

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมประสานแบบมิกต่อโครงสร้างจุลภาค
และสมบัติทางกลในการเชื่อมประสานอะลูมิเนียมเข้ากับเหล็กชนิด
แข็งแรงพิเศษเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์
A study on Influence of MIG Brazing Parameters on Microstructure
and Mechanical Properties in Joining of Al to AHSS for Applications
in Automobile Industry

นิวัฒน์ มูแก้ม

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110
E-mail: niwat.moo@rmutr.ac.th, niwat_ie@hotmail.com

บทคัดย่อ – วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมประสานแบบมิกต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในการเชื่อมประสานอะลูมิเนียมเข้ากับเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ โดยตัวแปรการเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความเร็วในการเชื่อมประสาน กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมประสาน อัตราการป้อนโลหะเติม ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวtorch และมุมที่ใช้ในการเชื่อมประสาน เมื่อใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ การเชื่อมประสานที่เหมาะสมเมื่อตรวจสอบโดยใช้วิธีการของทางสถิติพบว่า ความเร็วในการเชื่อมประสานที่ 500 mm/min กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมประสานที่ 25 A อัตราการป้อนโลหะเติมที่ 6.0 m/min ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวtorch ที่ 1 mm และมุมที่ใช้ในการเชื่อมประสานที่ 90 ° มีความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดที่ 68.40 MPa มีค่าความผิดพลาดจากการทำนายของการทดลองน้อยกว่า 3 % โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ระหว่างพื้นผิวเมื่อเย็นย่นผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM, EDS และ XRD ระหว่างการเชื่อมประสานเกรนสารประกอบเกิดที่โลหะเติม ขณะที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ $FeAl_3Si_2$ เกิดขึ้นที่ระหว่างพื้นผิวของเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษและโลหะเติม

คำสำคัญ – การเชื่อมประสานแบบมิก, โครงสร้างจุลภาค, สมบัติทางกล, เหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ, วิธีทางสถิติ

Abstract – The aim of this research was to study on influence of MIG brazing parameters on microstructure and mechanical properties in joining of Al to AHSS. The brazing variables investigated in this study encompassed brazing speed, brazing current, filler metal feed rate, torch-plate distance and brazing torch angle. The Taguchi method has been used to design the experiment. The optimal brazing conditions were identified by using Taguchi methodology. From this investigation, it is found that the joints fabricated with the brazing speed of 500 mm/min, brazing current of 25 A, filler metal feed rate of 6.0 m/min, torch-plate distance of 1 mm, and brazing torch angle of 90 ° the maximum shear strength of 68.40 MPa. The prediction error of the experimental was less than 3 %. The possible reaction products at the interface were confirmed using SEM, EDS and XRD analysis. During brazing, intermetallic grains formed at the filler metal. An intermetallic compound layer composed of $FeAl_3Si_2$ was formed at the interface of the advanced high-strength steels and filler metal.

Keywords – MIG brazing, Microstructure, Mechanical property, AHSS, Taguchi method

1. บทนำ

เหล็กกล้าเป็นวัสดุที่มีศักยภาพเป็นอย่างมากสำหรับนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งส่วนประกอบของรถยนต์จะมีเหล็กมากกว่าร้อยละ 60 เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงประกอบกับมีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี เช่น เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel; HSS) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความแข็งแรง เหนียว ทนต่อแรงกระแทกได้ดีและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม อย่างไรก็ตามได้มีการปรับปรุงเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเป็นเหล็กแข็งแรงพิเศษ (Advanced high-strength steels; AHSS) ที่มีจุดเด่นด้านน้ำหนักซึ่งจะเบากว่า HSS และให้ความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างแบบเดิม เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในการผลิตโครงสร้างของรถยนต์ เพื่อให้มีความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำในลักษณะการกระแทกหรือเกิดการชนของรถยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าแบบดั้งเดิม [1] ประกอบกับปัจจุบันผู้ผลิตยานยนต์มีการแข่งขันที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในประเด็นที่ผู้ผลิตยานยนต์ใช้เป็นจุดขาย คือ การผลิตรถยนต์ขนาดเล็กซึ่งเป็นรถยนต์ประหยัดพลังงานตามมาตรฐานสากลหรือเรียกว่า อีโคคาร์ (ECO car) ที่ยังคงคงการออกแบบโดยเลือกใช้วัสดุให้มีความแข็งแรงไม่ด้อยกว่าวัสดุชนิดเดิมที่ใช้อยู่ แต่น้ำหนักรถยนต์จะต้องลดลงเพื่อตอบสนองการลดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงและอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง [2, 3]

ดังนั้นปัจจัยที่สำคัญของการผลิตรถยนต์แบบดังกล่าวให้ได้มาตรฐานและสามารถลดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงวิธีหนึ่งคือการลดน้ำหนักของรถยนต์โดยการนำวัสดุชนิดอื่นมาทดแทนเพื่อลดปริมาณการใช้เหล็กกล้า เช่น อะลูมิเนียมซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและต้านทานต่อการเกิดสนิมได้ดี แต่การนำวัสดุสองชนิดมาใช้ร่วมกันนั้นทำได้ยากโดยเฉพาะกับวิธีการเชื่อมหลอมแบบดั้งเดิม (Conventional fusion welding) ซึ่งจะเกิดปัญหาในกระบวนการเชื่อมประสาน เนื่องจากความแตกต่างของจุดหลอมเหลว สมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุ [4, 5] โดยเฉพาะกับ AHSS ที่ประกอบด้วยโครงสร้างหลายเฟส (Multi-phases) ได้แก่ เฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) เบนไนต์ (Bainite) และออสเทนไนต์ (Austenite) ในปริมาณเพียงพอต่อการทำให้เกิดสมบัติทางกลเฉพาะ [6] เมื่อนำมาเชื่อมประสานซึ่งทำให้เกิดการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) ระหว่าง Al-Fe ที่มีความแข็งแรงและเปราะสูงมากทำให้สมบัติทางกลของรอยเชื่อมประสานลดลงเมื่อเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีบริเวณกว้าง [7, 8] ดังนั้นการลดปริมาณการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างรอยเชื่อมประสานด้วยวิธีการเชื่อมประสานจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมยานยนต์ อย่างไรก็ตามปัจจัยเงื่อนไขที่เหมาะสม

เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญกับกระบวนการ ซึ่งวิธีทางสถิติเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้กำหนดตัวแปรเงื่อนไขการที่เหมาะสมกับกระบวนการการผลิตแบบต่างๆ [9]

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเชื่อมประสานวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษด้วยวิธีการเชื่อมประสานแบบมิก (MIG brazing) โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมประสาน มุมที่ใช้ในการเชื่อมประสาน อัตราเร็วในการเชื่อมประสาน อัตราการป้อนโลหะเติมและระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติความต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมประสาน

2. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเชื่อมประสานแบบมิก

การเชื่อมประสานแบบมิก (MIG brazing) เป็นการต่อวัสดุที่มีกระบวนการคล้ายกับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas metal arc welding) ซึ่งใช้อิเล็กโทรดลื่นเปลือยแบบลวดเปลือยไม่หุ้มสารเคมีเป็นโลหะเติมมีการป้อนเติมอย่างต่อเนื่องไปยังรอยต่อสำหรับการปกป้องรอยต่อสามารถใช้ได้ทั้งแก๊สเฉื่อย (Inert gas) และแก๊สปฏิกิริยา (Active gas) ซึ่งรู้จักกันในชื่อ MIG/MAG brazing วิธีนี้เหมาะกับการต่อวัสดุต่างชนิด เช่น เหล็กและอะลูมิเนียมได้ดีมีประสิทธิภาพมากทั้งด้านความเร็วในการต่อคุณภาพและต้นทุนในการผลิต โดยส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ [10, 11] อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปคุณภาพของรอยต่อขึ้นอยู่กับตัวแปรในกระบวนการ ซึ่งมีหลายตัวแปรที่ต้องควบคุมเพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะตามที่ต้องการ จึงมีการใช้วิธีทางสถิติช่วยในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมกับกระบวนการ วิธีการเหล่านี้ ได้แก่ การออกแบบแฟคทอเรียล (Factorial design) วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface methodology) วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks) และวิธีทางสถิติ (Taguchi method) เป็นต้น [12-14]

2.2 วิธีทางสถิติ

ทฤษฎีหรือแนวทางปฏิบัติของทางสถิติได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาให้เหมาะสมกับกระบวนการวิธีการหรือคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งขั้นตอนของวิธีทางสถิติประกอบด้วย (1) กำหนดคุณลักษณะของกระบวนการ (2) กำหนดจำนวนและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง (3) ระบุแผนการทดลองที่ใช้สำหรับ Design matrix (Inner array) (4) ทดลองเก็บข้อมูลและคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (The signal-to-noise ratio; S/N ratio) (5) กำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม (6) ทำนายผลจากปัจจัยและระดับที่เหมาะสม (7) ทดลองยืนยันผลจากการทำนาย โดยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณีด้วยกัน คือ (1)

กรณีค่าน้อยยิ่งดี (The smaller-the-better) (2) กรณีค่าตรงเป๋าหมายดีที่สุด (The nominal-the-best) และ (3) กรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี (The larger-the-better) สำหรับในงานวิจัยนี้ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทากูจิจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratio สูงสุดซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 1 [14]

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

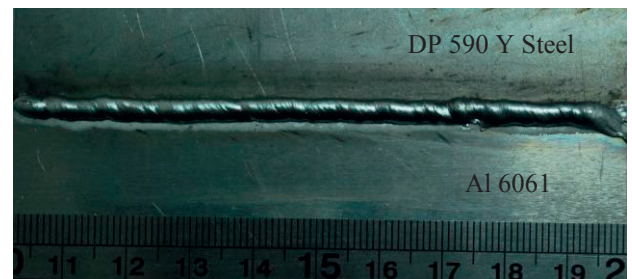
เมื่อ S/N คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน n คือ จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละการทดลองและ y_i คือ ค่าตอบสนองในแต่ละการทดลอง

3. วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้เหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษ DP 590 Y และอะลูมิเนียม 6061 หนา 1 mm นำมาทำเป็นวัสดุโลหะพื้น โดยตัดให้ได้ขนาด 10 x 10 cm และทำความสะอาดผิวด้วยอะซิโตน ขั้นตอนการแล่นประสานทำการต่อโดยการต่อแบบเกย (Lap joint) วางอะลูมิเนียมไว้บนเหล็กและใช้โลหะผสม Al-12Si ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm เป็นโลหะเติม ระหว่างการแล่นประสานใช้แก๊สอาร์กอน (Ar) ปกคลุมแนวเชื่อมประสาน สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งปัจจัย A คือ ความเร็วในการแล่นประสาน B คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแล่นประสาน C คือ อัตราการป้อนโลหะเติม D คือ ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวtorch และ E คือ มุมที่ใช้ในการแล่นประสาน แต่ละปัจจัยในการทดลองมี 3 ระดับ แปลงค่าอยู่ในรูป Orthogonal coding แทนด้วยระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (1) ซึ่งระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้มาจากคู่มือการปรับตั้งค่าของเครื่องสำหรับงานเชื่อม MIG นำมาประยุกต์ใช้และออกแบบการทดลองแบบบอร์ทอกอนัลลอรี L27 ตามแบบแผนของทากูจิ โดยมีการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง หลังการแล่นประสาน ชิ้นงานตัวอย่างดังรูปที่ 1 จะถูกนำมาตัดโดยใช้เครื่อง Wire-EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FA20S Advance ตัดให้ได้ขนาด 20x60 mm ชิ้นงานที่ผ่านการตัดนำมาทดสอบความต้านทานแรงเฉือน โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z020 ด้วยความเร็ว 1 mm/min ตามมาตรฐาน JIS Z 3136 และนำข้อมูลจากการทดสอบไปวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาตัวแปรเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการแล่นประสาน

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ใช้ในการแล่นประสาน

ปัจจัย	หน่วย	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (1)
A	mm/min	500	1,000	1,500
B	A	25	50	75
C	m/min	4.0	6.0	8.0
D	mm	1.0	1.5	2.0
E	Degree	45	70	90



รูปที่ 1 ชิ้นงานจากการแล่นประสาน

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเตรียมตัวอย่างโดยการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 320, 600, 800 และ 1,200 ตามลำดับ จากนั้นขัดด้วยผงอลูมินา (Al_2O_3) ขนาด 0.3 μm บนผ้าสักหลาดด้วยเครื่องขัดชิ้นงานทดสอบยี่ห้อ Struers รุ่น DAP-7 จึงกัดด้วยสารละลายกรดที่ประกอบด้วย 1 ml HF, 1.5 ml HCl, 2.5 ml HNO_3 และ 95 ml H_2O กัดตัวอย่างโดยใช้เวลาประมาณ 3 - 5 s จึงนำไปตรวจสอบรอยต่อในระดับมหภาคที่กำลังขยาย 6.5 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ JENCO U.S.A. รุ่น V203410 และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX 60 M สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูง (1,000 เท่า) จะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410 LV และใช้ Energy dispersive X-ray spectrometry (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น LINK ISIS 300 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี การตรวจสอบเฟสและตัวแปรโครงสร้างผลึกของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นใช้เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8-Discover

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

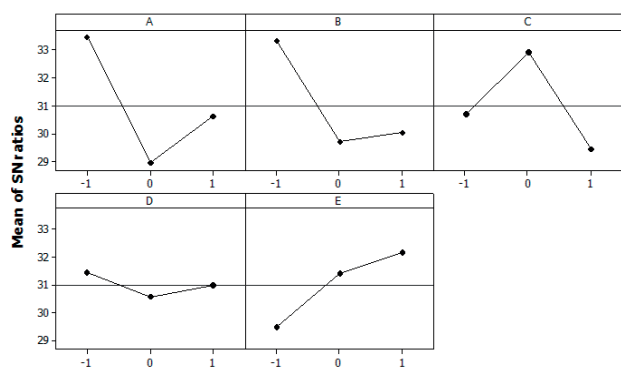
4.1 ความต้านทานแรงเฉือนและปัจจัยที่เหมาะสม

ผลจากการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนเมื่อนำมาหาระดับปัจจัยเงื่อนไขการแปรผันที่เหมาะสม สำหรับในงานวิจัยนี้ค่าตอบสนองที่มีค่ามาก คือ ค่าที่ดีที่สุดจากกฎของทาคูชิจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย คือ จุดที่ให้ค่า S/N ratio จากผลการทดลองค่าความต้านทานแรงเฉือน ค่า S/N ratio และค่าเฉลี่ย (Mean) แสดงดังตารางที่ 2 สำหรับรูปที่ 2 แสดงการเลือกค่า S/N ratio ที่มีค่ามากที่สุดของแต่ละระดับปัจจัย คือ ความเร็วในการแปรผัน (A) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแปรผัน (B) และระยะระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ช (D) ที่ระดับต่ำ (-1) ส่วนอัตราการป้อนโลหะเติม (C) ที่ระดับกลาง (0) และมุมที่ใช้ในการแปรผัน (E) ที่ระดับสูง (1) ซึ่งเป็นระดับปัจจัยที่ให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดหรือพิจารณาจากค่าเฉลี่ยจากการทดลองที่มีค่าสูงสุดดังตารางที่ 3

ดังนั้นจากการทำนายผลการทดลองด้วยวิธีทาคูชิ จากค่าเฉลี่ยระดับตัวแปรที่เหมาะสม คือ $A_1B_1C_2D_1E_3$ หรือระดับปัจจัยจากการทดลองที่ดีที่สุด คือ ความเร็วในการแปรผันที่ 500 mm/min กระแสไฟฟ้าในการแปรผันที่ระดับ 25 A อัตราการป้อนโลหะเติมที่ 6 m/min ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ชที่ 1 mm และมุมที่ใช้ในการแปรผันที่ 90° ปรากฏว่ามีค่าจากการทำนาย คือ 70.00 MPa ซึ่งมาจากการแทนค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองลงในสมการสมการที่ 2 เมื่อ Y คือ ค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดจากการทำนาย และ T คือ ค่าเฉลี่ยรวม (Overall mean) โดยสมการสำหรับทำนายที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 67.20 % และเมื่อได้ทำการยืนยันผล (Confirmation test) จากการทำนายโดยการทดลองที่ปัจจัยดังกล่าวทำให้มีค่าความความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยเท่ากับ 68.40 MPa ซึ่งลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทำนายโดยมีความแตกต่างประมาณ 2.29 %

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานแรงเฉือน ค่า S/N ratio และค่าเฉลี่ย(Mean)

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



รูปที่ 2 ผลกระทบของปัจจัย

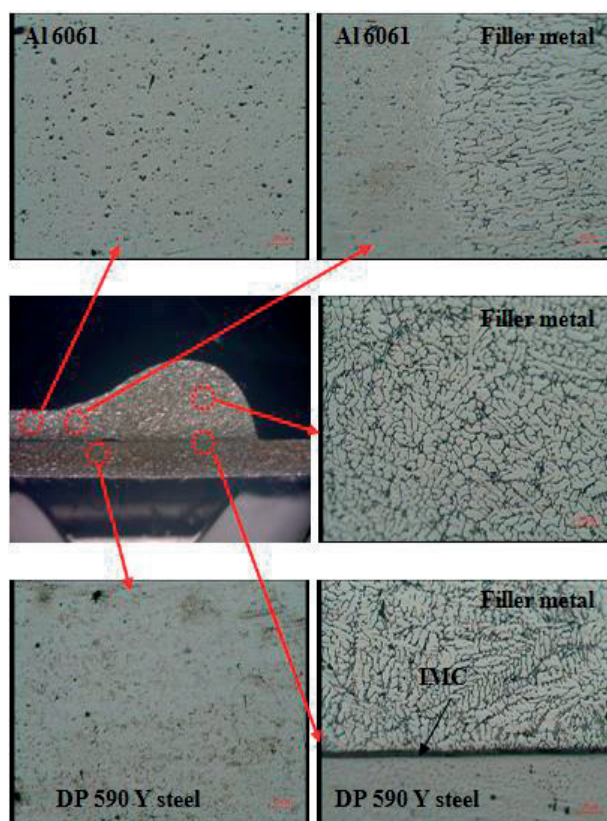
ตารางที่ 3 ผลตอบสนองสำหรับค่าเฉลี่ยจากการทดลอง

ระดับ	A	B	C	D	E
1	49.87	48.14	40.71	42.04	34.70
2	30.95	35.06	45.42	36.01	41.32
3	37.46	35.08	32.16	40.23	42.25
Delta	18.92	13.07	13.24	6.04	7.56
Rank	1	3	2	5	4

$$\begin{aligned}
 Y &= A_1 + B_1 + C_2 + D_1 + E_3 - 4T \\
 &= 49.87 + 48.14 + 45.42 + 42.04 + 42.25 \\
 &\quad - 4 (39.43)
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

4.2 โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

ในเบื้องต้นเมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อแสดงให้เห็นลักษณะของรอยต่อจากการแล่นประสานของวัสดุซึ่งประกอบด้วย โลหะพื้นอะลูมิเนียม 6061 (Al 6061 substrate) โลหะพื้นเหล็ก DP 590 Y (DP 590 Y steel substrate) โลหะเติม (Filler metal) และชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound; IMC) แสดงองค์ประกอบของรอยต่อจากการแล่นประสานดังรูปที่ 3 สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างอะลูมิเนียมและโลหะเติมเกิดการเข้ากันได้ดีกว่าเหล็กและโลหะเติม เนื่องจากโลหะเติมมีส่วนผสมของอะลูมิเนียมและซิลิคอนอยู่ซึ่งเป็นโลหะผสมชนิดที่มีจุดหลอมเหลวเพียง 580 °C ขณะที่โลหะพื้นอะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 650 °C [15]

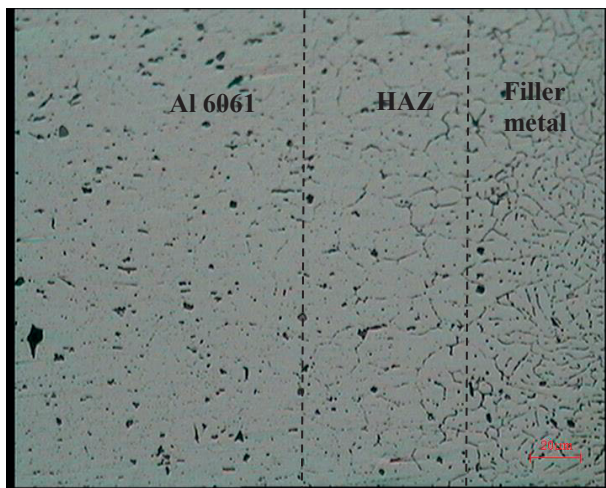


รูปที่ 3 องค์ประกอบของรอยต่อจากการแล่นประสาน

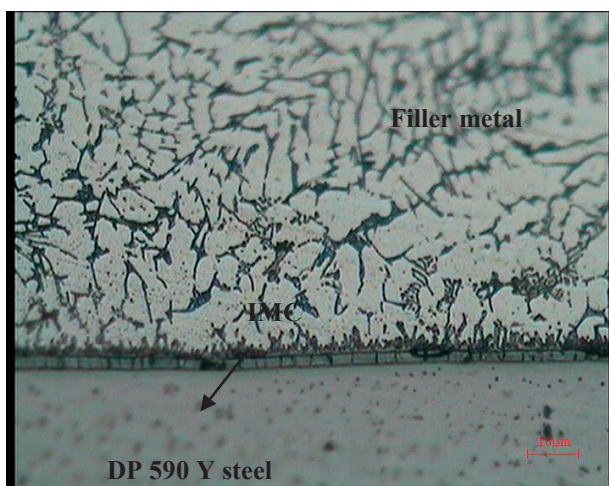
ความแตกต่างของจุดหลอมเหลวจึงทำให้การเชื่อมต่อเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเหล็กที่มีจุดหลอมเหลวสูง สำหรับบริเวณโลหะเติมแสดงโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 4 ระหว่างการเชื่อมต่อของโลหะเติมและโลหะพื้นอะลูมิเนียมเนื้ออหิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการแล่นประสานส่งผลให้เกิดบริเวณกระแทก (HAZ) กับโลหะพื้นอะลูมิเนียมสามารถเห็นได้ชัดเจนในเนื้ออะลูมิเนียมซึ่งติดกับบริเวณที่มีการหลอมเหลวของโลหะเติมแสดงดังรูปที่ 5 โดยบริเวณดังกล่าวจะเกิดการโตของเกรน เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนในกระบวนการแล่นประสานและมีขนาดเกรนที่โตกว่าบริเวณโลหะเติม แต่การละลายเข้าด้วยกันของอะลูมิเนียมและโลหะเติมในงานวิจัยนี้ไม่แสดงให้เห็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ระหว่างรอยต่อของอะลูมิเนียมและโลหะเติม (Al/Filler metal) สำหรับการประสานเข้าด้วยกันระหว่างโลหะเติมและโลหะพื้นเหล็กที่ระหว่างพื้นผิวเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะที่ระหว่างพื้นผิวของโลหะเติมและเหล็ก (Filler Metal/IMC/Steel) ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะเติม



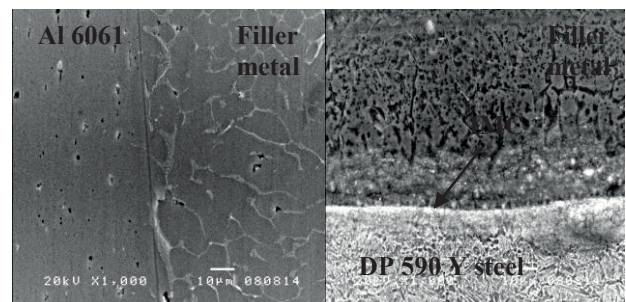
รูปที่ 5 บริเวณกระพร้อนบนโลหะพื้นอะลูมิเนียม



รูปที่ 6 ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้น

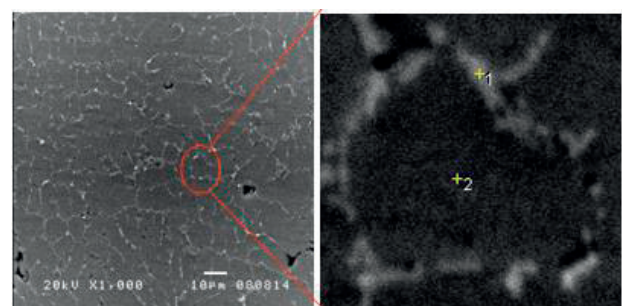
เมื่อนำตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดซึ่งได้มาจากการเลือกตัวแปรเงื่อนไขที่เหมาะสมมาตรวจสอบด้วย SEM แสดง

ภาพถ่ายบริเวณรอยต่อได้ดังรูปที่ 7 สำหรับอะลูมิเนียมและโลหะเติม (รูปที่ 7 (a)) โลหะเติมและเหล็ก (รูปที่ 7 (b)) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า รูปที่ 8 (a) พบเกรนของสารประกอบที่เกิดขึ้นบนเมตริกซ์หลักของอะลูมิเนียมกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวบริเวณโลหะเติมเมื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ EDS ในโลหะเติมตำแหน่งเฟสที่ต่างกันในรูปที่ 8 (b) ซึ่งผลจากการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 9 และ 10 จากตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แสดงให้เห็นตำแหน่งที่ 1 เกิดสารประกอบเชิงโลหะที่มีอัตราส่วนของอะลูมิเนียม ซิลิคอนและเหล็กเท่ากับ 80.71, 11.85 และ 7.44 wt. % ขณะที่ตำแหน่งที่ 2 เป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่มีอยู่ถึง 97.76 wt. % ซึ่งซิลิคอนแพร่เข้าไปรวมอยู่บริเวณตำแหน่งที่ 1 และพบซิลิคอนเพียง 2.24 wt. % โดยไม่พบ Fe จากการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11 การกระจายตัวของ Fe ที่พบในโลหะเติมเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่จากโลหะพื้นและการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบสารประกอบเชิงโลหะ $FeAl_3Si_2$ ที่บริเวณรอยต่อจากการแล่นประสานผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 12 สำหรับซิลิคอนที่มีอยู่ในชั้นสารประกอบเชิงโลหะซึ่งมาจากโลหะเติมจะทำให้รอยต่อมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นและช่วยให้การละลายของเหล็กในบริเวณที่หลอมละลายเพิ่มขึ้นและกลไกการเติบโตของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะถูกควบคุมโดยอะตอมของเหล็ก [16, 17] ตลอดจนซิลิคอนจะลดการเกิดขึ้นของเฟสสารประกอบเชิงโลหะที่มีองค์ประกอบของเหล็กและอะลูมิเนียม (Fe_xAl_y) โดยการลดการแพร่ของเหล็กในอะลูมิเนียม [15]



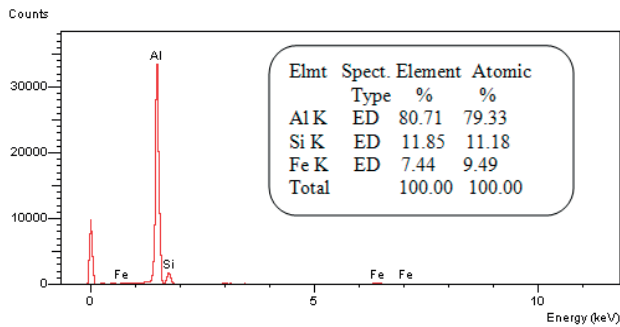
(a) (b)

รูปที่ 7 SEM รอยต่อจากการแล่นประสาน

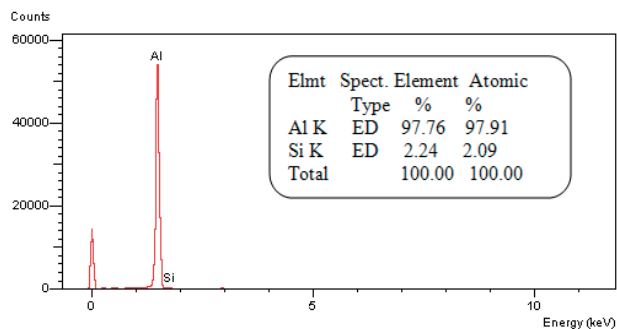


(a) (b)

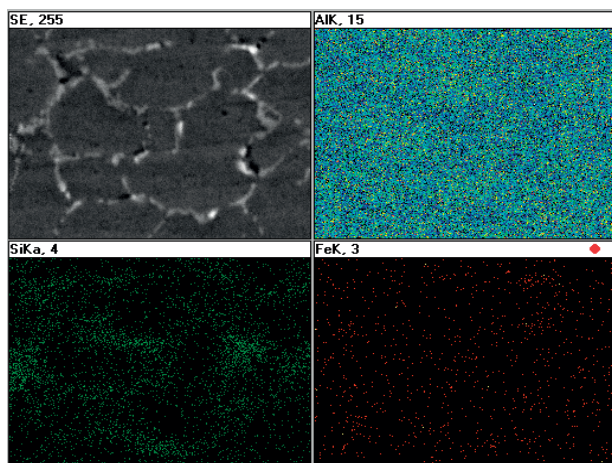
รูปที่ 8 SEM บริเวณโลหะเติม



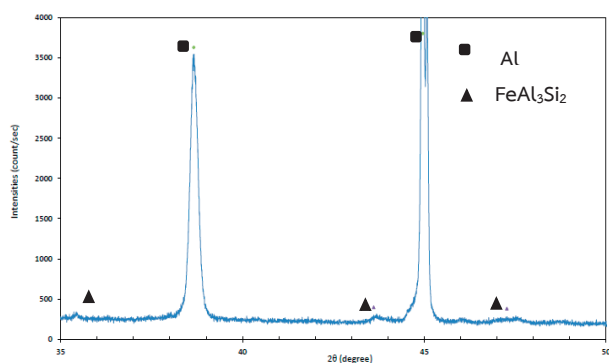
รูปที่ 9 EDS ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 10 EDS ตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 11 การกระจายตัวของ Al, Si และ Fe



รูปที่ 12 ผลการตรวจสอบ XRD

จากสเปกตรัมระหว่าง Fe และ Al แสดงให้เห็นสารละลายของแข็ง (Solid solution) ของ α Fe และ Al โดยสารประกอบเชิงโลหะที่สามารถเกิดขึ้นได้ เช่น Fe_3Al , FeAl , Fe_2Al_3 , FeAl_2 , Fe_2Al_5 และ FeAl_3 ซึ่งจะพบมากสำหรับการต่ออะลูมิเนียมและเหล็ก อย่างไรก็ตามโดยธรรมชาติชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงสูง โดย FeAl_3 มีความแข็งแรง 892 HV, Fe_2Al_5 มีความแข็งแรง 1013 HV, FeAl_2 มีความแข็งแรง 1060 HV, FeAl มีความแข็งแรง 470 HV และ Fe_3Al มีความแข็งแรง 350 HV [18] สำหรับ Fe_3Al และ FeAl จึงเป็นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความต้านทานการสึกหรอ ต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานการกัดกร่อนได้ดีและมีสมบัติด้านความแข็งแรงดีเป็นพิเศษ แต่สำหรับ FeAl_2 และ Fe_2Al_5 ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่สูงจะมีความเปราะ [19] โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความเข้มข้นของอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงและเปราะ ในขณะที่ชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความเข้มข้นของเหล็กจะมีความเหนียวและความแข็งแรงสูง ดังนั้นการเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะที่มีความเหนียวมากจะทำให้รอยต่อมีความแข็งแรงสูงด้วย [20]

อย่างไรก็ตามที่ระหว่างรอยต่อเวลาการหลอมละลายของ Seem เป็นปัจจัยที่สำคัญของการควบคุมความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นที่ระหว่างรอยต่อซึ่งสามารถควบคุมได้ เช่น กำหนดความเร็วในการแล่นประสาน โดยความหนาของชั้นสารประกอบเชิงโลหะจะลดลงได้กับการเพิ่มความเร็วในการแล่นประสาน เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนที่ทำให้ชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความร้อน [18] หรือควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแล่นประสานซึ่งจะสามารถควบคุมความร้อนในกระบวนการได้เช่นกัน เนื่องจากขนาดของชั้นสารประกอบเชิงโลหะขึ้นอยู่กับความร้อนในกระบวนการและการให้ความร้อนไม่สูงทำให้สามารถลดบริเวณกระแทกที่เพิ่มขึ้นกับโลหะพื้นอะลูมิเนียมได้ [21] จากการทดลองถึงแม้ว่าระดับปัจจัยที่เลือกในการทดลองเป็นเงื่อนไขที่เพิ่มสมบัติทางกลของรอยเชื่อมประสาน แต่ไม่ได้เป็นปัจจัยที่ทำให้มีให้ขนาดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวโลหะเดิมและโลหะพื้นเหล็กมีขนาดบาง เนื่องจากชั้นที่มีขนาดบางในการทดลองนี้เกิดในกรณีการปรับปรุงแล้วทำให้มีแนวเชื่อมประสานที่ไม่สม่ำเสมอเกิดช่องว่างระหว่างรอยเชื่อมประสานจึงทำให้สมบัติทางกลลดลงเช่นกัน

5. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการแล่นประสานแบบ มีกต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในการเชื่อมประสานอะลูมิเนียมเข้ากับเหล็กชนิดแข็งแรงพิเศษพบว่า ตัวแปรที่เหมาะสมและให้ค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดจากการทดลองและกำหนดตัวแปรด้วยวิธีการทากูชิ คือ ความเร็วในการแล่น

ประสานที่ 500.0 mm/min กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแล่นประสานที่ 25.0 A อัตราการป้อนโลหะเติมที่ 6.0 m/min ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ชที่ 1 mm และมุมที่ใช้ในการแล่นประสานที่ 90 ° ผลการทำนายปรากฏว่ามีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด 70.00 MPa หลังการแล่นประสานแสดงให้เห็นโลหะพื้นอะลูมิเนียมสามารถประสานเข้ากับโลหะเติมได้ดีกว่าโลหะพื้นเหล็ก ที่ระหว่างรอยต่อของอะลูมิเนียมและโลหะเติมไม่แสดงให้เห็นการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่ระหว่างรอยต่อสำหรับบริเวณโลหะเติมพบสารประกอบเชิงโลหะที่มีอัตราส่วนของอะลูมิเนียม ซิลิคอนและเหล็กกระจายอยู่บนพื้นผิวที่มีความเข้มข้นของอะลูมิเนียมและระหว่างรอยต่อของเหล็กและโลหะเติมพบสารประกอบเชิงโลหะชนิด FeAl_3Si_2 เกิดขึ้นที่ระหว่างพื้นผิว

ผลจากการวิจัยสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาการต่อวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมได้เนื่องจากผลการทดลองปัจจัยที่เหมาะสมวัสดุต่างชนิดสามารถเชื่อมประสานเข้ากันได้ แต่อย่างไรก็ตามควรพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆนอกเหนือจากที่ได้ศึกษาไว้ในงานวิจัยนี้ ตลอดจนควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้โลหะเติมชนิดที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกับที่ได้ทดลองไว้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้เฉพาะโลหะผสม Al-12Si เท่านั้น ซึ่งโลหะผสมชนิดอื่นๆอาจจะทำให้คุณลักษณะจากการแล่นประสานที่เกิดขึ้นดีกว่าชนิดนี้ได้เช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนตามสัญญาเลขที่ A49/2014

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Advanced materials ในอุตสาหกรรมยานยนต์. (2009, September 12) [Online]. Available: <http://www.viboon.org>
- [2] Electricity & Industry. [Online]. Available: http://issuu.com/tmmedia/docs/electricity_2-57
- [3] Ryosuke, A. Yasuhide, N. How does driving behavior change when following an eco-driving car. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2011; 20: 577–587.
- [4] Zhang, H.T. Feng, J.C. He, P. Hackl, H. Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium–zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding–brazing process. 2007; 58: 588–592.
- [5] Coelho, R.S. Kostka, A. Dos Santos, J.F. Kaysser-Pyzalla, Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure. *Materials Science and Engineering*: Available online 5 July 2012.
- [6] Sodjit, S. and Uthaisangsuk, V. Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase steels. *Materials & Design*. 2012; 41: 370–379.
- [7] Mathieu, A. Shabadi, R. Deschamps, A. Suery, M. Mattei, S. Grevey, D. and Cicala, E. Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire). *Optics & Laser Technology*. 2007; 39: 652–661.
- [8] Song, J.L. Lin, S.B. Yang, C.L. Fan, C.L. Ma, G.C. Liu, H. Spreading behavior and microstructure characteristics of dissimilar metals TIG welding–brazing of aluminum alloy to stainless steel. *Materials Science and Engineering*, 2009; 509: 31–40.
- [9] Groover, M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing Material, Processes, and Systems*, 4th Edition, 2007, John. Wiley & Sons, Inc. pp. 712–715.
- [10] Javadi, Y. Sadeghi, S. and Najafabadi, M.A. Taguchi optimization and ultrasonic measurement of residual stresses in the friction stir welding. *Materials & Design*, 2014; 55: 27–34.
- [11] Guo-liang, Q. Yu-hu, S. and Shu-jun, W. Microstructures and properties of welded joint of aluminum alloy to galvanized steel by Nd:YAG laser + MIG arc hybrid brazing–fusion welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24: 989–995.
- [12] Ganjigatti, J.P. Kumar Pratihari, D. and Roy Choudhury, A. Global versus cluster-wise regression analyses for prediction of bead geometry in MIG welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007; 189: 352–366.
- [13] Benyounis, K.Y. and Olabi, A.G. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches – A reference guide. *Advances in Engineering Software*, 2008; 39: 483–396.
- [14] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูรณ์. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2521. หน้า 295–305.
- [15] Cicala, A. et.al Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si). *Materials Science and Engineering*, 2006; 435–436: 19–28.
- [16] Song, J.L. Lin, S.B. Yang, C.L. and Fan, C.L. Effects of Si additions on intermetallic compound layer of aluminum–steel TIG welding–brazing joint. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009; 20: 217–222.
- [17] Yongchao, S. Xueming, H. and Yixiong, W. Influence of alloy elements on microstructure and mechanical property of aluminum–steel lap joint made by gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014; 214: 750– 755.

- [18] Dharmendra, C. Rao, K.P. Wilden, J. and Reich, S. Study on laser welding–brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler. Materials Science and Engineering: 2011; 528: 1497–1503.
- [19] Dharmendra, C. Rao, K.P. Wilden, J. and Reich, S. Study on laser welding–brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler. Materials Science and Engineering: 2011; 528: 1497–1503.
- [20] Hitoshi, O. and Muneharu, K. Dissimilar Metal Joining of Zinc Coated Steel and Aluminum Alloy by Laser Roll Welding. [Online]. Available: <http://www.intechopen.com>
- [21] Zhang, H. and Liu, J. Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy/stainless steel lap joints fabricated by MIG welding–brazing process. Materials Science and Engineering. 528, 2011; 6179–6185.



8. ประวัติผู้วิจัย

นายนิวัฒน์ มูแก้ม

อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ขอบเขตงานวิจัยที่สนใจ คือ กระบวนการผลิตและการต่อวัสดุแบบต่างๆ ได้แก่ การเชื่อม (Welding) การบัดกรี (Soldering) และการเชื่อมประสาน (Brazing)