให้เกิดการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวการเชื่อมติด ซึ่งน่าจะเกิดจากการละลายไม่สมกันอย่างสม่ำเสมอของชั้นเคลือบสังกะสีในขณะที่ทำการเชื่อม และจะหนาที่บริเวณขอบของบ่อหลอม ยังผลให้เมื่อเกิดการแข็งตัวมีความเค้นเกิดขึ้น ซึ่งยังผลให้มีการบรอยแตกขึ้นที่ขอบบ่อหลอมอะลูมิเนียม และรอยแตกดังกล่าวมีผลต่อความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อม ที่โดยปกติค่าความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะมากขึ้น

2. ชั้นเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็กกล้ามีผลทำให้รอยเชื่อมติดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมมีความกว้างมากขึ้น

3. ชิ้นงานเชื่อมระหว่างเหล็กกล้ากับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ทิ้งไว้ในสภาวะเกิดการกัดกร่อนเป็นระยะเวลาานทำให้ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมต่ำลงไม่ว่าเหล็กกล้าที่นำมาเชื่อมจะเป็นแผ่นเปลือยหรือแผ่นเคลือบสังกะสี เหตุที่เป็นเช่นนี้ ผู้วิจัยเชื่อว่าน่าจะเกิดจากขณะเชื่อมชั้นสังกะสีบริเวณขอบของรอยเชื่อมน่าจะเสื่อมสภาพไปหมดแล้ว ยิ่งไปกว่านั้นผู้วิจัยยังพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ทิ้งไว้ในสภาวะการกัดกร่อน

อย่างยาวนานน่าจะประกอบไปด้วยลักษณะของผิวของชิ้นงานเชื่อมบริเวณปลายของรอยเชื่อมติดและลักษณะของการเชื่อมเกยว่าติดกันเพียงใด

4. หลังการทดสอบความล้าของชิ้นงานเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับโลหะผสมอะลูมิเนียมทั้งสองกรณีการเชื่อมพบว่าชิ้นงานเชื่อมสามารถทนต่อความล้าได้ที่จำนวนรอบมากขึ้นเมื่อได้รับแรงดึงสูงสุดที่ลดลง นอกจากนี้ความสามารถในการทนทานต่อความล้าของชิ้นงานทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน และการแตกหักของชิ้นงานทดสอบเกิดผ่านเนื้อโลหะผสมอะลูมิเนียมซึ่งบ่งชี้ว่าชิ้นเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็กกล้าไม่น่ามีผลต่อความทนทานต่อความล้าของชิ้นงานเชื่อมโลหะต่างชนิด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

แม้ว่างานวิจัยจะดำเนินมาได้ระดับหนึ่งแต่ยังมีข้อสงสัยอีกมากที่ต้องการคำตอบเช่น ในการทดสอบความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมภายหลังทิ้งไว้ในสารละลายเกลือ ภาวะที่ใช้ในการจุ่มแช่ชิ้นงานเชื่อมจะต้องระวังไม่ให้บรรยากาศมากเกินไป เนื่องจากในการทดสอบการกัดกร่อนออกซิเจนเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้เร็วขึ้นหรือในการเชื่อมและทดสอบสมบัติเชิงกล ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบแรงดึงเฉือนหรือทดสอบความล้า จะต้องทำการเชื่อมและทดสอบซ้ำมากกว่าสองครั้งต่อหนึ่งสภาวะ เพื่อให้ผลที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้ปริมาณชิ้นงานทดสอบถูกจำกัด จึงไม่สามารถทำการเชื่อมและทดสอบซ้ำได้

ดังนั้นในอนาคตจึงควรมีงานวิจัยต่อไปที่จะยืนยันผลให้แน่ใจมากกว่านี้



ภาคผนวก ก

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งสู่ชิ้นงานขณะทำการเชื่อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานเชื่อมขณะเชื่อม (Heat input,  $q$  (J))

$$q = \frac{IVS}{v}$$

โดยที่  $I$  คือ กระแสไฟในการเชื่อม (A)  
 $V$  คือ Rated Output Voltage (Volts)  
 $v$  คือ ความเร็วในการเชื่อม (m/min)  
 $S$  คือ ความยาวของรอยเชื่อม (m)



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, there is a stylized spire or tower. Below it, a silhouette of a person stands on a pedestal. The central part of the emblem features a lotus flower. The entire design is enclosed within a circular border with Thai text.

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

วุฒิกกร เปานิล และ รัตน บริสุทธิกุล (2555). การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี เกรด SCGA 270C กับอะลูมิเนียมผสม เกรด 5052 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อม TIG. การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 (TMETC6) ระหว่างวันที่ 5-7 ธันวาคม 2555 ณ โรงแรมฮอติเดย์ อิน จังหวัดเชียงใหม่.

วุฒิกกร เปานิล และ รัตน บริสุทธิกุล (2557). การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 (MENETT28) ระหว่างวันที่ 15 - 17 ตุลาคม 2557 ณ โรงแรมพลูแมน ขอนแก่น ราชธานี ออคิด จังหวัดขอนแก่น

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28  
15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



AMM-210

การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเคลือบสังกะสี  
กับโลหะผสมอะลูมิเนียม

Dissimilar Metal Joining Between Zinc Coated Low Carbon Steel  
And Aluminium Alloy

วณิชกร เปาณิล<sup>1</sup> และรัตนาปริสุทริกุล<sup>2</sup>

<sup>1</sup> วิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>2</sup> วิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

\*ติดต่อ: E-mail: rattana@sut.ac.th เบอร์โทรศัพท์: 08-7250-6826

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาผลของชั้นสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนดาร์ด ในการวิจัยนี้ได้ทำการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 5052 และเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 5052 หนา 1.0 มิลลิเมตรเท่ากัน โดยชิ้นงานจะถูกวางในลักษณะซ้อนเกยให้เหล็กกล้าแผ่นวางไว้ด้านบนและให้ความเร็วในการเชื่อมคงที่ 0.60 เมตรต่อนาที จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ก่อตัวขึ้นในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวการเชื่อมติดระหว่างเหล็กกล้ากับอะลูมิเนียม ขณะที่กรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอโดยเฉพาะที่ขอบของบ่อหลอมอะลูมิเนียม และชั้นสารประกอบเชิงโลหะนี้จะกว้างขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อใช้ชิ้นงานเชื่อมทั้งสองกรณีไปทำการทดสอบแรงดึงเฉือนพบว่าชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสีที่มีชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอจะสามารถต้านทานต่อแรงดึงเฉือนได้น้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบสังกะสีที่มีอยู่บนเหล็กกล้าแผ่นส่งผลทำให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะกระจายในโลหะพื้นอะลูมิเนียมไม่สม่ำเสมอจะทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมต่ำลง

**คำหลัก:** การเชื่อมโลหะต่างชนิด, กระบวนการเชื่อม TIG, เหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี, โลหะผสมอะลูมิเนียม

**Abstract**

The object of the study is to understand the effect of zinc coating layer on low carbon steel sheet on the dissimilar metals joining between low carbon steel and aluminium alloy by TIG processes. In the experiment, two welding cases were done; 1) welding between non-coated steel and aluminium alloy, and 2) welding between zinc coated steel and aluminium alloy. The steel and aluminium alloy used was 1 mm of thickness. The welding configuration and welding speed used was lap joint configuration and 0.6 m/min of welding speed. According the microstructure result, it could be indicated that the uniform thickness of intermetallic compound layer in case of welding between non-coated steel and aluminium alloy was found. Which, in case of welding between coated steel with aluminium alloy, this intermetallic compound layers

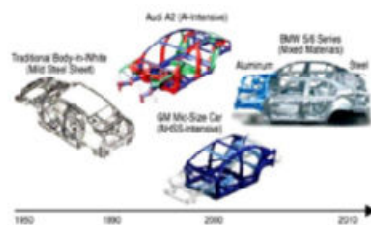
## AMM-210

was non-uniform thickness, especially in the area of edge of aluminium weld pool. Moreover, the intermetallic compound layers width will increase when heat input increase in both case. Furthermore, after shear tensile test, it could be indicated that the joints of zinc coated steel and aluminum alloy could resist the load less than that of the joints between non coated steel and aluminum alloy. From above results, it is summarized that zinc coated layer onto steel sheet could not be unevenly distributed in aluminum molten metal, which resulted in non-uniform intermetallic compound layer thickness and the poor of joining load resistance.

**Keywords:** Dissimilar metal joining, MIG processes, Zinc coated steel sheet, Aluminium alloy.

### 1. บทนำ

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์มีการนำโลหะแผ่นมาประกอบเป็นโครงสร้างตัวถังรถยนต์เพื่อลดน้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการขับขี่โลหะแผ่นที่นำมาใช้ผลิตเป็นโครงสร้างรถยนต์มากที่สุดคือเหล็กกล้า ซึ่งจำแนกได้ 2 ประเภทด้วยกันคือเหล็กกล้าแผ่นเปลือยและเหล็กกล้าแผ่นเคลือบ เช่น เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี และ เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี-อะลูมิเนียม เป็นต้น อย่างไรก็ตามด้วยวิกฤตทางด้านพลังงานในปัจจุบันที่รุนแรงขึ้นทำให้อุตสาหกรรมยานยนต์จึงจำเป็นต้องหาวัสดุน้ำหนักโครงสร้างตัวถังรถยนต์เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งในวิธีการที่ผู้ผลิตรถยนต์นำมาใช้ คือ การนำเอาโลหะแผ่นนอกกลุ่มเหล็กที่มีน้ำหนักเบาโดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมมาประกอบเป็นโครงสร้างรถยนต์ร่วมกับเหล็กกล้า ดังรูปที่ 1 ที่แสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการของวัสดุที่นำมาประกอบเป็นโครงสร้างรถยนต์ และแนวโน้มการใช้อะลูมิเนียมผสมเข้ามาผลิตเป็นโครงสร้างตัวถังรถยนต์ร่วมกับเหล็กกล้าที่มากขึ้น



รูปที่ 1 วิวัฒนาการของวัสดุที่นำมาผลิต

### โครงสร้างตัวถังรถยนต์ [1]

เมื่อมีการใช้เหล็กกล้าแผ่นร่วมกับอะลูมิเนียมผสมแผ่นในการผลิตเป็นโครงสร้างตัวถังรถยนต์ทำให้ในการประกอบโครงสร้างรถยนต์ผู้ผลิตรถยนต์จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงจุดเชื่อมต่อของโลหะต่างชนิดทั้งสองได้ ด้วยเหตุนี้ในท้วง 15 ปีที่ผ่านมาจึงมีผู้ทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเปลือยและโลหะผสมอะลูมิเนียมกันอย่างแพร่หลาย[2-5]แต่ด้วยความหลากหลายของสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนจึงทำให้ผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ไม่สามารถใช้เหล็กกล้าแผ่นเปลือยอย่างเดียวได้จำเป็นต้องใช้เหล็กกล้าแผ่นเคลือบโดยเฉพาะเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีในผลิตชิ้นส่วนของรถยนต์และรายงานการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นมีอยู่อย่างจำกัด [6] นอกจากนี้จากรายงานดังกล่าวไม่มีการยืนยันผลของชั้นสังกะสีต่อคุณภาพรอยเชื่อมอย่างชัดเจน และเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงอิทธิพลของชั้นดังกล่าวให้ดีขึ้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมขึ้น

### 2. วัสดุและวิธีการทดลอง

ด้วยการศึกษาที่ต้องการที่จะศึกษาผลของชั้นสังกะสีที่เคลือบบนเหล็กกล้าแผ่นต่อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียม เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณี ด้วยกัน คือ 1) การ

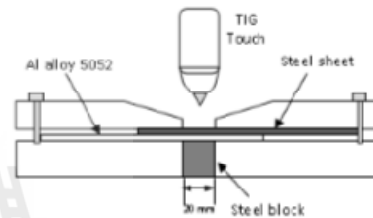
### AMM-210

เชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือย(ไม่มีชั้นสังกะสี)กับโลหะผสมอะลูมิเนียม และ 2) การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบ(มีชั้นสังกะสีหรือ Galvanize Steel) กับโลหะผสมอะลูมิเนียมโดยผู้วิจัยได้ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นเคลือบสังกะสี (Galvanize Steel) และเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 5052 หนา 1 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทังสเตนอาร์คเวลดึง ซึ่งเหล็กกล้าแผ่นเปลือยจะได้จากการเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าเกรดเดียวกับเหล็กกล้าแผ่นเคลือบ คือ นำเอาเหล็กกล้าแผ่นเคลือบที่มีชั้นสังกะสี (Galvanize Steel) ไปทำการเจียระไนราบผิวเพื่อกำจัดชั้นสังกะสีออกทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจได้ว่าชั้นสังกะสีจะถูกกำจัดออกหมดผู้วิจัยได้ทำการวัดความหนาของชั้นสังกะสีซึ่งมีความหนาสูงสุดประมาณ 10 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 2 และได้ขีดเจียรผิวเพื่อกำจัดชั้นเคลือบสังกะสีนี้ออกไม่เกิน 50 ไมครอน ดังนั้นขนาดของชิ้นงานที่จะนำมาเชื่อม คือ (85)x(65)x(1±0.05) มิลลิเมตร ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติเชิงกลของโลหะที่นำมาทำการเชื่อมทั้งสอง แสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

Material	Mechanical properties		
	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	%Elongation
Steel	233	396	67
A 5052 alloy	195	230	12

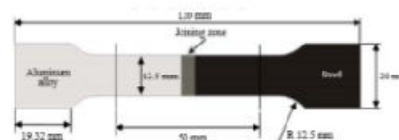
หมายเหตุ: สมบัติเชิงกลของ A5052 alloy [4]

สำหรับขั้นตอนการเชื่อมนั้นผู้วิจัยได้กำหนดให้วางชิ้นงานในลักษณะซ้อนเกยให้เหล็กกล้าแผ่นอยู่ด้านบนตั้งแสดงรูปที่ 3 โดยให้หน้าตัดของกรวยเชื่อมผู้วิจัยได้ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ DCEN ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมคงที่ 0.60 เมตร/นาที กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 90-140 แอมแปร์

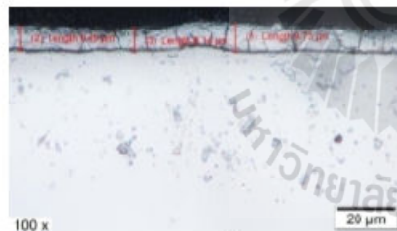


รูปที่ 3 การจับยึดชิ้นงานเชื่อมแบบซ้อนเกย

ภายหลังจากเชื่อมแล้วเสร็จผู้วิจัยได้นำชิ้นงานเชื่อมไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางของรอยเชื่อมและสังเกตลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงจากทั้งสองกรณีการเชื่อม หลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อน้ำหนักดึงของชิ้นงานเชื่อมทุกสภาวะเชื่อมติดเพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงของรอยเชื่อมและศึกษาลักษณะการแตกหักของชิ้นงานเชื่อม โดยลักษณะชิ้นงานเชื่อมที่นำมาทดสอบความต้านทานต่อน้ำหนักดึงจะแสดงดังรูปที่ 4 และตัดจากชิ้นงานเชื่อมด้วยวิธีการตัดด้วยสิ่ว



รูปที่ 4 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงเดือน



รูปที่ 2 ลักษณะของชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่น (Galvanize Steel)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะ

Material	Chemical composition (wt. %)						
	Fe	C	Mn	Si	Mg	Cu	Al
Steel	Bal.	0.05	0.17	0.018	-	0.018	0.05
A5052 alloy	0.40 (max)	-	0.10 (max)	0.25 (max)	2.2-2.8	0.10 (max)	Bal.

หมายเหตุ: ส่วนผสมทางเคมี A5052 alloy [4]

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของโลหะพื้น

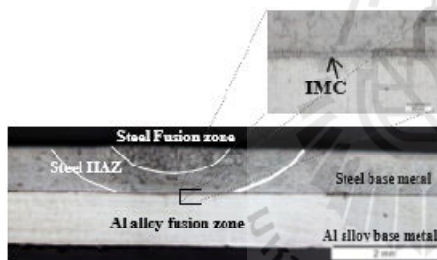
### AMM-210

#### 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

##### 3.1 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างจุลภาคในระนาบภาคตัดขวางรอยเชื่อม จากรูปจะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคในชั้นงานเชื่อมภาคตัดขวางหน้าจะมีความแตกต่างกันอยู่ด้วยกัน 7 บริเวณ คือ บริเวณที่เหล็กกล้าหลอมละลาย (Steel Fusion zone) บริเวณาระทบร้อนในเหล็กกล้า (Steel HAZ) บริเวณโลหะพื้นเหล็กกล้า (Steel base metal) บริเวณโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Al alloy fusion zone) บริเวณาระทบร้อนโลหะผสมอะลูมิเนียม (Al alloy HAZ) บริเวณโลหะพื้นอะลูมิเนียมผสม (Al alloy base metal) และบริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound Layer, IMC) หนึ่งด้วยการกัดกรดยังไม่เหมาะสมในรายงานนี้ทำให้การสังเกตของโลหะผสมอะลูมิเนียม และบริเวณาระทบร้อนในโลหะผสมอะลูมิเนียมไม่ชัดเจน

นอกจากนี้จากรูปดังกล่าวผู้วิจัยยังพบว่าบริเวณต่างๆ ทั้ง 7 บริเวณของการเชื่อมทั้งสองกรณี (การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียม และการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับโลหะผสมอะลูมิเนียม) ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค ณ บริเวณเหล่านั้นมีความคล้ายกันอย่างมาก ยกเว้นบริเวณชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่พบความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานเชื่อมทั้ง 2 กรณีอย่างเด่นชัด และเมื่อทำการขยายบริเวณดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 6 จะพบว่าการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียมชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความสม่ำเสมอ ขณะที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเนื้อมีความไม่สม่ำเสมออย่างมากและพบการตกลงของชั้นเคลือบที่ผสมกับโลหะผสมอะลูมิเนียมอีกด้วย

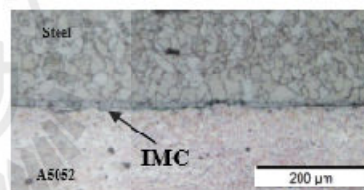


a) Steel –A5052 alloy

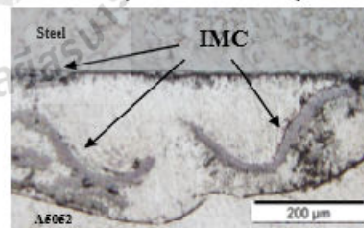


b) Galvanize steel –A5052 alloy

รูปที่ 5 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในระนาบตัดขวางรอยเชื่อม (กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 110A)



(a) Steel-A5052 alloy



b) Galvanize steel –A5052 alloy

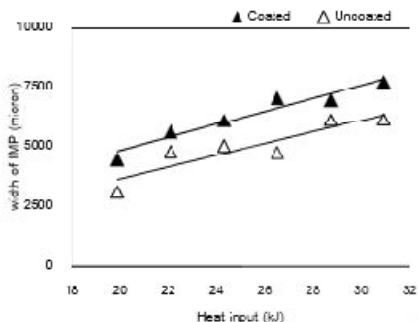
รูปที่ 6 ลักษณะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 120 A)

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นของทั้ง 2 กรณีนั้นจะมีความกว้างเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงานในการเชื่อมเพิ่มมากขึ้น

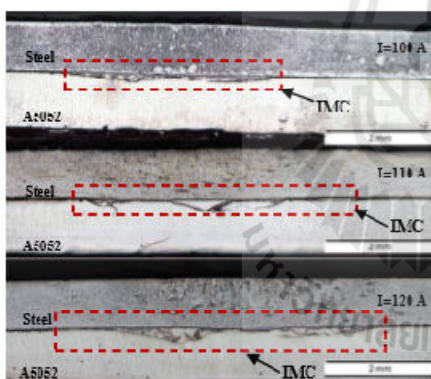


### AMM-210

ชั้นและความกว้างของชั้นสารประกอบเชิงโลหะในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับโลหะผสมอะลูมิเนียมจะมากกว่ากรณีชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 7



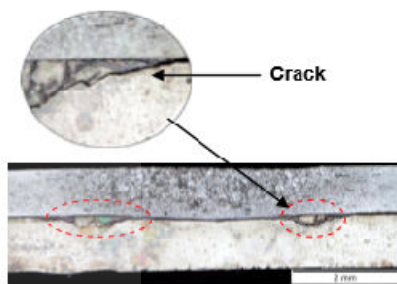
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนในการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับโลหะผสมอะลูมิเนียม



รูปที่ 8 ภาพถ่ายกำลังขยายต่ำของภาคตัดขวางแนวรอยเชื่อม ที่กระแสไฟในการเชื่อม 100 A, 110 A และ 120 A

ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อนำภาพถ่ายที่กำลังขยายต่ำกรณีชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่กระแสไฟในการเชื่อมต่างกันมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าปริมาณของสารประกอบเชิงโลหะนั้นจะมีมากขึ้นอยู่ด้วยกันสองบริเวณ คือ บริเวณ

ขอบบ่อหลอมและตรงกลางบ่อหลอม ดังแสดงในรูปที่ 8 และด้วยการมีสารประกอบเชิงโลหะมากกว่าบริเวณขอบของบ่อหลอมอะลูมิเนียมผสมทำให้ผู้วิจัยพบรอยแตกบริเวณดังกล่าวสำหรับสภาวะการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมสูงๆ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 บริเวณที่มีการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ไม่สม่ำเสมอและมีรอยแตกเกิดขึ้น (กระแสไฟในการเชื่อม 140 A)

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคดังกล่าว ผู้วิจัยคาดการณ์ว่าชั้นของสังกะสีที่เคลือบขณะทำการเชื่อมเกิดการละลายก่อนด้วยจุดหลอมตัวของสังกะสีต่ำกว่าอะลูมิเนียมมาก เมื่อสังกะสีเริ่มละลายจึงเกิดการผสมเข้ากับชั้นของอะลูมิเนียมผสมด้านล่างทำให้เกิดการเชื่อมติด ส่งผลให้การเชื่อมติดของเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับโลหะอะลูมิเนียมผสมได้รอยเชื่อมที่กว้างกว่า นอกจากนี้ด้วยสังกะสีมีความหนาแน่นสูงกว่าเมื่ออะลูมิเนียมเกิดการละลายจึงพยายามจมลงและพยายามผสมกับอะลูมิเนียม เราจึงเห็นชั้นของแผ่นเคลือบใหม่บ่อหลอมอะลูมิเนียม ประกอบเหมาะกับการหลอมของอะลูมิเนียมผสมขณะหลอมมีการไหลและการไหลนั้นจะช่วยให้เกิดการผสมแต่การผสมดังกล่าวจะไม่ค่อยดี ณ บริเวณใจกลางและขอบบ่อหลอมส่งผลให้พบชั้นของสารประกอบเชิงโลหะที่หนาที่เกิดจากการผสมของสังกะสีกับโลหะอะลูมิเนียมผสมและบางบริเวณอื่น ซึ่งเป็นต้นเหตุของการไม่สม่ำเสมอของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ นอกจากนี้ด้วยชั้นสารประกอบเชิงโลหะดังกล่าวเกิดขึ้นหนาบริเวณขอบ

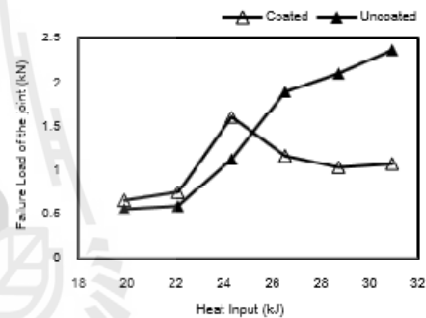
### AMM-210

บ่อหลอมที่รองรับแรงดึงขณะเกิดการแข็งตัวจึงมักพบการแตกหักที่ขอบบ่อหลอมในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับโลหะผสมอะลูมิเนียม ผิดกับกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ชั้นดังกล่าวจะบางมากที่บริเวณขอบของบ่อหลอมที่ลดปัญหาการแตกหักที่ขอบบ่อหลอมลงได้ ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดการณ์ว่าความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีที่หนามากมีผลต่อการผสมกันไม่ได้ดีของชั้นสังกะสีในโลหะผสมอะลูมิเนียมจึงต้องมีการควบคุมในกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีให้ชั้นเคลือบสังกะสีบางมาก ๆ เพื่อให้สังกะสีสามารถละลายและผสมกันได้ดีในโลหะผสมอะลูมิเนียม

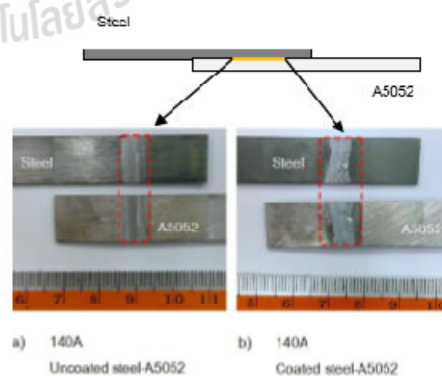
#### 3.2 ผลการทดสอบแรงดึงเหนียว

รูปที่ 10 แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเชื่อมต่าง ๆ สัมพันธ์กับความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมจากรูปที่ 10 พบว่ากรณีการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นส่วนใหญ่จะมีความต้านทานต่อการแตกหักเสียหายจะเพิ่มขึ้นตามความร้อนที่ลงสู่ชิ้นงาน ในขณะที่การเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบ (Galvanize Steel) กับโลหะผสมอะลูมิเนียมความสามารถในการต้านทานต่อการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเชื่อมสูงขึ้นในช่วงแรกและลดลงเมื่อความร้อนสูงขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานต่อการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเชื่อมของทั้งสองกรณีจะพบว่าในช่วงปริมาณความร้อนน้อย ๆ ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับโลหะผสมอะลูมิเนียมจะให้ความสามารถในการต้านทานต่อการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเชื่อมสูงกว่า และเมื่อปริมาณความร้อนเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการต้านทานต่อการแตกหักเสียหายของชิ้นงานเชื่อมจะเกิดการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับโลหะผสมอะลูมิเนียมกลับต่ำกว่า นอกจากนี้เมื่อผู้วิจัยทำการตรวจสอบรอยแตกหักที่แสดงตัวอย่างของรอยแตกหักในรูปที่ 11 พบว่าชิ้นงานเชื่อมแตกหักที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะทั้งสองกรณีการเชื่อมแต่กรณีของการแตกหักของชิ้นงาน

เชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมให้รอยแตกที่รูขรุขระกว่ารอยแตกของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียม ที่เป็นเช่นนี้ผู้วิจัยคาดการณ์ว่าน่าจะเกิดจากที่รอยเชื่อมติดกรณีที่เชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบกับโลหะผสมอะลูมิเนียมมีความกว้างมากกว่าทำให้สามารถรับแรงได้มากกว่าในช่วงความร้อนในการเชื่อมน้อย ๆ และเมื่อความร้อนลงสู่ชิ้นงานมากขึ้นทำให้พบรอยแตกที่ขอบบ่อหลอมในกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับโลหะอะลูมิเนียมผสมทำให้ความสามารถในการรับแรงของชิ้นงานเชื่อมที่ได้ไม่สูงขึ้นไปตั้งเท่าการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับโลหะผสมอะลูมิเนียม



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนในการเชื่อมและความสามารถในการต้านทานต่อการแตกหักเสียหาย



## AMM-210

รูปที่ 11 ลักษณะผิวรอยเชื่อมภายหลังทดสอบแรงดึง-  
เฉือน (กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 140 A)

### 4. สรุป

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผล  
การศึกษาได้ดังนี้ ชั้นเคลือบสังกะสีบนเหล็กกล้าแผ่นมี  
ผลทำให้เกิดการก่อตัวของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่  
ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวการเชื่อมติดระหว่างเหล็กกล้า  
กับอะลูมิเนียม ซึ่งน่าจะเกิดจากการละลายอย่างไม่  
สมบูรณ์ของชั้นเคลือบสังกะสีดังกล่าวในขณะที่เชื่อม  
เมื่อชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาไม่สม่ำเสมอ  
เมื่อรอยเชื่อมเกิดการแข็งตัวทำให้เกิดแรงดึงเนื่องจาก  
การหดตัวของรอยเชื่อมที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้มักพบ  
รอยแตกในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีกับ  
โลหะผสมอะลูมิเนียม นอกจากนี้ชั้นเคลือบสังกะสีบน  
แผ่นเหล็กกล้ายังมีผลต่อความกว้างของการเชื่อมติด  
โดยทำให้รอยเชื่อมติดมากขึ้น อย่างไรก็ตามด้วยชั้น  
เคลือบสังกะสีมีผลให้การถ่ายตัวของรอยแตกที่ขยายไป  
หลอมจึงทำให้ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเคลือบ  
สังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียมจึงมีความต้านทานการ  
แตกหักที่ต่ำกว่าการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นเปลือยกับ  
โลหะผสมอะลูมิเนียม

### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท โตโยต้า มอเตอร์ เอเชีย  
แปซิฟิก เอ็นจิเนียริงแอนด์แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด  
(TM&P EM) ที่อนุเคราะห์ชิ้นงานเหล็กกล้าเคลือบ  
สังกะสี SCSA 270C Galvannealed Steel สำหรับ  
การวิจัยในครั้งนี้

### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.I. Taub, P.E. Krajewski, A.A. Luo, and J.N. Owens (2007) The Evolution of Technology for Materials Processing the Automotive Example, JOM, February 2007, pp.48-57.
- [2] ภูษิต มิตรสหมหวัง, รัตน์บริสุทธิกุล, ศิริรัตน์ รัตน์จันทร์ และโยชิฮารุ มูโด้ (2557) การศึกษาความเป็นไป

ได้ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าแผ่นกับ  
อะลูมิเนียมผสมแผ่นด้วยกระบวนการเชื่อมทิก, การ  
ประชุมวิชาการเครื่องกลวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง  
ประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552,  
จังหวัดเชียงใหม่

- [3] รัตน์บริสุทธิกุล, สุกิจ พ้อจ, อ้าไพศรี ไหวพริบ,  
อุบลวรรณ ว่องกิตติพงษ์ และ ชิตพงศ์ สารปรัง  
(2555) ผลของแท่งโลหะรองหลังงานเชื่อมต่อชิ้นงาน  
โลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับโลหะผสม  
อะลูมิเนียม, วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 55,  
มกราคม-เมษายน 2555, หน้า 12-17.

- [4] ภูษิต มิตรสหมหวัง และ รัตน์บริสุทธิกุล (2553)  
อิทธิพลของตัวแปรงานเชื่อมต่อคุณภาพของรอยเชื่อม  
โลหะแผ่นต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับโลหะผสม  
อะลูมิเนียมเกรด 5052-H32, วารสารการเชื่อมไทย  
ฉบับที่ 52, มกราคม-เมษายน 2553, หน้า 13-18

- [5] ภูษิต มิตรสหมหวัง และ รัตน์บริสุทธิกุล (2551).  
การเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้ากับ  
อะลูมิเนียมเกรด 5052, วารสารการเชื่อมไทย ฉบับ  
ที่ 51, กันยายน-ธันวาคม 2551, หน้า 21-25.

- [6] G Sierra, P. Payre, F. Deschaux-Reaume, D  
Stuart and G. Fras (2008). Galvanised steel to  
aluminium joining by laser and GTAW processes,  
Materials Characterization 59(2008), pp. 1705-  
1715.

- [7] F. Haddadi, D. Strong and P.B. Prangnell  
(2012). Effect of Zinc Coating on Joint Properties  
and Interfacial Reactions in Aluminum to steel  
Ultrasonic Spot Welding, JOM. Vol. 64 No.3,  
Published online March 2, 2012, pp. 407-413.

- [8] H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He and H. Hackl  
(2007). Interfacial microstructure and mechanical  
properties of aluminium-zinc-coated steel joint  
made by a modified metal inert gas welding-

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20  
15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



**AMM-210**

brazing process, Materials Characterization

58(2007), pp. 588-592.



## ประวัติผู้เขียน

นายวุฒิกร เปานิล เกิดเมื่อวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2532 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านดงบัง ชั้นประถมศึกษาที่ 5-6 ที่โรงเรียนบัวใหญ่วิทยา ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนวัดประชานมิตร อำเภอบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2554

ในปี พ.ศ. 2554 เดียวกันนี้ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้ทำการวิจัยในหัวข้อการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียม ภายใต้ที่ปรึกษาอาจารย์ ดร. รัตนบริสุทธิกุล ในระหว่างการศึกษาค้นคว้าได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการโลหการกายภาพ 2 ปฏิบัติการโลหการกายภาพ 3 และปฏิบัติการโลหการเครื่องกล ส่วนทางด้านวิชาการได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 6 และได้เสนอบทความเข้าร่วมการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 28 เรื่องการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเคลือบสังกะสีกับโลหะผสมอะลูมิเนียม