

อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมฟริกชันสเตอร์ต่อสมบัติรอยต่อของอลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า FSW Welding Parameters Effect on Lap Joint Property of Aluminum Alloy and Steel

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์¹⁾ และอนินท์ มิมนต์²⁾

บทคัดย่อ

รอยต่อเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมผสมเบอร์ A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเบอร์ SS400 ได้ถูกทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบฟริกชันสเตอร์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม เช่น ความเร็วรอบของเครื่องมือ ความเร็วในการเชื่อม และความลึกของตัวกวนที่สอดเข้าไปในเนื้อวัสดุ ผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อ และส่งผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของรอยต่อ การเพิ่มความเร็วยรอบของตัวกวนทำให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียมชนิด FeAl₃ ที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อ การเพิ่มความเร็วยรอบในการเชื่อมสามารถเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อเนื่องจากสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะที่ก่อตัวบริเวณอินเทอร์เฟซมีปริมาณลดลง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเร็วยการเชื่อมมากเกินไปทำให้เกิดจุดบกพร่องที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อ การเพิ่มความลึกของตัวกวนทำลายความแข็งแรงของรอยต่อ เนื่องจากความลึกของตัวกวนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะและขนาดของจุดบกพร่องที่เกิดที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: รอยต่อเชื่อม; อลูมิเนียมผสม; เหล็กกล้า; การเชื่อมแบบ ฟริกชันสเตอร์; การทดสอบแรงดึงเฉือน

Abstract

A lap joint of A5083 aluminum alloy and SS400 steel was produced by Friction Stir Welding (FSW) using the various process parameters such as rotational speed, traverse speed and pin depth. The variations of welding parameters produced various characteristic interfaces and had conspicuous influences on the joint properties. Increasing the rotational speed decreased the shear load of the joint due to producing a thick FeAl₃ intermetallic compound (IMC) at the interface. When traverse speed increased, the shear load increased because IMC thickness at the interface decreased, however, when the speed was so high, an incomplete interface was formed. Increasing the pin depth produced a thick FeAl₃ IMC phase and an incomplete interface that directly deteriorated the shear load of the joint.

Keywords : lap joint; aluminum alloy; steel; friction stir welding; tensile shear test

บทนำ

โครงสร้างที่ประกอบด้วยเหล็กกล้าและอลูมิเนียมมีความสำคัญและถูกประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ในปัจจุบันเนื่องจากการลดลงของน้ำหนักของรถยนต์ส่งผลต่อการใช้เชื้อเพลิงอย่างมี

^{1) 2)} อาจารย์ ภาควิชาอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

โทรศัพท์/โทรสาร : 0-2549-3490 จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ jomyut@rmut.ac.th1) และ anin@rmut.ac.th2)

ประสิทธิภาพ [1] อย่างไรก็ตามในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กเพื่อนำไปใช้งานนั้นมีความยากลำบาก การควบคุมความร้อนต้องเป็นไปอย่างระมัดระวัง เนื่องจากจุดหลอมเหลวของวัสดุมีความแตกต่างกัน นอกจากนั้นหลังจากการเชื่อมพบว่าสารประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic compound: IMC) ที่มีความแข็งและเปราะมักก่อตัวขึ้นภายในเนื้อโลหะเชื่อมและเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการลดลงของค่าความแข็งแรงของรอยต่อ โดยทั่วไปเป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งเป็นกระบวนการเชื่อมที่ต่อวัสดุเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุซึ่งทางปฏิบัติคาดว่าจะเป็นการวิธีที่หลีกเลี่ยงการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะได้ บางกระบวนการ เช่น การเชื่อมฟริกชันสเตอร์ (Friction Stir Welding: FSW) สามารถทำการเชื่อมอลูมิเนียมผสมซึ่งเป็นวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อม [2-5] และสามารถทำการเชื่อมวัสดุต่างชนิดเข้าด้วยกันได้ [6-8] ด้วยเหตุนี้การเชื่อมแบบฟริกชันสเตอร์จึงเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความสนใจในการประยุกต์ใช้เพื่อทำการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียมเข้ากับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

กระทั่งปัจจุบันมีงานวิจัยค่อนข้างน้อยที่ศึกษาและรายงานผลเกี่ยวกับการเชื่อมรอยต่อของอลูมิเนียมผสมเข้ากับเหล็กด้วยการเชื่อมฟริกชันสเตอร์ ผู้วิจัย [9] ได้รายงานการประยุกต์ใช้ FSW ในการเชื่อมรอยต่อของอลูมิเนียมผสม A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด มีค่าประมาณร้อยละ 86 ของความแข็งแรงของอลูมิเนียมซึ่งใช้เป็นวัสดุหลัก นอกจากนั้นยังแสดงการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะ $FeAl_3$ ที่มีความแข็งเปราะบริเวณแนวเชื่อมภายใต้บ่าของตัวคววนและเป็นจุดที่ลดความแข็งแรงแนวเชื่อม Chen และ Kovacevic [10] เชื่อมอลูมิเนียมผสม Al6061 เข้ากับเหล็กกล้า AISI1018 และแสดงสารประกอบกึ่งโลหะ ชนิด Fe_4Al_{13} และ Fe_2Al_5 ภายในแนวเชื่อมของรอยต่อ อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบกึ่งโลหะและกลสมบัติของรอยต่อไม่ได้รายงานไว้ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ FSW

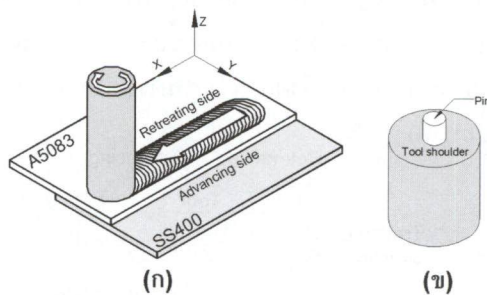
ในการเชื่อมรอยต่อของอลูมิเนียมผสมที่มีปริมาณของแมกนีเซียมสูงเข้ากับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำยังไม่มีการศึกษาและแสดงผลไว้ ดังนั้นในการศึกษานี้ ผู้วิจัยจึงทำการประยุกต์ใช้ FSW ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 โดยในการศึกษาได้ทำการศึกษาดัชนีการเชื่อมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติทางกลของรอยต่อ เช่น ความเร็วของตัวคววน ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และความลึกของตัวคววนที่สอดเข้าไปในเนื้อโลหะ ในรายงานนี้แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อและเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของรอยต่อ

2. วิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ อลูมิเนียมผสม เกรด A5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ที่มีความหนาของแผ่นรีด 3 มิลลิเมตร (mm.) ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุแสดงไว้ในตารางที่ 1

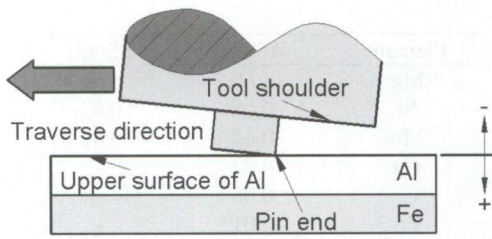
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ (% โดยน้ำหนัก)

Element	A5083	SS400
Mg	4.60	-
Si	0.08	0.02
Mn	0.62	0.42
Cu	0.02	-
Cr	0.06	-
Zn	0.01	-
Ti	0.02	-
C	-	0.15
P	-	0.21
S	-	0.06
Al	Balance	-
Fe	0.21	Balance



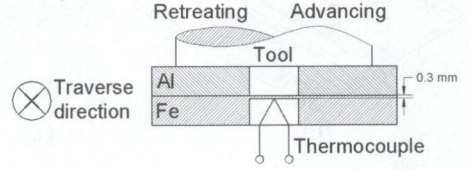
รูปที่ 1 (ก) การเชื่อมฟริกชันสเตอร์รอยต่อของอลูมิเนียมและเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และ (ข) รูปร่างของเครื่องมือ

แผ่นวัสดุถูกตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 55 mm. ยาว 100 mm. ผิวทุกด้านของแผ่นวัสดุถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150 แล้วเช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตน และทำการประกอบเป็นรอยต่อเกย โดยที่แผ่นอลูมิเนียมถูกวางเกยแผ่นเหล็ก 30 mm. ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเบอร์ JIS-SKH57 โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของบ่าเครื่องมือคือ 20 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกวน (Pin) มีขนาด 5 mm. ความยาวของตัวกวน 3.0 ถึง 3.3 mm. มุมเอียงของเครื่องมือต่อแกนตั้งของเครื่องมือมีค่า 1 องศา ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) ในกระบวนการเชื่อมเครื่องมือที่กำลังหมุนจะสอดเข้าไปในเนื้อโลหะด้วยอัตราความเร็ว 0.6 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min.) จนกระทั่งปลายของตัวกวนสอดเข้าถึงระยะความลึกที่กำหนด ความลึกของตัวกวนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 3.1 ถึง 3.4 mm. ค่าความลึกของตัวกวนกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.0 mm. เมื่อส่วนปลายของตัวกวนสัมผัสกับผิวด้านบนของรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2



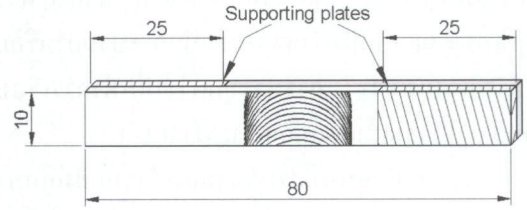
รูปที่ 2 การจัดระยะความลึกของตัวกวนที่ค่าเป็นศูนย์

(ค่าความลึก 3.0 mm. ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ตัวกวนสัมผัสกับอินเทอร์เฟซไม่ได้ทำการศึกษาเนื่องจากที่ตำแหน่งนี้ รอยต่อเกยมีความแข็งแรงต่ำ รอยต่อทั้งหมดเกิดการพังทลายเมื่อทำการถอดชิ้นงานออกจากตัวยึดบนฐานของเครื่องกัดส่งผลให้ไม่สามารถทำการเตรียมชิ้นทดสอบได้)



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของรอยต่อ

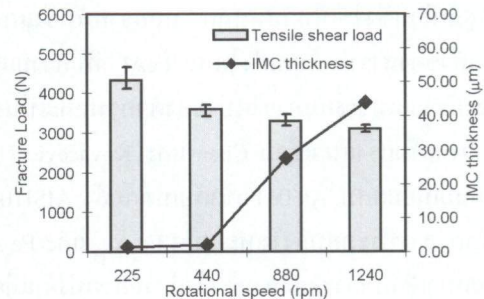
จากนั้นตัวกวนจะถูกแช่ไว้ที่ตำแหน่งจุดเริ่มต้นเป็นเวลา 30 วินาที ก่อนที่เดินแนวเชื่อมตามแกน X ของรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 1 ค่าอุณหภูมิของรอยต่อทำการวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค โดยทำการเชื่อมยึดลงไปบนแผ่นเหล็กดังรูปที่ 3 และทำการวัดอุณหภูมิ 3 จุดที่ระยะ 30 50 และ 70 mm. ตามแนวเชื่อม ชิ้นงานการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยต่อถูกเตรียมในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวเชื่อม โดยแนวเชื่อมมีตำแหน่งอยู่ตรงกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ และขนาดของชิ้นทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4 ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างของอินเทอร์เฟซถูกเตรียมในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวเชื่อม โดยชิ้นทดสอบถูกเตรียมตามกรรมวิธีการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จากนั้นชิ้นงานจะถูกนำมาทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM)



รูปที่ 3 มิติของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อม (หน่วย : mm)

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

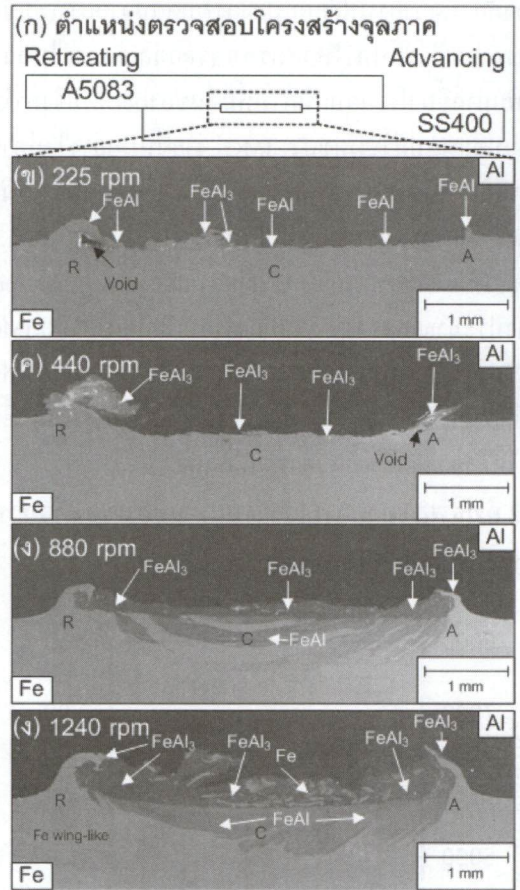
3.1 อิทธิพลของความเร็วรอบตัวกวนต่อความแข็งแรงของรอยต่อ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงพังทลาย ความหนาของ IMC และความเร็วรอบตัวกวน

รอยต่อถูกเชื่อมด้วยความเร็วรอบ ของตัวกวน ระหว่าง 225 ถึง 1240 รอบต่อนาที (rpm) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 24 mm/min. ความลึกของตัวกวน 3.1 mm. รูปที่ 5 แสดงค่าความล้มพังระหว่างแรงพังทะลาย (Fracture load) ความหนาของสารประกอบกึ่งโลหะที่ก่อตัวบนอินเทอร์เฟซของรอยต่อ และความเร็วรอบของตัวกวน ค่าแรงพังทะลายมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น และค่าความหนาของสารประกอบกึ่งโลหะที่เพิ่มขึ้น ค่าแรงพังทะลายสูงสุดสามารถตรวจสอบได้ที่ความเร็วรอบ 225 rpm ซึ่งเป็นค่าความเร็วรอบต่ำสุด และแสดงค่าประมาณ 4,331 นิวตัน ภาคตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อมของรอยต่อที่ความเร็วรอบต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 6 รูปสี่เหลี่ยมรอบอินเทอร์เฟซในรูป 6ก. คือตำแหน่งที่มีการตรวจสอบโครงสร้างของอินเทอร์เฟซ ส่วนผสมทางเคมีของเฟสต่างๆที่ก่อตัวขึ้นได้ทำการตรวจสอบเชิงปริมาณด้วย การวัดกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ (X-ray energy-dispersive: EDS) ที่ความเร็วรอบที่ต่ำ เช่น 225 rpm เฟสบางๆของสารประกอบกึ่งโลหะชนิด FeAl ได้ก่อตัวขึ้นบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อขณะเมื่อความเร็วรอบเพิ่มสูงขึ้น เช่น 440 ถึง 1,240 rpm เฟสสารประกอบกึ่งโลหะชนิด FeAl₃ เกิดการก่อตัวขึ้น การกำหนดชนิดของสารประกอบในรายงานนี้ทำการคำนวณหาอัตราส่วนของส่วนผสมทางเคมีระหว่างอลูมิเนียมกับเหล็กและทำการเปรียบเทียบกับสารประกอบกึ่งโลหะที่ปรากฏในแผนภาพสมดุลเฟสของเหล็กและอลูมิเนียม [11] เท่านั้น ค่าที่ได้จึงเป็นเพียงค่าประมาณ ด้วยเหตุนี้หากจำเป็นต้องทราบชนิดของสารประกอบกึ่งโลหะที่แม่นยำ ควรทำการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) ต่อไป ค่าส่วนผสมทางเคมีของเฟสที่ก่อตัวในตำแหน่งอินเทอร์เฟซของรอยต่อแสดงไว้ในตารางที่ 2 ค่าความหนาของ IMC ซึ่งหาได้จากการคำนวณค่าความหนาเฉลี่ยจาก 20 จุดของอินเทอร์เฟซด้านรีทริทิงและแอดวานซิง พบว่าค่าความหนามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของ IMC มี

สาเหตุมาจากค่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้อุณหภูมิที่อินเทอร์เฟซมีค่าสูงและทำให้วัสดุรอบๆอินเทอร์เฟซง่ายต่อการก่อตัวเป็นสารประกอบ



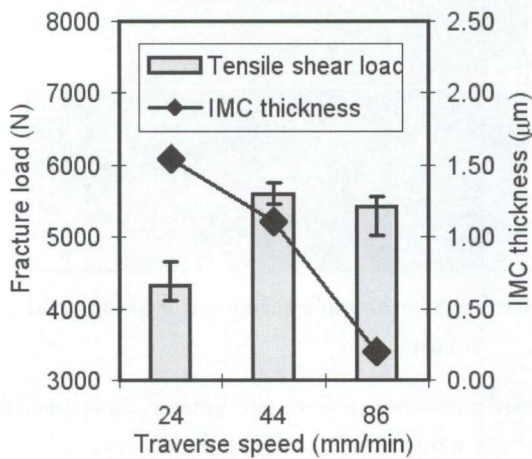
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อที่ความเร็วรอบต่างๆ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของ IMC ที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อที่ความเร็วรอบตัวกวนต่างๆ (%โดยอะตอม)

ความเร็วรอบ (rpm)	IMC	Fe	Al	Mg	O
225	FeAl	45.28	47.98	0.98	5.85
	FeAl ₃	22.68	69.13	2.01	6.14
440	FeAl ₃	23.20	66.93	0.73	9.10
	FeAl	48.55	46.14	5.31	0.00
880	FeAl ₃	21.91	66.22	9.91	1.97
	FeAl	58.33	53.05	2.45	0.16
1240	FeAl ₃	21.12	67.01	1.97	9.91

ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ของความเร็วรอบ 225 ถึง 1,240 rpm มีค่าประมาณ 740 765 789 และ 799 เคลวิน (K) ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยของอุณหภูมิที่บริเวณอินเทอร์เฟซกับการเปลี่ยนแปลงชนิดของ IMC ยังคงเป็นที่สงสัย คาดว่าการเปลี่ยนแปลงอาจเกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบทำให้วัสดุรอบๆรอยต่อเกิดการไหลวนที่เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงชนิดของ IMC ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามการอธิบายนี้ควรทำการศึกษาต่อไป เนื่องจาก IMC ชนิด $FeAl_3$ เป็นสารประกอบที่มีความแข็งและเปราะ [12-13] (ค่าความแข็งของเฟส $FeAl_3$ ที่ความเร็วรอบ 1,240 rpm มีค่าประมาณ $685 HV_{0.01}$) เมื่อเปรียบเทียบกับ $FeAl$ IMC ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่สามารถอธิบายได้ว่าค่าการต่อของเฟสที่มีความแข็งเปราะและหนาเมื่อความเร็วรอบเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลง

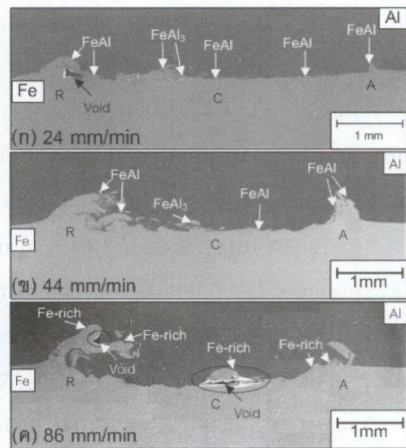
3.2 อิทธิพลของความเร็วเดินแนวเชื่อมของตัวถวนต่อความแข็งแรงของรอยต่อ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงพังทะลาย ความหนาของ IMC และความเร็วเดินแนวเชื่อม

ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมรอยต่อ คือ ความเร็วรอบของตัวถวน 225 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 24 44 และ 86 mm/min. และความลึกของตัวถวน 3.1 mm. ค่าความต้านทานแรงพังทะลายมี

ค่าเพิ่มจาก 24 เป็น 44 mm/min. และลดลงเล็กน้อยเมื่อความเร็วการเดินแนวเปลี่ยนเป็น 86 mm/min. ค่าความต้านทานแรงพังทะลาย มีค่าสูงสุด 5,591 นิวตัน ดังในรูปที่ 7 และ รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อที่ความเร็วเชื่อมต่างกันจุดบกพร่องสามารถตรวจพบได้ที่รอยต่อของความเร็วเชื่อม 24 และ 86 mm/min. โครงสร้างที่บริเวณอินเทอร์เฟซวิเคราะห์ด้วย EDS พบว่า เฟส $FeAl$ และ $FeAl_3$ (ค่าส่วนผสมทางเคมีของ IMC แสดงในตารางที่ 3) ก่อตัวที่อินเทอร์เฟซของความเร็วเชื่อม 24 และ 44 mm/min. เฟส $FeAl_3$ ก่อตัวขึ้นเฉพาะรอบๆ ส่วนของเหล็กที่ถูกดันเข้าไปอยู่ในพื้นหลักอลูมิเนียมเท่านั้น ดังแสดงในรูป 8(ก) และ (ข) นอกจากนั้นค่าความหนาของ IMC มีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 7 เนื่องจากปริมาณเฟสที่แข็งและเปราะมีปริมาณลดลง และเป็นสาเหตุทำให้ค่าความต้านทานแรงพังทะลายมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนานี้ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มเป็น 86 mm/min. เฟสของสารประกอบเปลี่ยนเป็นแบบ Fe-rich แต่ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเนื่องจากการเกิดจุดบกพร่องตามอินเทอร์เฟซของรอยต่อ จุดบกพร่องที่เกิดเนื่องจากค่าความเร็วที่สูง ประกอบกับความร้อนและเวลาสำหรับการเชื่อมให้เกิดการยึดติดของโลหะมีค่าน้อยเกินไป อุณหภูมิของรอยต่อมีค่าเป็น 740 728 และ 705 เคลวิน และความเร็ว 86 mm/min. แสดงค่าที่ต่ำสุด

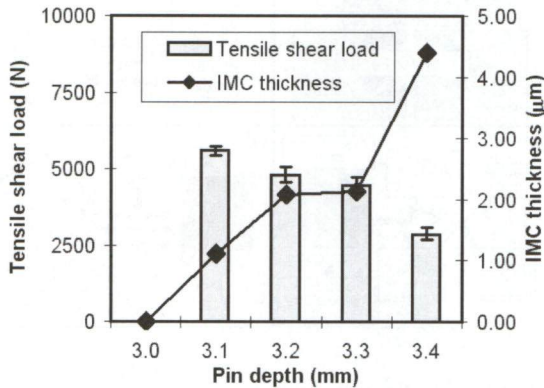


รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อแยกที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของ IMC ที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อที่ความเร็วเชื่อมต่างๆ (% โดยอะตอม)

ความเร็วเชื่อม (mm/min)	IMC	Fe	Al	Mg	O
24	FeAl	45.28	47.98	0.98	5.85
	FeAl ₃	22.68	69.13	2.01	6.14
44	FeAl	50.50	44.70	3.75	1.95
	FeAl ₃	22.25	68.25	1.92	7.66
86	Fe-rich	80.30	11.06	1.37	7.27

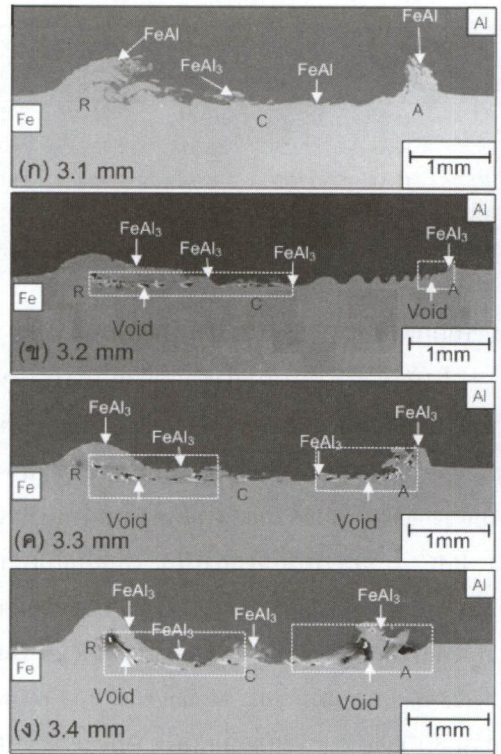
3.3 อิทธิพลความลึกของตัวกวนต่อความแข็งแรงของรอยต่อ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงพังทลาย ความหนาของ IMC และความลึกของตัวกวน

ในหัวข้อนี้ศึกษาอิทธิพลความลึกตัวกวนที่ลดลงไปในรอยต่อ และตัวแปรเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมรอยต่อคือ ความเร็วรอบ 225 rpm ความเร็วเชื่อม 44 mm/min ซึ่งเป็นตัวแปรที่ให้ค่าความต้านทานแรงพังทลายสูงสุดในหัวข้อที่ผ่านมา ความลึกของตัวกวนเปลี่ยนแปลงจากความลึก 3.1 ถึง 3.4 mm. ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของตัวกวน ความหนาของ IMC ที่ก่อตัวขึ้นในแนวเชื่อม และความแข็งแรงของแนวเชื่อมแสดงในรูปที่ 9 ความต้านทานต่อการพังทลายของรอยต่อมีค่าลดลงเมื่อความลึกของตัวกวนเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงพังทลายสูงสุด 5,591N สามารถวัดค่าได้เมื่อความลึกของตัวกวนมีค่า 3.1

mm. ซึ่งเป็นค่าเดียวกับสภาวะที่ให้ความต้านทานแรงพังทลายสูงสุดในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 10 โครงสร้างอินเทอร์เฟซรอยต่อแยกที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมต่างๆ

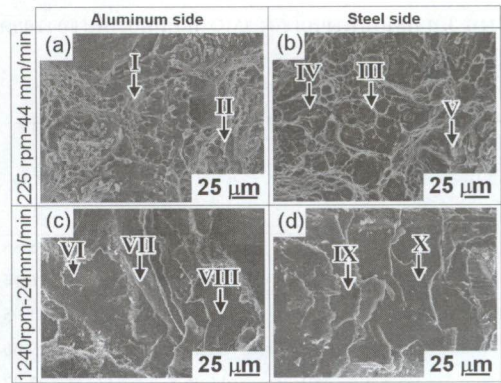
โครงสร้างอินเทอร์เฟซของรอยต่อที่ความลึกตัวกวน 3.2 ถึง 3.4 แสดงในรูปที่ 10 ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อและจุดบกพร่องก่อตัวขึ้นตามอินเทอร์เฟซของรอยต่อ จุดบกพร่องนี้มีขนาดขยายตัวใหญ่ขึ้นในพื้นที่ใกล้เคียงกับด้านรีทริทิงและแอดวานซ์เมื่อความลึกของตัวกวนเพิ่มขึ้น เฟส IMC ที่เปราะ FeAl ก่อตัวขึ้นที่อินเทอร์เฟซและมีความหนาเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความลึกตัวกวน สาเหตุเกิดจากการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อที่วัดค่าได้ 740 746 755 และ 799 เคลวิน ของรอยต่อความลึกตัวกวน 3.1 ถึง 3.4 mm ตามลำดับ อุณหภูมิที่สูงนี้ทำให้ง่ายต่อการเกิดสารประกอบเปราะในบริเวณอินเทอร์เฟซ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของความหนา IMC กับการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยของอุณหภูมิยังไม่เป็นที่เข้าใจในการศึกษานี้

ตารางที่ 4 ส่วนผสมทางเคมีของ IMC ที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อที่ความลึกตัวกวนต่างๆ (% โดยอะตอม)

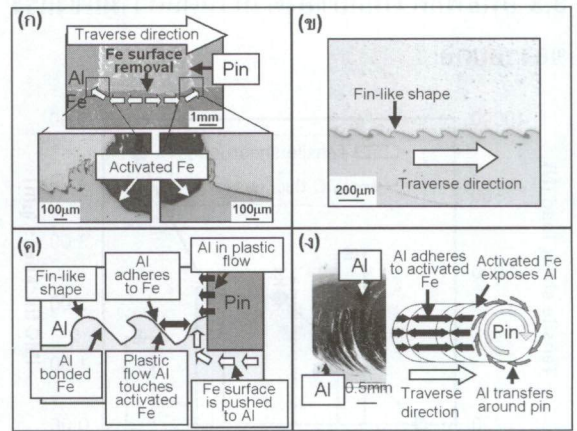
ความลึก (mm.)	IMC	Fe	Al	Mg	O
3.1	FeAl	50.50	44.70	3.75	1.95
	FeAl ₃	22.25	68.25	1.92	7.66
3.2	FeAl ₃	22.47	65.78	3.94	7.81
3.3	FeAl ₃	22.34	67.57	3.38	6.71
3.4	FeAl ₃	22.14	67.56	3.09	7.20

3.4 รอยแตกเสียหายของชั้นทดสอบกลสมบัติ

ในหัวข้อที่ผ่านมาผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความหนาของ IMC มีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยต่อ ในหัวข้อนี้จึงทำการตรวจสอบรอยต่อที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดและรอยต่อที่แสดงค่าความหนาของเฟส IMC ที่ก่อตัวบนอินเทอร์เฟซ เพื่อยืนยันผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา โดยทำการตรวจสอบรอยแตกหักของรอยต่อที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดซึ่งเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 225 rpm ความเร็วเชื่อม 44 mm/min. และ ความลึกตัวกวน 3.1 mm. และรอยต่อที่แสดงค่าความหนาของ IMC สูงสุดที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 225 rpm ความเร็วเชื่อม 44 mm/min. และ ความลึกตัวกวน 3.1 mm. รูปที่ 11(ก) และ (ข) แสดงภาพถ่าย SEM รอยแตกหักของแนวเชื่อมโดยแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดของด้านอลูมิเนียมและเหล็กตามลำดับ รอยแตกหักของอลูมิเนียมและเหล็กแสดงรูปแบบการแตกหักแบบดิมเปิล (Dimple Pattern) ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าเกิดการแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) ส่วนผสมทางเคมีของจุด I ถึง V ซึ่งตรวจสอบด้วย EDS เพื่อระบุตำแหน่งการแตกหักของรอยต่อบริเวณที่ตรวจสอบพบว่า รอยต่อนี้ไม่ได้เกิดจากการแตกหักที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อแต่เกิดขึ้นในพื้นที่หลักของอลูมิเนียม เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของจุดตรวจสอบทั้ง 5 ดังแสดงในตารางที่ 5 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมซึ่งใช้เป็นวัสดุในการทดลอง หากการแตกหักเกิดขึ้นที่บริเวณอินเทอร์เฟซ ส่วนผสมทางเคมีที่ตรวจสอบควรแสดงส่วนผสมทางเคมีที่มีค่าใกล้เคียงกับเฟส FeAl



รูปที่ 11 รอยแตกหักของชั้นทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อ



รูปที่ 12 กลไกการเชื่อมฟริกชั้นสแตร์รอยต่ออลูมิเนียมและเหล็ก (ก) การสร้างกระดุน (ข) โครงสร้างจุลภาคขนานทิศทางการเดินแนวเชื่อม (ค) รูปแบบการเกาะยึดของอลูมิเนียมและเหล็ก และ (ง) รูปแบบการเกาะยึดของอลูมิเนียมและเหล็ก (ภาพด้านบน)

ตารางที่ 5 ส่วนผสมทางเคมีของจุด I ถึง X ในรูปที่ 11 (% โดยอะตอม)

	เฟส	Fe	Al	Mg	O
I	Al	0.10	90.87	5.07	4.05
II	Al	0.45	88.71	5.96	4.88
III	Al	2.54	92.42	4.82	0.23
IV	Al	1.16	93.95	4.89	0.00
V	Al	0.79	91.70	5.50	5.01
VI	FeAl ₃	24.00	68.14	1.55	6.31
VII	FeAl ₃	23.49	67.47	3.70	5.35
VIII	FeAl ₃	23.04	67.75	3.45	5.76
IX	FeAl ₃	23.99	67.99	2.81	5.22
X	FeAl ₃	22.89	65.55	5.01	6.55

รูปที่ 11(ค) และ (ง) แสดงภาพถ่าย SEM ของรอยแตกหักของแนวเชื่อมที่แสดงความหนาของชั้น IMC สูงสุดที่ก่อตัวบนอินเทอร์เฟซของด้านอลูมิเนียมและเหล็กตามลำดับ ภาพถ่ายรอยแตกหักบริเวณที่ตรวจสอบแสดงรูปแบบการแตกหักแบบคลิเวจ (Cleavage Pattern) ที่บอกให้ทราบว่ารอยแตกหักนั้นเป็นการแตกหักแบบเปราะ เมื่อเปรียบเทียบกับรอยแตกหักของแนวเชื่อมที่แสดงค่าแรงดึงสูงสุด ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีที่จุด VI ถึง X บนผิวรอยแตกหักแสดงให้เห็นว่าการแตกหักของรอยต่อบริเวณที่ตรวจสอบเกิดการแตกหักในบริเวณชั้นของ IMC ที่เปราะเนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ทำการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับ IMC ในแผนภาพสมดุลอลูมิเนียมและเหล็ก [11] ดังแสดงในตารางที่ 5

การตรวจสอบรอยแตกหักยืนยันผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่าการก่อตัว และการเพิ่มขึ้นของ IMC ที่เปราะทำให้เกิดการลดลงของค่าความแข็งแรงของรอยต่อ ดังนั้นความพยายามในการลด IMC ที่ก่อตัวที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาต่อไป

3.5 กลไกการเชื่อมพริกชั้นสเตอรรอยต่ออลูมิเนียมและเหล็ก

ผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถสรุปกลไกและขั้นตอนในการเชื่อมพริกชั้นสเตอรรอยต่ออลูมิเนียมและเหล็กเข้าด้วยกันด้วยกระบวนการดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ตัวกวนที่หมุนสอดคล้องไปในชิ้นงานจนกระทั่งปลายของตัวกวนอยู่ในตำแหน่งความลึกที่กำหนด ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างวัสดุและตัวกวนทำให้วัสดุรอบๆตัวกวนอ่อนตัวเข้าสู่ภาวะพลาสติกไหล เหลวคล้ายของไหล (Fluid-like Plastic State) อลูมิเนียมจะเกิดการเคลื่อนที่รอบๆตัวกวน

ขั้นตอนที่ 2 ผิวของเหล็กภายใต้ปลายตัวกวนจะถูกขัดและกำจัดชั้นบางๆบนผิวหน้าของเหล็กด้วยตัวกวนที่กำลังหมุนดังแสดงในรูปที่ 12(ก) ส่วนของผิวหน้าเหล็กจะถูกดันขึ้นไปบนด้านอลูมิเนียมและลักษณะคล้ายกับครีบบของปลา (Fin-like Shape) ดังแสดงในรูปที่ 12(ข) ผิวของเหล็กที่ติดกับตัวกวนที่หมุนจะเปลี่ยนสถานะเป็น “ผิวกระตุ้น

(Activated Steel Surface)” ดังแสดงในรูปที่ 12 (ก) และ (ค)

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อตัวกวนเริ่มเคลื่อนที่ตามทิศทางการเดินแนวเชื่อมอลูมิเนียมจะถูกส่งผ่านรอบๆตัวกวนจากด้านหน้าของบ่าเครื่องมือสู่ด้านหลังของบ่าเครื่องมือ และเข้าสู่ช่องว่างระหว่างตัวกวนและครีบบของเหล็กที่สร้างขึ้น และมีภาวะเป็นผิวกระตุ้นในขั้นตอนที่ 2 ดังแสดงในรูป 12 (ค) ทิศทางการเดินอลูมิเนียมแสดงไว้ในรูป 12 (ง) จากนั้นผิวกระตุ้นของเหล็กดึงดูดอลูมิเนียมที่เคลื่อนที่ใกล้เคียงและเกิดการยึดเหนี่ยวกันระหว่างโลหะสองชนิดด้วยพันธะโลหะ (Metallic Bond)

ขั้นตอนที่ 4 ตัวกวนที่หมุนและเคลื่อนที่ตามทิศทางการเดินแนวเชื่อมสร้างครีบบของเหล็กขึ้นมาและเปลี่ยนภาวะเป็นผิวกระตุ้นดังแสดงในรูป 12 (ค) และ (ง) เมื่อครีบบอันอื่นถูกสร้างขึ้นและดันเข้าหา

4. สรุปผลการทดลอง

1) การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบทำให้ IMC ชนิดประะที่มีค่าความหนาเพิ่มมากขึ้น และเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการลดลงของความแข็งแรงของรอยต่อรูปแบบและตำแหน่งการพังทลายขึ้นอยู่กับตัวแปรการเชื่อม ที่ความเร็วรอบตัวกวนต่ำการพังทลายเกิดในอลูมิเนียมและเป็นการพังทลายแบบดักไทล์ ขณะที่ความเร็วรอบตัวกวนสูง การพังทลายแบบประะเกิดขึ้นที่ชั้นหนาๆของ IMC

2) การเพิ่มขึ้นของความเร็วในการเดินแนวเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความหนาของ IMC ชนิดประะลดลง อย่างไรก็ตามที่ความเร็วเชื่อมสูงเกินไปทำให้เกิดจุดบกพร่องก่อตัวขึ้น

3) การเพิ่มขึ้นของความลึกของตัวกวนที่สอดคล้องไปในแนวเชื่อมก่อให้เกิดความจุดบกพร่อง และการเพิ่มความหนาของ IMC ชนิดประะทำให้ความแข็งแรงลดลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.A. Branes and I.R. Pashby “Joining Techniques for Aluminum Spaceframes used in Automobiles Part I-Solid and Liquid Phase Welding”, J. of Mater. Proc. Tech. 99 (2000) 62-71.
- [2] W.M. Thomas and E.D. Nicholas “Friction Stir Welding for Transportation Industries” Materials&Design 18 (1997) 269-273.
- [3] G. Liu, L.E. Murr, C-S. Niou, J.C. McClure and F.R. Vega “Microstructure Aspects of The Friction Stri Welding of 6061-T6 Aluminum” Scripta Mater. 37 (1997) 355-361.
- [4] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling and C.C. Bampton “Effect of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 Aluminum” Scripta Mater. 36 (1997) 69-75.
- [5] S. Benavides, Y. Li, L.E. Murr, D. Brown and J.C. McClure “Low Temperature Friction Stir Welding of 2024 Aluminum” Scripta Mater. 41 (1999) 809-815.
- [6] K.V. Jata and S.L. Semiatin “Continuous Dynamic Recrystallization during Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys” Scripta Mater. 43 (2000) 743-749.
- [7] Y. Li, L.E. Murr and J.C. McClure “Flow Visualization and Residual Microstructure associated with The Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys” Mater. Sci. Eng. A271 (1999) 213-223.
- [8] A.P. Reynolds, W. Tang, T. Gnaupel-Herold and H. Prask “Structure, Properties and Residual Stress of 304L Stainless Steel Friction Stir Welds” Scripta Mater. 48 (2003) 1289-1294.
- [9] K. Kimapong and T. Watanabe “Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel” Welding J. 84-10 (2004) 277s-282s.
- [10] C.M Chen and R. Kovacevic “Joining of Al6061 to AISI1018 Steel by Combined Effects of Fusion and Solid State Welding” Inter. J. of Machine Tool&Manufacture 44 (2004) 1205-1214.
- [11] U.R Kattner and T.B. Massalski, “Binary Alloy Phase Diagrams” ASM International, Material Park, OH, 1990 P. 147.
- [12] M. Yilmaz, M. Col and M. Acet “Interface Properties of Aluminum/Steel Friction-welded Components” Mater. Charact. 49 (2003) 421-429.
- [13] S. Kobayashi and T. Yakou “Control of Intermetallic Compound Layers at Interface between Steel and Aluminum by Diffusion-treatment” Mater. Sci. Eng. A338 (2002) 44-53.

ประวัติผู้เขียนบทความ
ชื่อ: นายกิตติพงษ์ กิมะพงศ์ 
ตำแหน่ง: อาจารย์ 1 ระดับ 5
ประวัติการศึกษา:
 - วศ.บ. อุตสาหกรรม (การผลิต)
 - วศ.ม. เทคโนโลยีวัสดุ
 - Ph.D. Advanced Materials Science and Production Systems Engineering
ประสบการณ์ การฝึกอบรม และงานวิทยากร:
 - ฝึกอบรม เรื่อง Operation Process ที่ Northern Alberta Institute of Technology (NAIT), Edmonton, Alberta, CANADA
 - ฝึกอบรมเรื่อง Renovation of Process Industry ที่ JICA Kyushu International Center, Kita-Kyushu, Fukuoka, JAPAN
อีเมล : jomyut@rmut.ac.th (นายกิตติพงษ์ กิมะพงศ์)



ชื่อ: นายอนินท์ มีมนต์

ตำแหน่ง: อาจารย์ 1 ระดับ 5

ประวัติการศึกษา:

- วศ.บ. อุตสาหกรรม (การผลิต)

ประสบการณ์ การฝึกอบรม และงานวิทยากร:

- ฝึกอบรมเรื่อง Operation Process ที่ Northern Alberta Institute of Technology (NAIT), Edmonton, Alberta, CANADA

- วิทยากรและผู้ฝึกสอนภาคปฏิบัติ, โครงการ “ระบบรับรองความสามารถของบุคลากรในอุตสาหกรรมยานยนต์ สาขางานฉีดพลาสติก (Plastic injection)” สถาบันยานยนต์

สถานที่ทำงานและติดต่อ:

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ : 0-2549-3490-2

อีเมล : anin@rmut.ac.th (นายอนินท์ มีมนต์)

