



รายงานการวิจัย

การเชื่อมเสียดทานแบบจุดอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356
Friction Stir Spot Welding of Aluminum Semi-Solid Casting SSM 356



ชัยยุทธ มีงาม

ศุภชัย ชัยณรงค์

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณกองทุนวิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

พ.ศ. 2558

ชื่องานวิจัย การเชื่อมเสียดทานแบบจุดอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356
 ผู้วิจัย นายชัยยุทธ มิ่งาม
 นายศุภชัย ชัยณรงค์
 คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
 ปี 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมอะลูมิเนียมซึ่งหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ด้วยกรรมวิธีเสียดทานแบบจุด ตัวแปรในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบ 380, 1240 และ 2500 รอบ/นาที ระยะเวลาการกด 30 และ 60 วินาที ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าลักษณะทางกายภาพผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมในทุกตัวแปรในการทดลองประสานกันดี การเชื่อมเสียดทานแบบจุดนั้นสามารถเพิ่มสมบัติทางกลของชิ้นงานได้ โดยที่ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบจุด มีค่าเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 61.81 HV ซึ่งเป็นบริเวณเนื้อเชื่อม มีค่าความแข็งสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 34.34 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม (ค่าความแข็งเนื้อโลหะเดิม เฉลี่ยอยู่ที่ 40.58 HV) ซึ่งมาจากตัวแปรที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ที่ระยะกด 1 มิลลิเมตร และเวลาในการกด 60 วินาที โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงในบริเวณที่ได้รับความร้อนจากการเชื่อม สำหรับค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบจุด มีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 233.48 MPa มาจากตัวแปรของความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ที่ระยะกด 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกด 60 วินาที และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าความแข็งแรงดึงเฉือน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 95.42 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ ในทางตรงกันข้ามส่วนที่เหลือประมาณ 4.58 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ จะเห็นได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบจุดนั้นสามารถเชื่อมวัสดุในกลุ่มของอะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อกิ่งของแข็งได้ และมีผลการทดลองที่ดี

เลขที่	11282211
วันที่	26 Oct 2015
เลขเรียกหนังสือ	ว 671.52 41167

Research Title	Friction Stir Spot Welding of Aluminum Semi-Solid Casting SSM 356
Researcher	Mr. Chaiyoot Meengam Mr. Suppachai Chainarong
Faculty	Industrial
Year	2015

Abstract

This research is welded of semi-solid aluminum casting SSM 356 by friction stir spot welding produced, for parameters such as rotation speed at 380, 1240 and 2500 rev/min, depth of plug 1 and 1.5 mm and holding time at 30 and 60 respectively. The result found that physical characterization on the surface of welds has harmonization in all conditions. The friction stir spot welding can increase mechanical properties by hardness of the samples from friction stir spot welding produced have average of approximately 61.81 HV in welded zone, which is higher than the base materials calculation representing at 34.34 percent with compared to the base materials. (Base materials was hardness at 40.58 HV) from rotation speed at 1240 rev/min, depth of plug 1 mm and holding time at 60 seconds. The microstructure in weld zone change from heating between friction stir spot welding. The maximum shear tensile strength average of approximately 233.48 MPa from rotation speed of 380 rev/min to a depth of plug 1.5 mm and holding time at 60 seconds. The coefficient of determination R-square is equal to 95.42 with it means that the variations of the experiments are controllable. On the other hand for the remaining only 4.58 percent was an uncontrollable factor. It can be seen that friction stir spot welding can joint semi-solid aluminum casting group and good in result from experimental.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นงานวิจัยเพื่อหาองค์ความรู้สำหรับเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ซึ่งตลอดเวลาในการทดลองวิจัย ผู้วิจัยและคณะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย จนทำให้งานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยและคณะจึงใคร่ขอขอบพระคุณผู้มีส่วนร่วมในช่วยเหลือในการทดลองวิจัย ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้ ช่วยความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำวิจัย ผู้วิจัยและคณะต้องขอขอบคุณนักศึกษาที่ช่วยเตรียมงานในการทดลองวิจัย ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในโปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ในการให้ความร่วมมือสำหรับงานวิจัยนี้ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จและสมบูรณ์

ผู้วิจัยและคณะขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย จากเงินอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ตามสัญญาเลขที่ 4/2558 ทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี

นอกจากนั้น ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยและคณะได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือจากมหาวิทยาลัยใกล้เคียง ผู้วิจัยและคณะจึงขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์บางส่วนในการทำวิจัย และผู้วิจัยและคณะขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตลอดจนศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือที่ใช้สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา จนสามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างสมบูรณ์ครบถ้วน

หากการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้มีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้ทำงานวิจัยต้องขออภัยไว้ ณ โอกาสนี้ และขอน้อมรับเพื่อนำไป พัฒนา ปรับปรุงในครั้งต่อไป คณะผู้ทำงานวิจัยต้องขอขอบพระคุณทุกท่าน ทุกฝ่าย ทุกหน่วยงาน ที่มีส่วนในการสนับสนุนเครื่องมือ เงินทุนในการวิจัย และวิชาความรู้ในการทำวิจัยนี้ด้วยใจจริง ขอขอบคุณ

ชัยยุทธ มีงาม
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ตุลาคม 2559

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
ทฤษฎี สมมุติฐาน และ/หรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย	3
การทบทวนวรรณกรรม/งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	11
การดำเนินงานวิจัย	11
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	12
เครื่องมือและอุปกรณ์	12
ขั้นตอนการทดลอง	16
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	24
ลักษณะผิวย่อยเชื่อมของชิ้นงานหลังการเชื่อม	24
โครงสร้างจุลภาค	27
การทดสอบความแข็ง	40
การทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือน	43
การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนด้วยวิธีการทางสถิติ	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	51

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บรรณานุกรม	52
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบแรงดึง	54
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบความแข็ง	56
ประวัติผู้เขียน	58



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสมแบบกึ่งของแข็ง SSM356	12
3.2 แสดงการออกแบบลำดับการทดลองเชื่อมชิ้นงานแบบสุ่ม	19
4.1 ANOVA ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบ ระยะกดลึง และเวลาในการกดแช่	47
ผนวก ก ผลการทดสอบแรงดึงเดือนของชิ้นงานเชื่อม	55
ผนวก ข ผลการทดสอบความแข็ง	57



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส	3
2.2 ลักษณะโครงสร้างก่อนกลมของอะลูมิเนียม เกรด SSM 356	4
2.3 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบจุด	5
2.4 แรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์ส	7
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	11
3.2 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356	12
3.3 เครื่องเจาะแนวตั้ง ยี่ห้อ VERTEX	13
3.4 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน ยี่ห้อ HERO รุ่น HR-14	13
3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Digicon รุ่น TH-320	14
3.6 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง	14
3.7 เครื่องมือจับยึดและอุปกรณ์รองชิ้นงาน	15
3.8 เครื่องมือเชื่อม	15
3.9 การตัดแบ่งชิ้นทดสอบจากอะลูมิเนียมแผ่นสี่เหลี่ยม	16
3.10 การปรับผิวชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมที่ได้จากการตัด	16
3.11 ชิ้นงานสำเร็จที่พร้อมเชื่อมเสียดทานแบบจุด	17
3.12 ลักษณะการติดตั้งและปรับแต่งเครื่องมือในการเชื่อม	19
3.13 ลำดับขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบจุด	21
3.14 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็ง	22
3.15 ตำแหน่งกดและลักษณะรอยกดค่าความแข็ง	22
3.16 การทดสอบแรงดึงเฉือน	23
4.1 แสดงผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที	25
4.2 แสดงผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที	26
4.3 แสดงผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที	27
4.4 ลักษณะโครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อม	28
4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที	29
4.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที	30
4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที	31
4.8 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที	32
4.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที	34
4.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที	35
4.12 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที	36
4.13 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที	37
4.14 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที	38
4.15 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที	39
4.16 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที	40
4.17 แสดงค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที	41
4.18 แสดงค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที	42
4.19 แสดงค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที	43
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ความเร็วรอบ 380, 1240 และ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตรและเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที	44
4.21 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง	46
4.22 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน	47
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงเฉือนกับความเร็วยรอบ ระยะกดลึกและเวลาการกดแช่	49
4.24 อันตรกิริยาระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเฉือนกับความเร็วยรอบ ระยะกดลึก และเวลาการกดแช่	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันอะลูมิเนียมนั้นได้มีการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มในการใช้งานที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยอะลูมิเนียมนั้นจะนิยมนำมาใช้แทนโลหะในงานต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และโครงสร้างอาคารที่ต้องการน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง เนื่องจากอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่ดีทางด้านน้ำหนัก น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนัก จุดหลอมเหลวต่ำ มีความเหนียวมาก สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย มีความทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อน ซึ่งในปัจจุบันจะมีการเพิ่มสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหลายๆ วิธี โดยกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal) ก็เป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมได้ ลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและรักษาอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ให้ยาวนานขึ้น กรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi Solid Metal: SSM) ที่มีเทคโนโลยีการพ่นฟองแก๊สในน้ำโลหะ (Gas Induced Semi Solid: GISS) เป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งที่คล้ายกับกรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่โดยการปล่อยแก๊สเฉื่อย (แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน) ผ่านแท่งกราฟไฟต์ในปริมาณที่น้อยมากทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่แข็งตัวและได้โครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Spheroidal Grain) การนำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมภายในประเทศนั้นโดยเฉพาะงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป (Materials Forming) และการซ่อม (Repairing) อะลูมิเนียมหล่อก็จะมี การเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ทั้งการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อในกลุ่มเดียวกัน (Similar Joint) และการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกับโลหะชนิดอื่น (Dissimilar Joint) อีกทั้งการเชื่อมก็มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตในด้านการประกอบชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีงานเชื่อมมาใช้ในงานอุตสาหกรรมให้เหมาะสมกับสภาพของงานและข้อจำกัดในการเชื่อมที่จะส่งผลกระทบต่อในด้านต่างๆ ของรอยเชื่อม

กระบวนการเชื่อมนั้นมีอยู่หลายวิธีในการเลือกใช้กระบวนการเชื่อมนั้นจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการผลิตในงานอุตสาหกรรมนั้นๆ การเชื่อมที่ใช้ความร้อนจากการอาร์ค เรียกว่า การเชื่อมแบบหลอมละลายซึ่งจะมีการแพร่ความร้อนที่ได้จากการอาร์ค จะทำให้เกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะบริเวณปอหลอมการหลอมละลายของเนื้อโลหะ หลังจากการเชื่อมเมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งโครงสร้างใหม่นี้อาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเดิมของโลหะนั้นซึ่งจะมีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) การบิดงอ (Distortion) การแตกร้าวของรอยเชื่อม (Welding Crack) ในระหว่างการแข็งตัวของเนื้อโลหะหลอมละลายและมีปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเชื่อมอะลูมิเนียม คือ การรักษาสมบัติทางกลของบริเวณรอยเชื่อมให้ใกล้เคียงกับเนื้อเดิมมากที่สุดการเชื่อม โดยการหลอมละลายก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical Changes) ซึ่งจะส่งผลทำให้แนวเชื่อม (Welding Region) มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมลดลงตามไปด้วย การเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Stir Spot Welding: FSSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยกลุ่มบริษัทมาสด้า (Mazda Motor Cooperation) และบริษัทอุตสาหกรรมหนักคาวาซากิ (Kawasaki Heavy Industry) เพื่อใช้ในการเชื่อมวัสดุแผ่นบางในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ของประเทศญี่ปุ่น โดยมีจุดประสงค์หลักใน

การลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงานประกอบรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่น โดยนำเอาวิธีการเชื่อมนี้เข้าไปทดแทนการเชื่อมด้านทานแบบจุด (Resistance spot welding: RSW) หลักการอย่างง่ายในการทำให้เกิดรอยต่อของโลหะแผ่นบางชิ้นงานที่เป็นลักษณะของรอยต่อเกยถูกวางยึดแน่นอยู่บนพื้นระนาบ จากนั้นเครื่องมือเชื่อมที่เป็นรูปทรงกระบอกที่มีตัวกวนรูปทรงกระบอกขนาดเล็กติดอยู่ที่ส่วนปลายถูกทำให้หมุนด้วยความเร็วสูงที่กำหนด แล้วกดตัวกวนลงไปบนผิวโลหะด้านบนของรอยต่อ จากนั้นตัวกวนจะถูกกดแช่ที่ตำแหน่งนั้นตามระยะเวลาที่กำหนด แล้วถอนตัวขึ้นจากรอยต่อจะเกิดรอยต่อที่เกิดการประสานกันของโลหะสองแผ่น จากหลักการเบื้องต้นในการทำให้เกิดรอยต่อในสภาวะของแข็งที่โลหะบริเวณรอยต่อไม่ก่อให้เกิดการหลอมละลายของโลหะ จึงมีเหตุผลเป็นไปได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบจุดนี้สามารถใช้ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่อยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลายอื่นๆ เช่น การเชื่อมอาร์คก๊าซปกคลุมหรือการเชื่อมมิก/แมกได้ เพราะการเชื่อมที่กระทำภายใต้จุดหลอมเหลวของวัสดุมักไม่ก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะ หรือข้อบกพร่องอื่นๆ ที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลงได้ ดังเช่น การประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมอะลูมิเนียมและเหล็กที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงที่ยอมรับได้

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยมีความสนใจ เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล และลักษณะแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมตัวแปรต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อศึกษาหาตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356
- เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพบริเวณแนวเชื่อมของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม
- เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบจุด เช่น ความแข็ง ความแข็งแรง ดึงเฉือน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

เชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 โดยจะเป็นการเชื่อมในวัสดุกลุ่มเดียวกัน (Similar joint) ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบช่วง 380, 1240 และ 2500 รอบ/นาที ระยะเวลาถลึง 1 และ 1.5 มิลลิเมตร แรงกดคงที่ 10 MPa และเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที โดยในการเชื่อมนี้จะศึกษาความเร็วรอบ ระยะเวลาถลึง และเวลาในการกดแช่ ที่ส่งผลให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรง ซึ่งจะทดสอบความแข็งและความแข็งแรงดึงเฉือนของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356
- ทราบลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 หลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

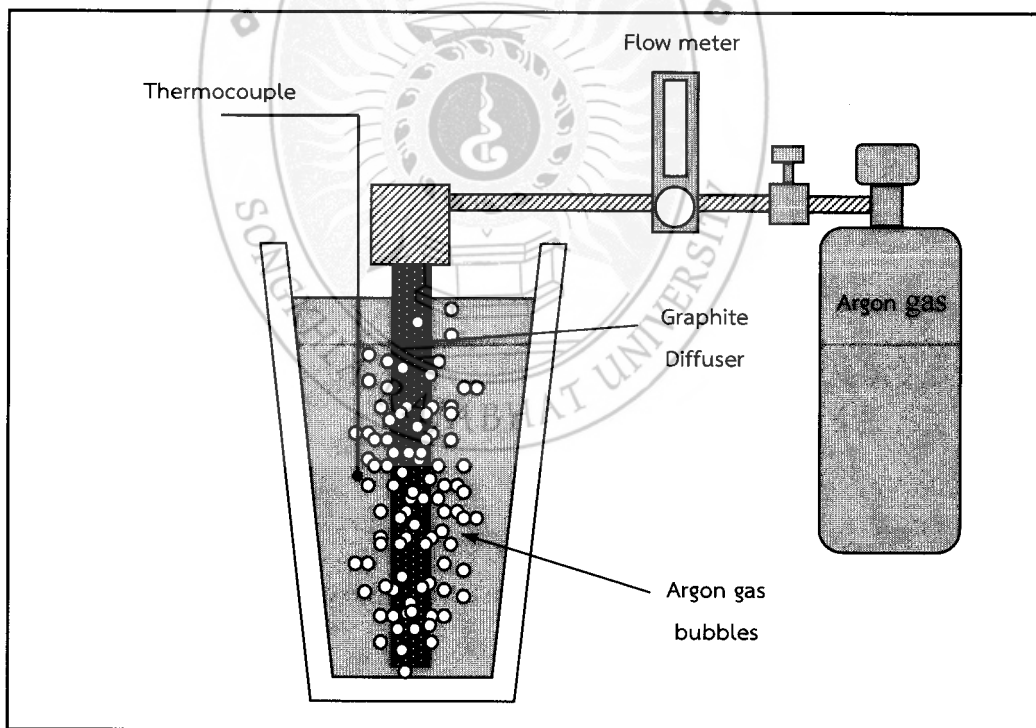
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี สมมติฐาน และ/หรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย

2.1.1 เทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็ง

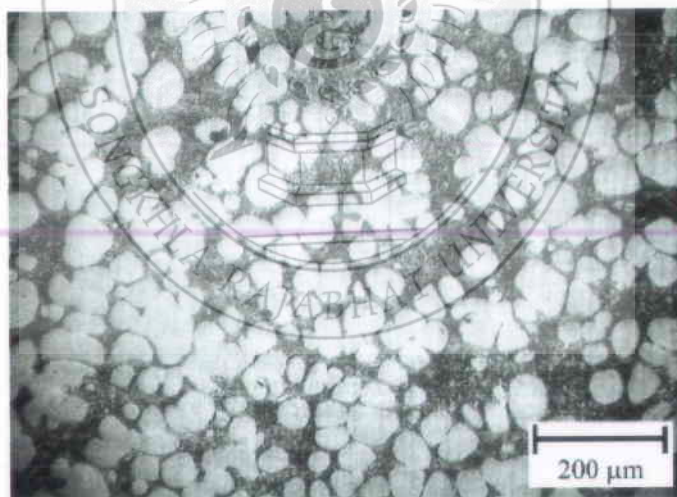
กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas induced semi-solid) (เจษฎา วรณสินธุ์, 2006) เป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราไฟต์พอร์น (แก๊สอาร์กอน หรือ ไนโตรเจน) ซึ่งเป็นกรรมวิธีแบบใหม่สำหรับการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีหลักการคล้ายกับวิธีการหล่อแบบ Rheocasting ที่ให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal grain) คุณสมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการเช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์มีความเหนียวที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส

2.1.2 อะลูมิเนียมผสม เกรด SSM 356

อะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356 เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม – ซิลิกอน เป็นแบบไฮโปยูเทคติก สามารถหล่อได้ดีทั้งในแบบหล่อทรายและแบบหล่อโลหะ มีความสามารถในการไหลตัวได้ดีและการหดตัวน้อยมาก ซึ่งมีผลทำให้สมบัติการต้านแรงดึงสูงขึ้นและมีความอ่อนเหนียวมากขึ้น การยึดตัวสูง ทนต่อแรงกระแทกได้สูง ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหมายเลข A356 เป็น Al, 7%Si, 0.35%Mg, 0.20%Fe, 0.20%Cu, 0.10%Mn, 0.10%Zn และ 0.23%Ti การเติมแมกนีเซียมลงไปเล็กน้อย ทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ดี โดยการฟอร์มเฟส Mg_2Si ในเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม กระบวนการทางความร้อนที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลมีอยู่หลายวิธีแต่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ ชนิด T6 คือ การนำชิ้นงานไปอบละลายแล้วนำไปชุบน้ำจางนั้นจึงนำไปทำการบ่มแข็งเทียม การนำไปใช้งานเหมาะที่สุดกับงานที่ต้องการความทนทานต่อการผุกร่อนและความแข็งแรงสูงใช้งานอย่างกว้างขวางกับอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ชิ้นงานยานยนต์ต่างๆ ดังแสดงเฟสไดอะแกรมอะลูมิเนียม A356 แต่สำหรับอะลูมิเนียม เกรด SSM 356 เป็นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปจากสถานะกึ่งของแข็ง โดยหลังจากการขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งทำให้โครงสร้างของอะลูมิเนียมมีลักษณะเป็นก้อนกลม แสดงในรูปที่ 2.2 โดยจะมีเฟสอะลูมิเนียมแอลฟาเป็นหลัก (α -Al) และมีเฟสยูเทคติกผสมอยู่ในสัดส่วนที่สูง โดยจะมีซิลิกอนเป็นหลักและซิลิกอนจะมีสมบัติทางด้านความสามารถในการหล่อและแมกนีเซียมจะทำให้สามารถปฏิบัติการทางความร้อนได้ดี

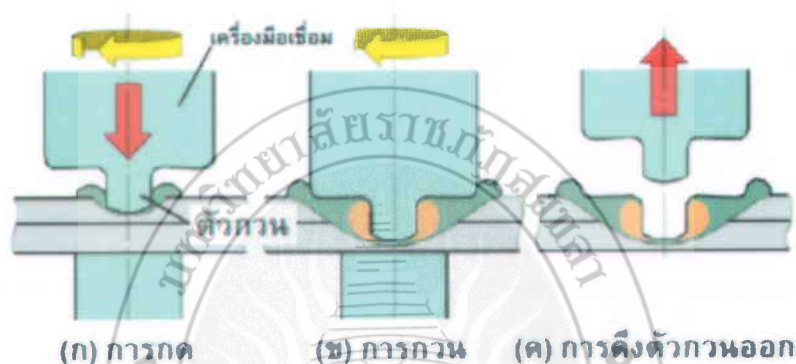


รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างก้อนกลมของอะลูมิเนียม เกรด SSM 356

2.1.3 การเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Stir Spot Welding)

การเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Stir Spot Welding: FSSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid state welding) ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยกลุ่มบริษัทมาสด้า (Mazda Motor Cooperation) และบริษัทอุตสาหกรรมหนักคาวาซากิ (Kawasaki Heavy Industry) เพื่อใช้ในการเชื่อมวัสดุแผ่นบางในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ของประเทศญี่ปุ่น โดยมีจุดประสงค์หลักในการลดปริมาณการ

ใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงานประกอบรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่น โดยนำเอาวิธีการเชื่อมนี้เข้าไปทดแทนการเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding: RSW) หลักการอย่างง่ายในการทำให้เกิดรอยต่อของโลหะแผ่นบางชิ้นงานที่เป็นลักษณะของรอยต่อเกยถูกวางยึดแน่นอยู่บนพื้นระนาบ จากนั้นเครื่องมือเชื่อมที่เป็นรูปทรงกระบอกที่มีตัวกวนรูปทรงกระบอกขนาดเล็กติดอยู่ที่ส่วนปลาย ถูกทำให้หมุนด้วยความเร็วสูงที่กำหนดแล้วกดตัวกวนลงไปบนรอยต่อด้วยความเร็วแรงกด และระยะความลึกที่กำหนดจนกระทั่งบ่าของเครื่องมือจุ่มลงไปบนผิวโลหะด้านบนของรอยต่อ จากนั้นตัวกวนจะถูกกดแช่ที่ตำแหน่งนั้นตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วถอนตัวขึ้นจากรอยต่อจะได้อรอยต่อที่เกิดการประสานกันของโลหะสองแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

จากหลักการเบื้องต้นในการทำให้เกิดรอยต่อในสถานะของแข็งที่โลหะบริเวณรอยต่อไม่ก่อให้เกิดการหลอมละลายของโลหะ จึงมีเหตุผลเป็นไปได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบจุดนี้สามารถใช้ในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดที่ยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลายอื่นๆ เช่น การเชื่อมอาร์คก๊าศปกคลุม หรือการเชื่อมมิก/แมกได้ เพราะการเชื่อมที่กระทำภายใต้จุดหลอมเหลวของวัสดุมักไม่ก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะหรือข้อบกพร่องอื่นๆ ที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อลดลงได้ดัง เช่น การประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในการเชื่อมอลูมิเนียม และเหล็กที่แสดงค่าความแข็งแรงสูงที่ยอมรับได้

2.1.4 การทดสอบความแข็งแรงดึง

การทดสอบความแข็งแรงดึง เป็นการดึงขึ้นทดสอบซึ่งจะทำให้ชิ้นทดสอบตกอยู่ได้สถานะการยืด และเป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูป โดยการเสียรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นทดสอบจากแรงที่กระทำ การตรวจวัดการเสียรูปจะวัดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดชิ้นทดสอบเทียบกับขนาดเริ่มต้นนั้น คือ การเสียรูปจะวัดจากความยาวของระยะทดสอบ (Gauge length) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบเทียบกับระยะทดสอบเริ่มต้น ระยะทดสอบเป็นช่วงความยาวมาตรฐานที่ใช้ในการวัดระดับการยืดหรือการเสียรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ โดยความยาวระยะทดสอบมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงปกติเท่ากับ 2 นิ้ว

ก. การเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวร

เมื่อชิ้นทดสอบโลหะได้รับแรงดึงในแกนเดียวจะเกิดการเสียรูปขึ้น และถ้าชิ้นทดสอบโลหะสามารถคืนตัวกลับไปสู่ขนาดเริ่มต้นเมื่อนำแรงที่กระทำออกไปนั้น คือ โลหะมีการเสียรูปแบบคืนตัว (Elastic deformation) ขนาดของการเสียรูปแบบคืนตัวของโลหะจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในระหว่างที่เกิดการเสียรูปแบบคืนตัวอะตอมของโลหะจะเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมในปริมาณที่ไม่มากนัก ดังนั้นเมื่อเอาแรงที่กระทำออกไปโลหะที่เกิดการเสียรูปแบบคืนตัวอะตอมของโลหะจะเคลื่อนกลับไปสู่ตำแหน่งเดิม ทำให้โลหะกลับไปสู่รูปร่างเดิมถ้าโลหะเกิดการเสียรูปเป็นจำนวนมากจนมันไม่สามารถกลับไปสู่รูปร่างเดิมได้อย่างสมบูรณ์ แสดงว่าโลหะเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) ในระหว่างที่เกิดการเสียรูปแบบถาวรอะตอมของโลหะเกิดการเคลื่อนออกไปอย่างถาวรจากตำแหน่งเดิม และจะคงอยู่ที่ตำแหน่งใหม่นี้ แม้ว่าจะนำแรงที่กระทำออกไปก็ตามบางโลหะสามารถเกิดการเสียรูปแบบถาวรได้มาก โดยปราศจากการแตกหักซึ่งถือเป็นสมบัติหนึ่งทางวิศวกรรมของโลหะที่นำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด ยกตัวอย่าง ความสามารถในการเกิดการเสียรูปแบบถาวรอย่างมากของเหล็กทำให้สามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนของรถยนต์ได้ เช่น หลังคา ฝากระโปรง และประตู ด้วยการขึ้นรูปแบบการอัดด้วยแม่พิมพ์ทางกล โดยไม่เกิดการแตกหัก

ข. แรงเค้นและความเครียด

แรงเค้น (Stress) ในการทดสอบความแข็งแรงดึง น้ำหนักดึงจะแทนด้วยสัญลักษณ์ F ในหน่วยของ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ นิวตัน ความแข็งแรงดึงคิดเป็นน้ำหนักที่ชิ้นทดสอบสามารถทนได้ต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด น้ำหนักเทียบกับพื้นที่หน้าตัดหนึ่งตารางหน่วย เรียกว่า แรงเค้น (stress, σ) โดยแรงเค้นจะมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in.²) หรือพาสคาล (MPa) ในหน่วยเมตริกน้ำหนักจะบันทึกเป็น กิโลกรัม แล้วแปลงเป็นนิวตัน ส่วนพื้นที่หน้าตัดจะคิดเป็นตารางเมตร ซึ่งจะได้หน่วยของแรงเค้นเป็นนิวตันต่อตารางเมตรหรือพาสคาล (MPa) โดย 1 MPa เท่ากับ 145 lb/in.² และ 1000 lb/in.² เท่ากับ 6.985 MPa

ความเครียด (Strain) เมื่อแท่งโลหะได้รับแรงดึงในทางเดียวเป็นเหตุให้แท่งโลหะเกิดการยืดออกในทิศทางของแรงนั้น การเคลื่อนนี้เรียกว่าความเครียด โดยนิยามความเครียดเป็นการยืดอันเนื่องมาจากแรงดึงทางเดียวที่กระทำกับชิ้นทดสอบ ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นทดสอบในทิศทางของแรงนั้นเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ดังนั้นก่อนทำการทดสอบต้องวัดพื้นที่หน้าตัดและระยะทดสอบเริ่มต้นของชิ้นทดสอบโดยระยะทดสอบเริ่มต้นจะทำการวัดระยะสองจุดบนชิ้นทดสอบอุปกรณ์วัดการยืด หรือความเครียดจะใช้ในการวัดระยะยืดของชิ้นทดสอบในระหว่างการทดสอบหรืออาจวัดจากผลต่างของระยะห่างของสองจุด ข้างต้นผลต่างระหว่างระยะทดสอบเริ่มต้นกับสุดท้ายเรียกว่าระยะยืด (Elongation) หน่วยของระยะยืดใช้เป็นนิ้วหรือมิลลิเมตร และถ้านำค่าระยะยืดหารด้วยระยะทดสอบเริ่มต้นเรียกว่าความเครียด ชิ้นทดสอบแบบลดขนาดตามมาตรฐานงานกลมนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบแรงดึงตามยาวกับแนวเชื่อม

2.1.5 การทดสอบความแข็ง

เป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นทดสอบ การทดสอบความแข็งที่นิยมใช้มี 3 วิธี คือ บริเนลล์ ร็อกเวลล์ และวิกเกอร์ส สำหรับในงานวิจัย ผู้วิจัยได้เลือกวิธีการทดสอบแบบวิกเกอร์ส เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส จะเหมาะสำหรับการวัดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวทวนโดยในการวัดความแข็งจะใช้หัวกดเพชร มีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา ดังรูปที่ 2.4 โดยเวลาที่ใช้ในการกด 10 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมากค่าความแข็งประมาณ 5 kgf/mm² จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ ประมาณค่าความแข็งประมาณ 1,500 kgf/mm² โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีค่าระหว่าง 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะ



รูปที่ 2.4 แรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยเครื่องมือโครวิกเกอร์ส

การวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส บริเวณภาคตัดตามยาวรอยทวนเพื่อหาว่าในแต่ละบริเวณของชิ้นทดสอบกวนมีค่าความแข็งภายในเนื้อวัสดุที่แตกต่างกันมากน้อยเพียงใด จากการคำนวณโดยใช้สมการ

$$Hv = \frac{1.854P}{d^2}$$

เมื่อ

Hv	คือ	ค่าความแข็งแบบ Vickers (kgf /mm ²)
P	คือ	แรงกด (kgf)
d	คือ	ขนาดเส้นทแยงมุม d1 และ d2 เฉลี่ย (mm)

2.2 การทบทวนวรรณกรรม/งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ (2540) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดของรอยต่อเกยอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ดังแสดงผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด เช่น ความเร็วในการกดตัวกวนลงสู่รอยต่อความเร็วรอบของตัวกวน และระยะเวลากดแช่ตัวกวนต่อความแข็งแรงของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ผลการทดลองพบว่ารอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเกิดขึ้นได้ดี ด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดและแสดงความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อเกยประมาณ 95% ของความแข็งแรงของอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการทดลอง การเพิ่มความเร็วในการกดความเร็วรอบของตัวกวน และการเพิ่มระยะเวลาในการกดทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความเร็วยุโรปคาดว่าทำให้ความร้อนเสียดทานเพิ่ม และส่งผลต่อการเกาะยึดระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก

อดิสร เป็ลียนดิษฐ์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์ (2554) ได้ศึกษาอิทธิพลของระยะลิคและรูปทรงบ่าเครื่องมือเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยมีผลการทดลองสรุปดังนี้รอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเชื่อมติดกันและมีความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 179 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ความแข็งแรงของรอยต่อเกยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะความลึกในการเชื่อมจากผิวอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น การเชื่อมที่ระยะขอบเขตระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมจะให้ความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด เครื่องมือเชื่อม T4 ที่มีรูปทรงบ่าเว้ารัศมี 2 มม. จะให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุด

วรพงศ์ บุญช่วยแทน และคณะ (2554) ได้ศึกษาเรื่องการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หล่อกิ่งของแข็งโดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6 ซึ่งนำเสนอการเชื่อมแบบต่อชนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง SSM 356 (Semi-Solid Metal 356) ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding, FSW) ในสภาวะทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (T6) โดยทำการเชื่อมที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding speed) 160 mm/min มุมเอียงของ Tool 3° และใช้หัวพิน (Pin) แบบทรงกระบอก (Straight Cylindrical) โดยมีปัจจัยในการเชื่อมคือความเร็วรอบการหมุนของ Tool (Rotation speed) ที่ใช้ 1320, 1750 rpm และสภาวะทางความร้อน (T6) ที่กำหนดคือ (1) As welded (AW) joints, (2) T6 Weld (TW) joints, (3) Weld T6 (WT) joints, (4) T6 Weld T6 (TWT) joints, (5) Solution treated Weld Artificially aged (SWA) joints and (6) Weld Artificially aged (WA) joints และใช้การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกแบบการเรียงเฟสตรวจสอบแนวเชื่อมความเร็วรอบ และสภาวะทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (T6) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อโครงสร้างทางมหภาคจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยเชื่อม การเพิ่มความเร็วยุโรปของตัวกวนและสภาวะทางความร้อนที่แตกต่างกันส่งผลถึงความแตกต่างของค่าความแข็งแรงดึง เนื่องจากจะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่บริเวณรอยต่อชน ค่าตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุดจากการทดลอง คือ รอยต่อชนที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min สภาวะกระบวนการทางความร้อน Weld T6 (WT) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 228.92 MPa ผลการตรวจสอบรอยบกพร่องมีความถูกต้อง และแม่นยำที่ความเร็วในการหมุนของหัวพิน 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min และสภาวะกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังเชื่อม (TWT) พบว่ารอยบกพร่องมีความลึกจากผิวงานด้านที่ตรวจลงไปประมาณ 0.93 มิลลิเมตร

ธงชัย เครือเผื่อ (2552) ได้นำเสนอการเชื่อมอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง A356 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน กระทำการเชื่อมโดยใช้ตัวกวนทรงกระบอก และแบบทรงสี่เหลี่ยม ตัวแปรความเร็วรอบคองที่คือ 1750 รอบต่อนาที และทำการแปรเปลี่ยนอัตราเร็วเดินเชื่อม และทำการเอียงมุมตัวกวน 3 องศา พบว่าบริเวณแนวเชื่อมมีโครงสร้างที่ละเอียด และที่อัตราเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที ของทรงกระบอกบริเวณแนวเชื่อมเกิดจุดบกพร่องทางด้านล่างของแนวเชื่อมตลอดความยาวเดินเชื่อม ค่าความแข็งแรงของการใช้ตัวกวนทั้งสองมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

ประภาส เมืองจันทร์บุรี (2550) ได้วิจัยการเชื่อมต่อชนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal SSM) A356 ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทาน โดยการศึกษาปัจจัยในการเชื่อมที่สามารถควบคุมได้มี 2 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือ (Tool) มี 2 ระดับ 1320 และ 1750 rpm และความเร็วด้านการเดินเชื่อม (Welding Speed) มี 3 ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min ความเร็วรอบ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมและความสมดุลของแรงกด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ให้ค่าความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน เนื่องจากการกวนมีผลต่อเนื้อโลหะและสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ผลจากการตรวจสอบด้วยเอ็กซ์เรย์ (X-Ray) การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและการทดสอบทางกลที่ความเร็วรอบ 1750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ให้ความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมดีที่สุด ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 172.61 MPa และที่ความเร็วรอบ 1320 rpm ความเร็วในการเดินเชื่อมทุกระดับแรงกดและความร้อนจากการเสียดทานไม่เพียงพอทำให้เกิดช่องว่าง ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าต่ำ ส่วนค่าความแข็งแรงบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนและบริเวณที่ถูกกวน ทั้งทางด้าน Advancing Side และ Retreating Side มีค่าสูงกว่าเนื้อโลหะเดิมเล็กน้อยทุกปัจจัยและทุกระดับ

เจนณรงค์ นาคเทวัญ (2555) ได้ศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเกรด 7075 ที่ความเร็วเชื่อม 70, 90 และ 110 mm/min ภายใต้ความเร็วรอบ 1110 และ 1320 rpm ปรากฏว่าชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1320 rpm เกิดเป็นโพรงตรงส่วนล่างของบริเวณที่ถูกกวน ส่วนชิ้นงานที่ความเร็วรอบ 1110 rpm มีความสมบูรณ์ดี หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ความเร็วรอบ 1110 rpm มาทดลอง 4 สภาวะทางความร้อน คือ สภาวะหลังเชื่อม สภาวะบ่มเทียมน้ำหลังเชื่อม สภาวะอบละลายหลังเชื่อม และ T6 หลังเชื่อม ผิวของแนวเชื่อมที่ความเร็วเชื่อม 90 และ 110 mm/min ของสภาวะอบละลายหลังเชื่อมและ T6 หลังเชื่อม มีลักษณะพุพองใต้ผิว เนื่องจากการขยายตัวของอากาศภายในแนวเชื่อม ส่วนผิวของแนวเชื่อมที่สภาวะอื่น ๆ มีความสมบูรณ์ดี โครงสร้างมหภาคและจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมมีลักษณะทั่วไปคล้ายกันทุกสภาวะการทดลองเช่นกัน แต่มีสภาวะอบละลายหลังเชื่อมและ T6 หลังเชื่อมของชิ้นงานที่ความเร็วเชื่อม 90 และ 110 mm/min เกิดการแตกร้าตรงบริเวณที่ถูกกวน เนื่องจากการชุบเย็นหลังจากอบละลาย นอกจากนั้นโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ถูกกวนเกรนมีการขยายตัวใหญ่ขึ้นมาก เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ความเร็วเชื่อม 70 mm/min ซึ่งเกรนมีการขยายตัวเพียงเล็กน้อย รวมไปถึงความแข็งแรงที่ความเร็วเชื่อม 90 และ 110 mm/min มีค่าสูงกว่าความเร็วเชื่อม 70 mm/min ส่งผลให้เกิดการแตกร้าในแนวเชื่อมที่ความเร็วเชื่อม 90 และ 110 mm/min การตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับเทคนิคเอ็กซ์เรย์ (EDX) ในบริเวณที่ถูกกวนมีการแตกหักของเฟส Al, Cu₂Fe, Mg₂Si, Al₂CuMg และ Al₂Mg₃Zn₃ กระจายอยู่ทั่วแนวเชื่อม ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 197.3 HV จากการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1110 rpm ที่ความเร็วเชื่อม 110 mm/min หลังจากการทำ T6 หลังเชื่อม สำหรับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ความเร็วเชื่อม 70 mm/min และทำ T6 หลังเชื่อม ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 459.23 MPa ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพของแนวเชื่อมที่ 101.53 % ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองสภาวะอื่นๆ

มูฮามัด เต๊ะยอ (2554) ได้วิจัยเรื่องการเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่าง อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 กับอะลูมิเนียมผสม AA6061-T651 โดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ โดยใช้ตัวกวนทรงกระบอก ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมี 2 ตัวแปร คือ ความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวน (1750 และ 2000 rpm) และความเร็วเดินเชื่อม (20, 50, 80, 120, 160 และ 200 mm/min) ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีผลโดยตรงต่อลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวนส่งผลให้ค่าต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น ในลักษณะเดียวกันเมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นถึงค่าๆ หนึ่ง หลังจากนั้นแล้วเมื่อยังเพิ่มค่าความเร็วเดินเชื่อมค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมจะยิ่งลดลง ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 2000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 80 mm/min ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ในสภาพหลังการหล่อกับอะลูมิเนียม AA6061-T651 มีค่าเท่ากับ 197.1 MPa และของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (T6) กับอะลูมิเนียมผสม AA6061-T651 มีค่าเท่ากับ 206.3 MPa แข็งบริเวณตรงกลางแนวเชื่อมจะสูงกว่าบริเวณอื่นและจะลดลงไปเรื่อยๆ จนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล หลังจากนั้นความแข็งจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความแข็งเดิมของเนื้อโลหะทั้งสองชนิด โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นใหม่จะประกอบด้วยเนื้อวัสดุของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดที่มีความละเอียดกว่าเนื้อเดิม

ศุภชัย ชัยณรงค์ (2554) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง โดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคอยู่ในสถานะของแข็ง โดยการใช้ความร้อนจากการเสียดทานและการกวน ตัวแปรของกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนที่ใช้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการหล่อกิ่งของแข็งเกรด 356 ที่ความเร็วในการเดินแนว กวน คือ 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร/นาที ภายใต้ความเร็วรอบ 1320, 1480 และ 1750 รอบ/นาที พบว่ากรรมวิธีเสียดทานแบบกวนสามารถเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงดึง โดยที่ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมีค่าเฉลี่ยประมาณ 40.58 HV ส่วนค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 11.8 % เมื่อนำมาเทียบกับเนื้อโลหะเดิม โดยสภาวะที่ดีที่สุด คือ ความเร็วเดินแนวกวน 160 มิลลิเมตร/นาที ภายใต้ความเร็วรอบที่ 1750 รอบ/นาที จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่ากรรมวิธีเสียดทานแบบกวนสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อกิ่งของแข็งได้

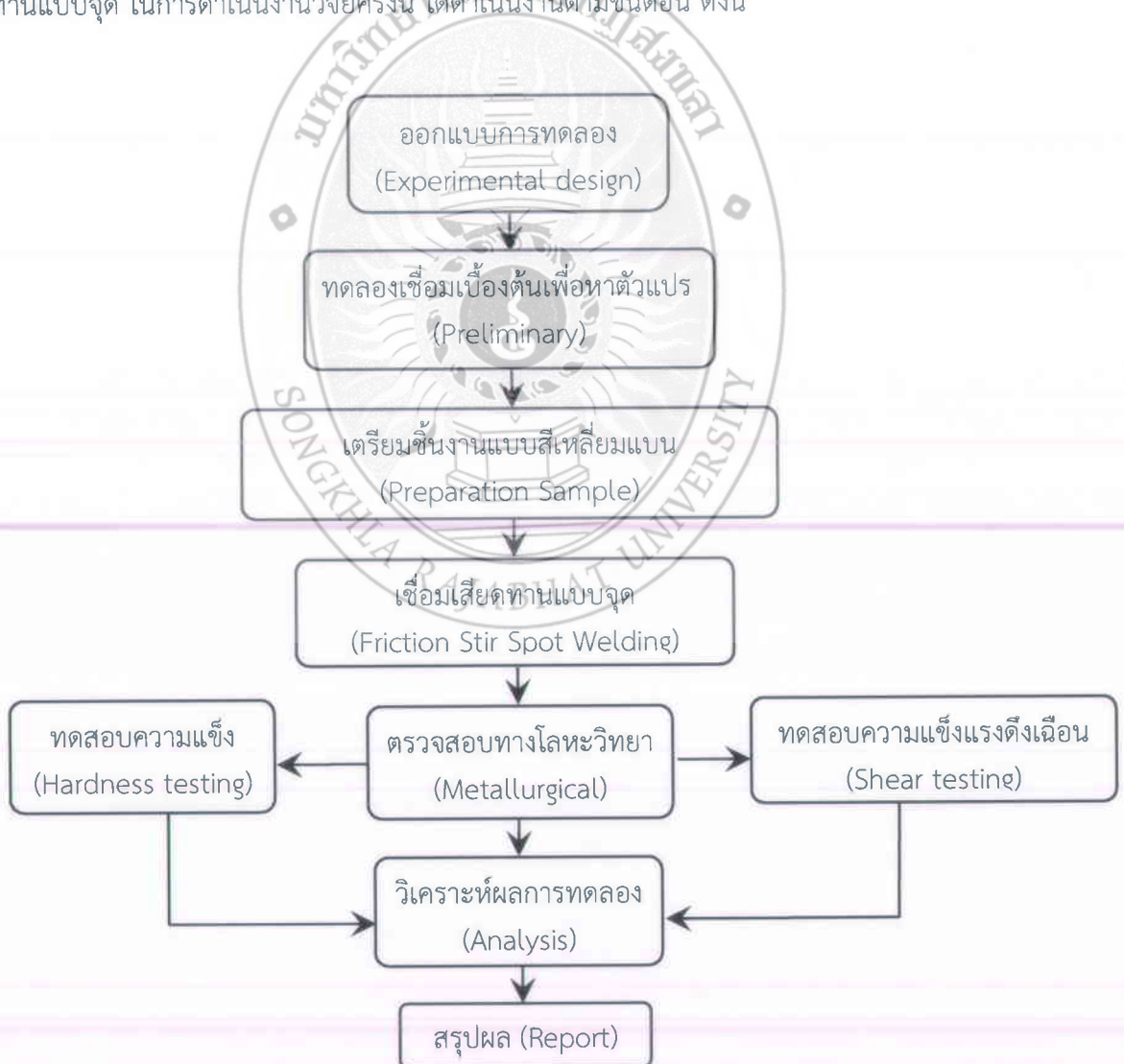
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Stir Spot Welding : FSSW) โดยใช้อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 เป็นชิ้นงานทดลองเชื่อม กำหนดรอยเชื่อมเป็นแบบต่อเกย การเชื่อมจะเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยใช้ประยุกต์เครื่องจักรกลแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีการปรับเปลี่ยนตัวแปรในการเชื่อมได้ คือ ความเร็วรอบเชื่อม เวลาในการเชื่อม และตัวแปรอื่นๆ ซึ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยนี้ดังแสดงต่อไปนี้

3.1 การดำเนินงานวิจัย

การเชื่อมต่อเกยของวัสดุระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด SSM356 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ได้ดำเนินงานตามขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบจุด เป็นอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ขึ้นรูปด้วยเทคนิค ฟันฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะ (Gas Induce Semi Solid , GISS) แล้วอัดขึ้นรูปออกมาเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม

3.2.1 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM356

อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยวัสดุ อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ผ่านการหล่อขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (Gas Induce Semi Solid) ซึ่งเทคนิค GISS จะทำการหล่อที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 650 องศาเซลเซียส จะใช้แก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราฟไฟต์พูน (แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน) เพื่อให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะเกิดการแตกตัวของโครงสร้างเดนไดรต์เป็นเวลา 20 วินาที จากนั้นนำน้ำโลหะอะลูมิเนียม ไปเทลงใน Mold แล้วอัด (Squeeze) ที่ความดันไม่น้อยกว่า 2,000 psi ค้างไว้จนโลหะแข็งตัว ได้เป็นชิ้นงาน แบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหนา 30 มิลลิเมตร และมีความกว้าง ความยาว 100x100 มิลลิเมตร ดังแสดง ในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสมแบบกึ่งของแข็ง SSM 356

วัสดุ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
SSM 356	7.74	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0.02	0.01	Bal.



รูปที่ 3.2 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองวิจัย

3.3.1 เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)

เครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ VERTEX ใช้ในการกัดเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 356 ให้มีขนาดตามแบบเพื่อใช้ในการเชื่อม และใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ตามค่าตัวแปรต่างๆ ที่กำหนด อีกทั้งยังใช้เตรียมชิ้นงานหลังการเชื่อมเพื่อทดสอบแรงดึงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องเจาะแนวตั้ง ยี่ห้อ VERTEX

3.3.2 เลื่อยกลแบบคันชัก (Saw Machine)

เครื่องเลื่อยกลแบบคันชัก ยี่ห้อ HERO รุ่น HR-14 ใช้หลักการทำงานจากเพลาข้อเหวี่ยง ระบบส่งกำลังทางกลจากไฟฟ้า ส่งผ่านกำลังด้วยระบบไฮดรอลิก ใช้ในการตัดแบ่งชิ้นงานให้มีขนาดความกว้างและความยาวใกล้เคียงขนาดจริง ซึ่งจะใช้ในการเตรียมงานเพื่อทดสอบเชื่อม นอกจากนั้นนำไปยังใช้ในการเลื่อยชิ้นงานหลังการเชื่อมเพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน ยี่ห้อ HERO รุ่น HR-14

3.3.3 เครื่องทดสอบความแข็ง (Microhardness Machine)

เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Digicon รุ่น TH-320 เป็นเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vicker's แบบตั้งโต๊ะ ใช้สำหรับทดสอบค่าความแข็งหลังจากกรรมวิธีเชื่อมเสียดทานแบบจุด ซึ่งสามารถวัดค่าความละเอียดได้สูง เหมาะกับการทดสอบความแข็งของงานเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Digicon รุ่น TH-320

3.3.4 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Universal Testing Machine)

เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง ใช้สำหรับทดสอบค่าความแข็งแรงดึง หลังจากกรรมวิธีเชื่อมเสียดทานแบบจุด โดยการดึงชิ้นงานจะทดสอบแรงดึงเหนือนของชิ้นงาน และตัวแปรในการดึงจะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง

3.3.5 เครื่องมือจับยึดและอุปกรณ์รองชิ้นงาน (Jig)

เครื่องมือจับยึดและอุปกรณ์รองชิ้นงาน ถูกออกแบบจากเหล็กกล้าเครื่องมือ ใช้สำหรับจับยึดและรองชิ้นงานขณะเชื่อม โดยเป็นฐานในการรองชิ้นงานเพื่อเชื่อมเสียดทานแบบจุด การใช้งานจะใช้คู่กับปากกาจับชิ้นงาน ซึ่งช่วยให้การจับชิ้นงานได้แน่นขึ้น เนื่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบจุด การจับยึดชิ้นงานเป็นสิ่งสำคัญ เพราะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะที่เชื่อมชิ้นงานอาจส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหลุดได้ หากมีการจับยึดที่ไม่ดี ดังแสดงในรูปที่ 3.7



(ก) เครื่องมือจับยึด



(ข) อุปกรณ์รองชิ้นงาน (Jig)

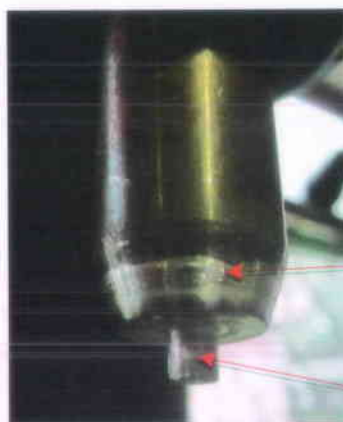


(ค) ลักษณะการวางอุปกรณ์รองชิ้นงาน (Jig)

รูปที่ 3.7 เครื่องมือจับยึดและอุปกรณ์รองชิ้นงาน

3.3.6 เครื่องมือเชื่อม (Electrode Tool)

เครื่องมือเชื่อม หรือเรียกว่า หัวกวน ใช้ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ทำจากเหล็ก เครื่องมือ เกรด SKH 57 ซึ่งมีขนาดความโตของบ่ากวน (Shoulder) 15 มิลลิเมตร หัวกวน (Pin) มีขนาดความโต 5 มิลลิเมตร ความยาวหัวกวน 5 มิลลิเมตร ซึ่งจะเป็นตัวสร้างความร้อนในการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ดังแสดงในรูปที่ 3.8



บ่ากวน (Shoulder)

หัวกวน (Pin)

รูปที่ 3.8 เครื่องมือเชื่อม

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบจากอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356

อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านการหล่อแบบอัด (Squeeze Casting) นำไปตัดด้วยเลื่อยกลแบบคันชัก ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จากนั้นทำการปรับผิวชิ้นงานทั้งสองด้านด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (Milling) ให้มีขนาด 28x95x4 มิลลิเมตร (ความกว้างxยาวxหนา) จะได้ชิ้นทดสอบ 9 ชิ้นต่อหนึ่งแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.10 การปรับผิวชิ้นงานเชื่อมด้วยเครื่องกัดแบบแนวตั้ง เพื่อให้ได้ผิวหน้าที่เรียบ เนื่องจากความขรุขระของผิวชิ้นงานมีผลต่อการเกิดความร้อนในการเชื่อม



รูปที่ 3.9 การตัดแบ่งชิ้นทดสอบจากอะลูมิเนียมแผ่นสีเหลี่ยม



รูปที่ 3.10 การปรับผิวชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมที่ได้จากการตัด

สำหรับการเตรียมชิ้นงานในการเชื่อม จะเตรียมชิ้นงานทั้งหมด 3 ชิ้น โดยมีตัวแปรในการทดลอง คือ ความเร็วรอบการหมุนของหัวกวาน ที่ 3 ระดับ ระยะกดลิก 2 ระดับ และระยะเวลาในการกดแช่ 2 ระดับ ซึ่งต้องใช้วัสดุอะลูมิเนียมในการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ทั้งหมด 72 ชิ้น อย่างไรก็ตามมีความจำเป็นในการเตรียมชิ้นงานเพิ่มบางส่วน เพื่อนำไปทดลองเชื่อมเพื่อหาตัวแปรในการเชื่อมเบื้องต้นด้วย โดยชิ้นงานหลังจากการปรับขนาดผิวที่สำเร็จ ก่อนที่จะนำไปทำการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบจุด ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานสำเร็จที่พร้อมเชื่อมเสียดทานแบบจุด

3.4.2 การกำหนดตัวแปรและการออกแบบการทดลอง

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบจุดนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของรอยเชื่อมจะประกอบด้วย รูปแบบของเครื่องมือเชื่อม หรือ Tool ความเร็วรอบเชื่อม แรงกด และชนิดของวัสดุที่นำมาทำเครื่องมือเชื่อม หรือ Tool แต่ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาถึงปัจจัยที่ควบคุมได้สองปัจจัย คือ ความเร็วรอบเชื่อม และเวลาในการกดแช่ที่แตกต่างกันว่าจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมอย่างไร โดยผู้วิจัยได้กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองที่สำคัญ ดังนี้

ปัจจัยหลักในการทดลอง

ปัจจัยหลักที่เลือกศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้มีสองปัจจัย แต่ละปัจจัยมีระดับการทดลอง ดังนี้

- (1) ความเร็วรอบเชื่อมมีสามระดับ คือ 380, 1240 และ 2500 รอบ/นาที
- (2) ระยะกดลึกลงมีสองระดับ คือ 1 และ 1.5 มิลลิเมตร
- (3) เวลาในการกดแช่มีสองระดับ คือ 30 และ 60 วินาที

ปัจจัยที่กำหนดให้คงที่ในการทดลอง

ปัจจัยที่กำหนดให้คงที่ในงานวิจัยครั้งนี้ จะประกอบด้วยปัจจัย ดังนี้

- (1) รูปแบบของเครื่องมือเชื่อม หรือ Tool จะใช้รูปทรงกระบอก
- (2) ชนิดของวัสดุเครื่องมือเชื่อม หรือ Tool ผลิตจากเหล็กเครื่องมือ เกรด SKH 57 ตามมาตรฐาน JIS
- (3) ความยาวในการทับกันของชิ้นงาน คือ 28 มิลลิเมตร (เท่ากับขนาดความกว้างของชิ้นงาน)

การกำหนดขนาดตัวอย่าง

การกำหนดขนาดตัวอย่าง (n) เพื่อที่จะได้ขนาดของตัวอย่างที่สามารถเป็นตัวแทนของประชากรได้ ซึ่งในการกำหนดขนาดตัวอย่าง ถ้าสามารถกำหนดได้พอเหมาะก็จะทำให้การวิจัยนั้นมีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือ ดังนั้นในการกำหนดขนาดตัวอย่างจึงมีการกำหนดค่าต่างๆ ตามทฤษฎีที่แนะนำ ดังนี้

- | | |
|-------------------------------------|--------|
| (1) Type I Error (Alpha: α) | = 0.05 |
| (2) Power (1- β) | = 0.95 |
| (3) Number of Center Point | = 0 |

(4) Estimate

(5) Minimum Effect (D)

สำหรับค่า Estimate และ Minimum Effect (D) สามารถหาค่าได้จากผลของการทดลองที่เกี่ยวข้องหรือค่าที่มีการแนะนำให้ใช้ หรือการทดลองเบื้องต้น ในกรณีงานวิจัยครั้งนี้ไม่มีข้อมูลของการทดลองอื่นหรือมีข้อมูลอื่นๆ มาสนับสนุนในการประมาณค่าที่ต้องการ จึงเลือกวิธีการทดลองการเชื่อมเบื้องต้นก่อน เพื่อหาค่าดังกล่าว โดยทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานและกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเหมือนกับแผนการทดลองแบบสุ่ม และเชื่อมเบื้องต้น 1 ซ้ำ จำนวน 12 ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.2 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการเชื่อมไปเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M และทดสอบชิ้นงานด้วยแรงดึง เก็บข้อมูลในส่วนของค่าแรงดึงสูงสุด เพื่อหาค่าความแตกต่างของข้อมูล และใช้สำหรับกำหนดค่า Minimum Effect (D) หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวมาประมวลผลด้วยโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ เพื่อหาค่า Estimate และขนาดของตัวอย่าง (n) ที่จะใช้กำหนดการทดลองจริงต่อไป

ตารางที่ 3.2 แสดงการออกแบบลำดับการทดลองเชื่อมชิ้นงานแบบสุ่ม

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Rotation speed	Holding time	Depth
23	1	1	1	2500	60	1
17	2	1	1	1240	30	1
8	3	1	1	1240	60	1.5
35	4	1	1	2500	60	1
32	5	1	1	1240	60	1.5
6	6	1	1	1240	30	1.5
1	7	1	1	380	30	1
34	8	1	1	2500	30	1.5
29	9	1	1	1240	30	1
12	10	1	1	2500	60	1.5
7	11	1	1	1240	60	1
33	12	1	1	2500	30	1
31	13	1	1	1240	60	1
16	14	1	1	380	60	1.5
22	15	1	1	2500	30	1.5
36	16	1	1	2500	60	1.5
21	17	1	1	2500	30	1
11	18	1	1	2500	60	1
26	19	1	1	380	30	1.5
24	20	1	1	2500	60	1.5
4	21	1	1	380	60	1.5
5	22	1	1	1240	30	1

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Rotation speed	Holding time	Depth
3	23	1	1	380	60	1
15	24	1	1	380	60	1
30	25	1	1	1240	30	1.5
28	26	1	1	380	60	1.5
20	27	1	1	1240	60	1.5
10	28	1	1	2500	30	1.5
13	29	1	1	380	30	1
18	30	1	1	1240	30	1.5
14	31	1	1	380	30	1.5
9	32	1	1	2500	30	1
27	33	1	1	380	60	1
2	34	1	1	380	30	1.5
25	35	1	1	380	30	1
19	36	1	1	1240	60	1

3.4.3 การติดตั้งและปรับแต่งเครื่องมือในการเชื่อม

อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานจะถูกประกอบเข้ากับ ปากกาจับชิ้นงานเพื่อเป็นส่วนที่รองชิ้นงานสำหรับการเชื่อม และถูกจับยึดติดกับเครื่องกัดที่ใช้สำหรับการประยุกต์ในการเชื่อม หลังจากนั้นจะใช้หัวกวนในการทดลองเชื่อม เพื่อสร้างความร้อนในระหว่างการเชื่อม อย่างไรก็ตามในการเชื่อมเสียดทานแบบจุด การรักษาความร้อนในขณะที่เชื่อมมีค่าสำคัญ จึงได้ใช้แผ่นประเก็นหนึ่งรองใต้ชิ้นงานเพื่อรักษาความร้อนในระหว่างการเชื่อม ซึ่งสามารถช่วยให้ความร้อนในขณะที่เชื่อมไม่แผ่กระจายไปยังเครื่องกัด และเป็นการรักษาความร้อนบริเวณเชื่อมได้อีกด้วย ลักษณะการติดตั้งและปรับแต่งเครื่องมือในการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.12

เครื่องมือจับยึด
(ปากกาจับงาน)



ชิ้นงาน

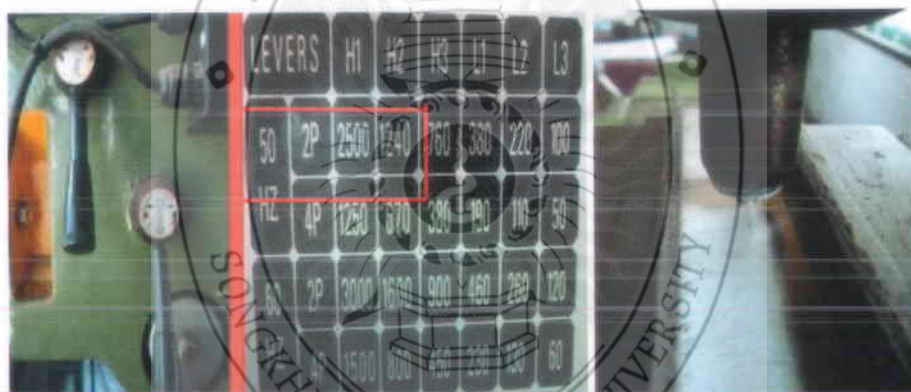
อุปกรณ์รองชิ้นงาน

รูปที่ 3.12 ลักษณะการติดตั้งและปรับแต่งเครื่องมือในการเชื่อม

3.4.4 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการปรับตั้งตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ที่ความเร็วรอบ 380, 1240 และ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และจับเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที โดยการทดลองจะทำที่อุณหภูมิห้องทั้งหมด ในขั้นตอนการเชื่อมจะกล่าวเป็นข้อๆ ดังนี้

1. ปรับตั้งความเร็วรอบเชื่อมตามตัวแปรที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ก)
2. ปรับตั้งให้หัวทวนให้อยู่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ข)
3. ค่อย ๆ ป้อนให้หัวทวนลงมาสู่ชิ้นงานด้วยความเร็วและแรงกดที่สม่ำเสมอ จนหัวทวนแตะผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ค)
4. แล้วกดด้วยแรงกดที่สม่ำเสมอจนบ่าของหัวทวนสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ง)
5. จากนั้นกดให้บ่าของหัวทวนจมลงไปบนชิ้นงาน 1 และ 1.5 มิลลิเมตร แล้วค้างไว้ตามตัวแปรที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (จ)
6. เมื่อเวลาครบกำหนดก็ค่อยๆ ยกหัวทวนขึ้นจากชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ฉ)

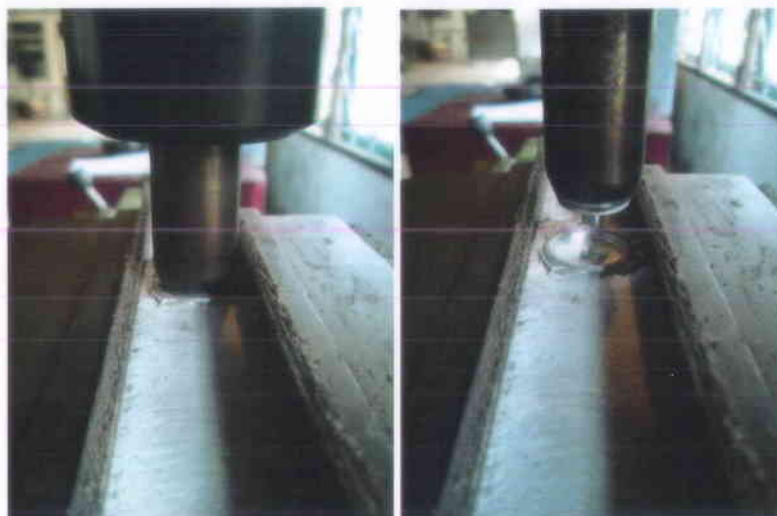


(ก) ปรับตั้งความเร็วรอบเชื่อม (ข) หัว Tool อยู่กึ่งกลางชิ้นงาน



(ค) หัว Tool แตะผิวชิ้นงาน

(ง) บ่า Tool สัมผัสผิวงาน



(จ) ป่า Tool จมลงในชิ้นงาน

(ฉ) ยก Tool ขึ้นจากชิ้นงาน

รูปที่ 3.13 ลำดับขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

3.4.5 การทดสอบความแข็ง

ชิ้นงานเชื่อมบางส่วนที่ได้จากการเชื่อมจะถูกนำไปทดสอบความแข็ง ซึ่งชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบจุดถูกมาตัดให้เหลือเฉพาะบริเวณรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ก) จากนั้นตัดท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ให้มีความสูง 30 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ข) เพื่อเตรียมเป็นแบบในการหล่อเรีอนครอบชิ้นงานสำหรับวัดความแข็ง เมื่อได้ท่อ PVC แล้วให้นำเทปกาวมาติดด้านใดด้านหนึ่งของท่อ PVC ที่ตัดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ค) แล้วจึงนำชิ้นงานที่ตัดไว้มาใส่ในท่อ PVC ที่ได้เตรียมไว้ โดยการวางจะวางแบบแนวขวาง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ง) และนำยาเรซิ่นผสมกับสารเร่งความแข็งของชิ้นงาน แล้วมาเทลงในท่อ PVC ที่เตรียมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (จ) เมื่อเรซิ่นแข็งตัวก็นำไปกลิ้งให้ครึ่งหนึ่งของชิ้นงานออกไปเพื่อจะวัดบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ฉ) โดยชิ้นงานที่เสร็จแล้วก็นำไปทดสอบความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ซ)



(ก) ตัดชิ้นงาน



(ข) ตัดท่อ PVC



(ค) การติดเทปกาว

(ง) การวางชิ้นงาน



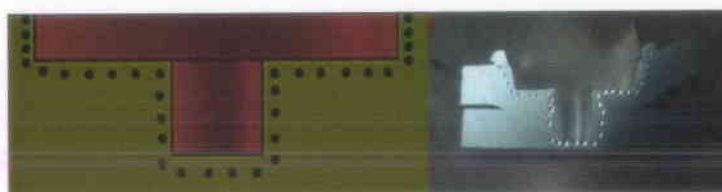
(จ) การเทรซึลล์

(ฉ) กลึงชิ้นงาน

(ช) ชิ้นงานที่เสร็จสำหรับทดสอบความแข็ง

รูปที่ 3.14 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็ง

อย่างไรก็ตามในการทดสอบความแข็งของชิ้นงานจะกดรอบๆ รอยเชื่อม ทั้งหมด 32 ตำแหน่ง โดยจะกดระยะห่างกันแต่ละจุดที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งกดและลักษณะรอยกดค่าความแข็ง

3.4.6 การทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือน

การทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อม โดยการทดสอบแรงดึงเฉือนในงานเชื่อมเสียดทานแบบจุด นำชิ้นทดสอบที่ผ่านกรรมวิธีเชื่อมเสียดทานแบบจุดไปทดสอบแรงดึงเฉือนภายใต้อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง 1.67×10 มิลลิเมตร/วินาที ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทดสอบแรงดึงเฉือน



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบจุดอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 โดยทำการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 380, 1240 และ 2500 รอบ/นาที มีระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และมีระยะเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางกลเพื่อที่จะหาสภาวะที่ดีที่สุด ที่ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงที่สุด ซึ่งได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะผิวรอยเชื่อมของชิ้นงานหลังการเชื่อม

4.1.1 ลักษณะผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที

ผลจากกรรมวิธีเสียดทานแบบจุด ดังรูปที่ 4.1 (ก) (ข) (ค) และ (ง) พบว่าผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที เกิดการประสานกันดีในรอยเชื่อมและบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซีมลึกที่ดี ไม่พบรอยแตกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่เรียบนั้นเกิดจากบ่าของตัวกวน อีกทั้งเกิดครีบเล็กน้อย อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมมีมากพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติก เกิดการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุได้สะดวกแล้วล้นจากบ่าของตัวกวนเกิดเป็นครีบ



(ก) ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที



(ข) ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที



(ค) ระยะกตลิก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที



(ง) ระยะกตลิก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

รูปที่ 4.1 แสดงผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที

4.1.2 ลักษณะผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที

ผลจากกรรมวิธีเสียดทานแบบจุด ดังรูปที่ 4.2 (ก) (ข) (ค) และ (ง) พบว่าผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ระยะกตลิก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที เกิดการประสานกันดีในรอยเชื่อมและบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแตกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่เรียบนั้นเกิดจากบ่าของตัวถวน อีกทั้งเกิดครีบเล็กน้อย อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมมีมากพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติก เกิดการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุได้สะดวกแล้วล้นจากบ่าของตัวถวนเกิดเป็นครีบ



(ก) ระยะกตลิก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

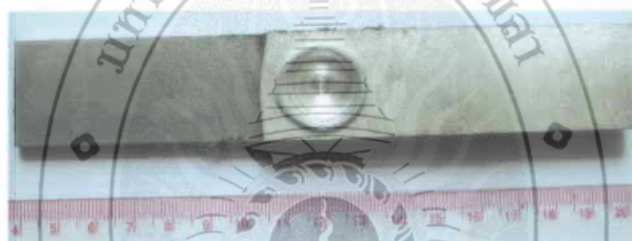
๖71.52
๗11๖๓



(ข) ระยะรอกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกวดแห้ง 30 วินาที



(ค) ระยะรอกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกวดแห้ง 60 วินาที



(ง) ระยะรอกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกวดแห้ง 60 วินาที

รูปที่ 4.2 แสดงผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที

4.1.3 ลักษณะผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที

ผลจากการวิธีเสียดทานแบบจุด ดังรูปที่ 4.3 (ก) (ข) (ค) และ (ง) พบว่าผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ระยะรอกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกวดแห้ง 30 และ 60 วินาที เกิดการประสานกันดีในรอยเชื่อมและบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแตกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่เรียบนั้นเกิดจากบ่าของตัวกวน อีกทั้งเกิดครีบเล็กน้อย อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมมีมากพอที่จะทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติก เกิดการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุได้สะดวกแล้วล้นจากบ่าของตัวกวนเกิดเป็นครีบ



(ก) ระยะรอกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกวดแห้ง 30 วินาที



(ข) ระยะงัดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกวดแช่ 30 วินาที



(ค) ระยะงัดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกวดแช่ 60 วินาที

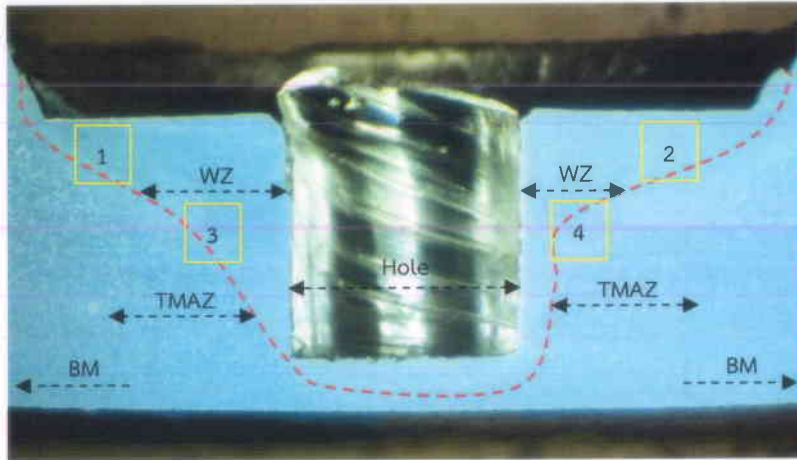


(ง) ระยะงัดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกวดแช่ 60 วินาที

รูปที่ 4.3 แสดงผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที

4.2 โครงสร้างจุลภาค

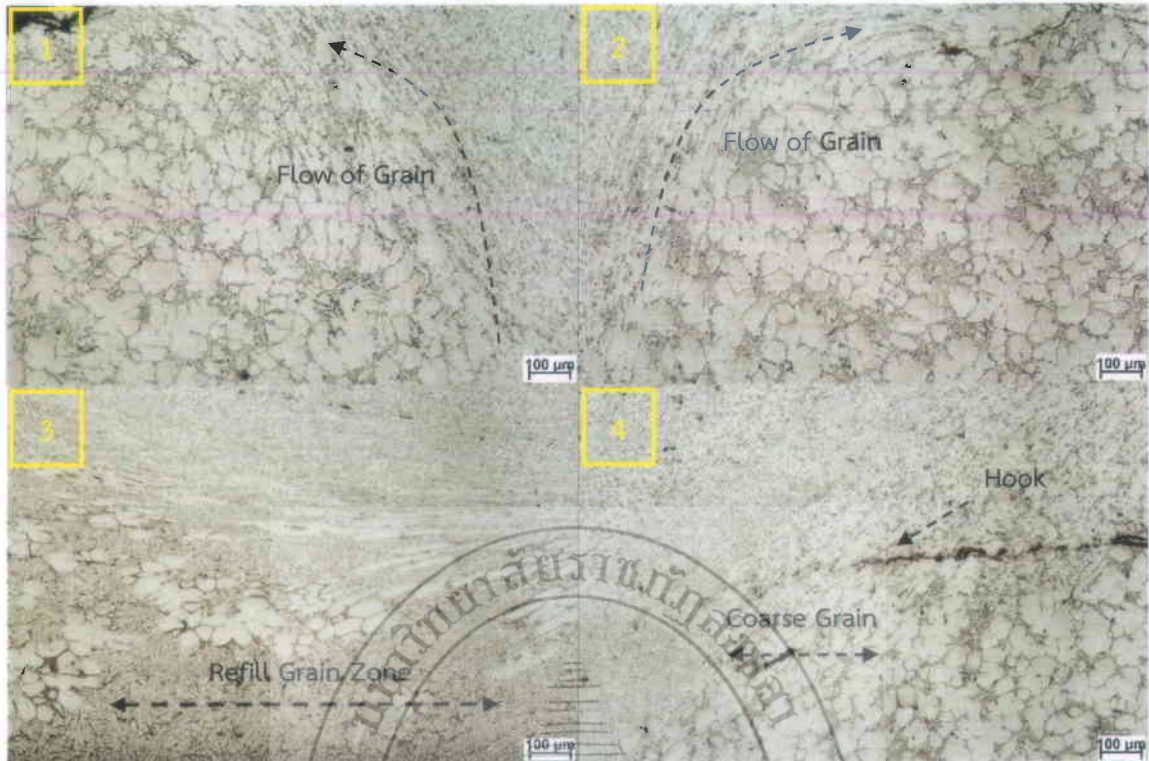
จากการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคก็แตกต่างกัน โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความร้อนระหว่างการเชื่อม ส่งผลให้ภายในโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงของเกรน สำหรับบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone; WZ) เป็นบริเวณที่อยู่รอบๆ ของหัวควน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากจากเนื้อเดิมของโลหะ เพราะได้รับความร้อนที่สูงในขณะเชื่อมเสียดทานแบบจุด ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน (Thermal Mechanical Affect Zone; TMAZ) จะเห็นได้ว่าเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากเกรนก่อนกลมเป็นเกรนหยาบ การไหลของเกรนจะมีทิศทางไปตามทิศทางการเกิดการหมุนของหัวควน และบริเวณเนื้อโลหะเดิมของวัสดุจะเป็นบริเวณที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความร้อนยังแพร่ไปไม่ถึงบริเวณนั้น งานวิจัยนี้สนใจตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ 4 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณใกล้ครึ่งชิ้นงานด้าน Retreating side (ตำแหน่งที่ 1) บริเวณใกล้ครึ่งชิ้นงานด้าน Advancing side (ตำแหน่งที่ 2) บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานชิ้นบนและล่างด้านซ้าย (ตำแหน่งที่ 3) และบริเวณต่อระหว่างชิ้นงานชิ้นบนและล่างด้านขวา (ตำแหน่งที่ 4) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างมหภาคบริเวณรอยเชื่อม

4.2.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

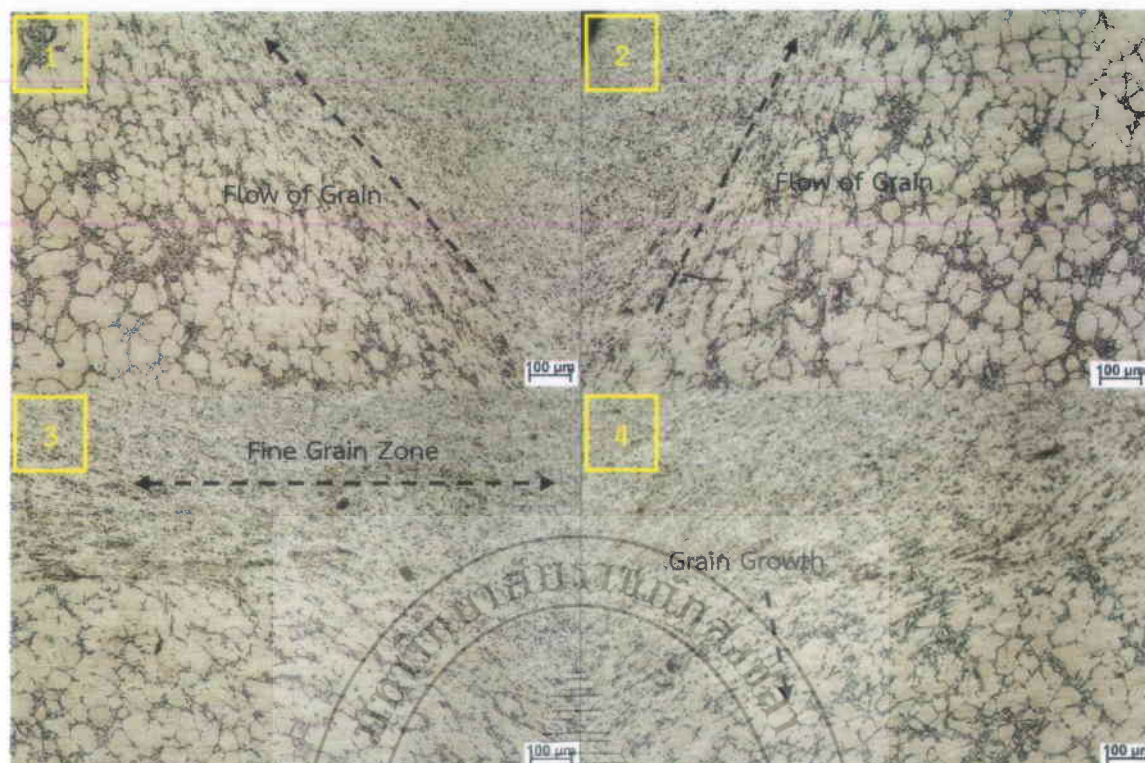
โครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ในบริเวณเนื้อเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค แรงและความร้อนที่ถูกสร้างขึ้นจากตัวแปรในการทดลองเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากลักษณะโครงสร้างแบบก้อนกลมไปเป็นโครงสร้างแบบละเอียดในบริเวณเนื้อเชื่อม และเป็นเกรนแบบหยาบในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนจากการเชื่อม สำหรับรูปที่ 4.5 ตำแหน่งที่ 1 ในบริเวณใกล้ครึ่งชิ้นงานด้าน Retreating side ซึ่งเป็นบริเวณที่โครงสร้างจุลภาคแบบเกรนหยาบ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมหรือเนื้อโลหะเดิม เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคบางส่วน เฟสยูเทคติก Mg_2Si บางส่วนถูกทำลายให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน คล้ายๆ กัน รูปที่ 4.5 ตำแหน่งที่ 2 ในบริเวณใกล้ครึ่งชิ้นงานด้าน Advancing side การเปลี่ยนโครงสร้างจะเกิดการไหลของเกรน เพราะแรงกระทำส่งผลให้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานในขณะที่เชื่อมเปลี่ยนรูปร่างเกรน ซึ่งถือได้ว่าเป็นพฤติกรรมกรณการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation) อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานชิ้นบนและล่างด้านซ้าย พบว่ามีการเกิดเกรนแบบใหม่หลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ซึ่งเป็นเกรนขนาดเล็กที่พัฒนาการเติบโตมาจากความร้อนหลังการเชื่อม โดยมีทั้งรูปทรงที่เป็นเกรนหลัก (Primary Grain) และเกรนที่แตกกิ่งสาขา (Secondary Grain) จากเกรนหลักออกมา ซึ่งเกรนเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้ก็กล่าวได้ว่าการตกตะกอนของเกรนใหม่ (Refill Grain) นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณรอยต่อของชิ้นงานระหว่างชิ้นบนและชิ้นล่างบางส่วนยังเกิดตะเข็บ (Hook) ของรอยต่อที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเป็นบริเวณที่แรงและความร้อนที่ได้จากตัวแปรในการทดลองไม่สามารถกระทำได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ตำแหน่งที่ 4 นอกจากนั้นยังพบว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมของวัสดุที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในระดับจุลภาค เพราะไม่ได้รับอิทธิพลจากแรงที่กวน และอิทธิพลจากความร้อนจากการเสียดทาน จึงไม่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของเกรน (Mukuna P, 2014) จะเห็นได้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบจุดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากตัวแปรเท่านั้น



รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

4.2.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

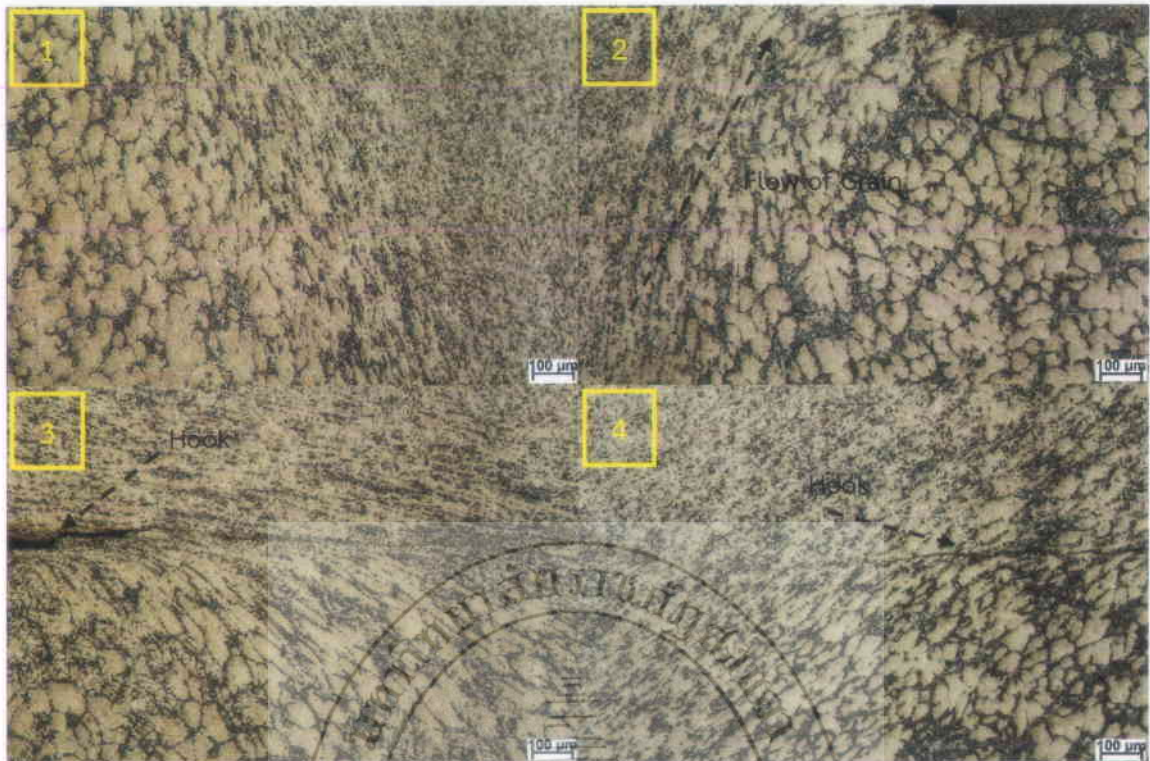
รูปที่ 4.6 ในตำแหน่งที่ 1, 2, 3 และ 4 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าการเพิ่มระยะกดลึกส่งผลให้เกิดความร้อนที่สูงขึ้น นำไปสู่การเกิดการแผ่ความร้อนที่มากขึ้นที่บริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุให้ที่ตัวแปรในการทดลองนี้ไม่เกิดตะเข็บของรอยต่อชิ้นงานระหว่างชิ้นบนและชิ้นล่าง ซึ่งบริเวณรอยเชื่อมที่ได้หลังการเชื่อมมีความสมบูรณ์ของชิ้นงาน ไม่พบจุดบกพร่องจากการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ตำแหน่งที่ 3 และ 4 นั้นแสดงให้เห็นว่ามีการสร้างความร้อนที่เหมาะสมในการเชื่อมที่ตัวแปรนี้ นอกจากนั้นเป็นที่น่าสังเกตว่าเฟสยูเทคติกมีขนาดที่เล็กมาก เพราะเกิดการเสียหายจากแรงในขณะเชื่อม สำหรับบริเวณเนื้อเชื่อมมีการผสมกันระหว่างเฟสยูเทคติกและเฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์ การกระจายตัวของเฟสยูเทคติกที่ดีส่งผลให้มีค่าความแข็งที่ดีด้วย เพราะเฟสยูเทคติกที่กระจายตัวบริเวณเนื้อเชื่อมจะรับแรงกดได้ดี สำหรับรูปที่ 4.6 ตำแหน่งที่ 1 และ 2 แสดงบริเวณใกล้ครีปชิ้นงานด้าน Retreating side และบริเวณใกล้ครีปชิ้นงานด้าน Advancing side ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเกรนก่อนกลมได้รับแรงแล้วเกิดการยึดตัวตามแนวแรง ส่งผลให้เกรนมีลักษณะตามยาว ระยะกดลึกที่สูงขึ้นเป็นอีกสาเหตุที่เพิ่มความร้อนเข้า (Heat input) ขณะเชื่อม เพราะสามารถสร้างแรงเสียดทานได้สูงขึ้น ซึ่งการเสียดทานที่สูงส่งผลให้ความร้อนสูงด้วย อิทธิพลของความร้อนยังส่งผลให้เกรนก่อนกลมเดิมของวัสดุบริเวณที่ได้รับความร้อนเกิดการเติบโตของเกรน โดยเกรนที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ไปเชื่อมต่อกับเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า (R.S. Mishra, Z.Y. Ma, 2005) จนเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างของขอบเกรน จนนำไปสู่เกรนที่โตขึ้นหลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุด



รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดสัก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

4.2.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดสัก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

การเพิ่มเวลาในการกดแช่ส่งผลที่ดีในการสร้างความร้อนที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เชื่อม แต่อย่างไรก็ตาม การเกิดความสมบูรณ์ของเนื้อเชื่อมมาจากแรงกดด้วยเช่นกัน โดยที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดสัก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที กำลังขยาย 100 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าชิ้นงานหลังการเชื่อม (ตำแหน่งที่ 3 และ 4) พบจุดบกพร่องจากการเชื่อม ลักษณะของจุดบกพร่องเกิดจากการเชื่อมกันไม่สมบูรณ์จนเกิดเป็นตะเข็บรอยเชื่อมตามแนวยาว จากกึ่งกลางของแนวเชื่อมยาวตลอดไปยังด้านข้างของชิ้นงาน นั้นส่งผลมาจากที่ระยะกด 1 มิลลิเมตร การแพร่ความร้อนจากบ่าของตัวกวนน้อยกว่าที่ระยะกด 1.5 มิลลิเมตร จึงเป็นสาเหตุให้บริเวณเนื้อเชื่อมไม่สมบูรณ์ ซึ่งคล้ายๆ กันกับที่ตัวแปรความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดสัก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที อย่างไรก็ตามบริเวณใต้ที่รับอิทธิพลทางความร้อน ซึ่งจะอยู่ใกล้เนื้อเชื่อมพบว่าการเติบโตของเกรนก่อนเคลมอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ขนาดของเกรนที่โตขึ้นข้างๆ เนื้อเชื่อมส่งผลให้สมบัติทางความแข็งแรงไม่ดี เนื่องจากไม่เกิดการกระจายตัวของเฟสยูเทคติก ซึ่งเฟสที่เติบโตจะเป็นเฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์เป็นส่วนใหญ่ การเปลี่ยนรูปของโครงสร้างจุลภาคที่ไม่สมบูรณ์จะนำไปสู่เกรนที่มีลักษณะเกรนแบบหยาบ และส่งผลให้สมบัติทางด้านความแข็งแรงของวัสดุหลังการเชื่อมที่ไม่ดี นอกจากนั้นเกรนที่หยาบจะรับแรงดึงได้ไม่ดี เกรนที่หยาบมากมีความเสี่ยงที่เกิดการแตกตามแนวขอบเกรน (Intergranular crack) ได้ง่ายกว่าเกรนที่มีความละเอียด (X. W. Yang, T. Fu and W. Y. Li, 2014)



รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

4.2.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

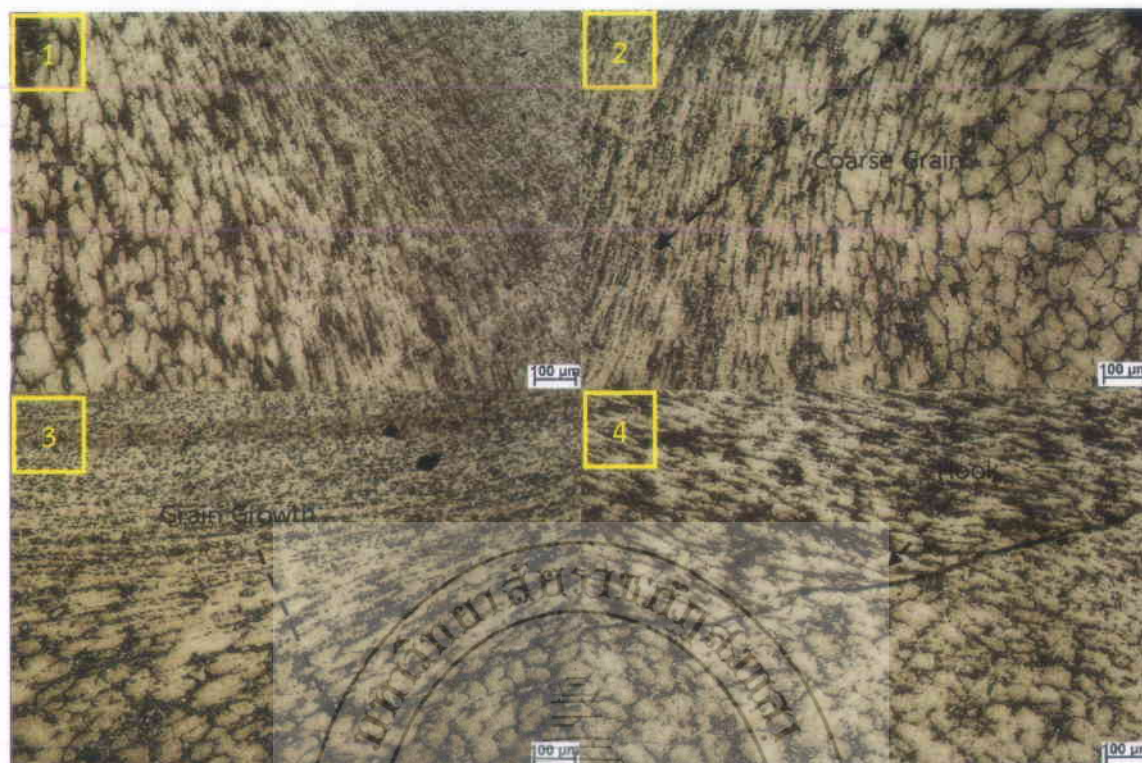
รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า สำหรับเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่ตัวแปรในการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะกดลึกทำให้ตะเข็บของรอยเชื่อมหมดไป ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ตำแหน่งที่ 3 และ 4 ที่แสดงบริเวณรอยต่อของชิ้นงานเชื่อมชิ้นบนและชิ้นล่าง อิทธิพลทางความร้อนมีความสามารถที่แพร่ได้ไกลขึ้นจากจุดกึ่งกลางรอยเชื่อม ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวในสภาวะพลาสติกได้กว้างขึ้น เมื่อเกิดแรงจากการกวนส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดการไหลตัวรอบๆ หัวกวนได้ดีขึ้น นำไปสู่การยึดติดที่ดีขึ้น ในการทดลองที่ตัวแปรนี้แสดงให้เห็นว่าเนื้อเชื่อมสมบูรณ์ ไม่เกิดรอยแตกร้าวหรือจุดบกพร่องอื่นๆ บริเวณเนื้อเชื่อม นั้นมาจากกลไกการเกิดการสร้างความร้อนที่เหมาะสมในขณะที่เชื่อมชิ้นงาน นอกจากนี้บริเวณรอยเชื่อมยังมีเกรนที่ละเอียดเป็นบริเวณที่กว้างกว่าตัวแปรอื่นๆ ซึ่งปริมาณเกรนที่ละเอียดที่มากส่งผลที่ดีต่อสมบัติทางด้านแรงดึงของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นบริเวณใกล้ครีบน้ำงานด้าน Retreating side และบริเวณใกล้ครีบน้ำงานด้าน Advancing side ก็มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคคล้ายๆ กันกับการทดลองที่ตัวแปรอื่นๆ โดยเนื้อวัสดุจะเกิดการไหลตัว ส่งผลให้เกรนยืดยาวขึ้นและเนื้อวัสดุบางส่วนที่เกิดการอ่อนตัวรอบๆ บ่าของหัวกวนก็จะถูกผลักออกไปเป็นครีบน้ำงาน (Flash) ของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Z. Shen, X. Yang, Z. Zhang, L. Cui and T. Li, 2013) ถึงแม้ว่าการเชื่อมเสียดทานแบบจุดจะมีจุดบกพร่องบ้าง แต่ก็มีโอกาสเกิดโพรงจากการเชื่อมน้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย เนื่องจากเป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง อากาศจึงไม่สามารถไปทำปฏิกิริยาได้ในระหว่างการเชื่อม



รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

4.2.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

การเพิ่มความเร็วยรอบในการเชื่อม จาก 380 รอบ/นาที ไปสู่ 1240 รอบ/นาที มีแนวโน้มที่จะเกิดความร้อนในการเชื่อมสูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่าเนื้อวัสดุมีการไหลตัวที่ดี แต่ก็ยังพบจุดบกพร่องหลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบจุด โดยรูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า จากการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 แสดงให้เห็นว่าบริเวณข้างรอยเชื่อมในตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นบริเวณด้าน Advancing side ของชิ้นงานมีช่องว่างตะเข็บรอยต่อของชิ้นงานหลังการเชื่อม แนวช่องว่างของตะเข็บจะเป็นแนวยาวจากกึ่งกลางชิ้นงานไปยังด้านข้าง การกำจัดตะเข็บช่องว่างทำได้โดยการเกิดความร้อนที่เพียงพอในขณะที่เชื่อม และมีแรงกระทำจากการหมุนที่มาก ส่งผลให้ตะเข็บรอยต่อมีปริมาณที่น้อยหรือหายไป ในทางตรงกันข้าม หากระหว่างเชื่อมความร้อนที่สะสมในการเชื่อมไม่มากพอ อาจส่งผลให้ตะเข็บช่องว่างเกิดการกำจัดได้ยาก เพราะเนื้อวัสดุไม่อยู่ในสภาวะที่เกิดการไหลตัว อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบบริเวณรอยเชื่อมด้าน Retreating side ไม่พบตะเข็บช่องว่าง นั้นแสดงให้เห็นว่าความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นเกิดในด้าน Retreating side มากกว่าด้าน Advancing side ของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างเกรนที่ใกล้กัน จนเกิดการเจริญเติบโตของเกรนอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ซึ่งทั้งสองตำแหน่งนี้เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับบ่าหัวควน จึงได้รับอิทธิพลทางความร้อนที่มากนำไปสู่เกรนที่หยาบ



รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

4.2.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

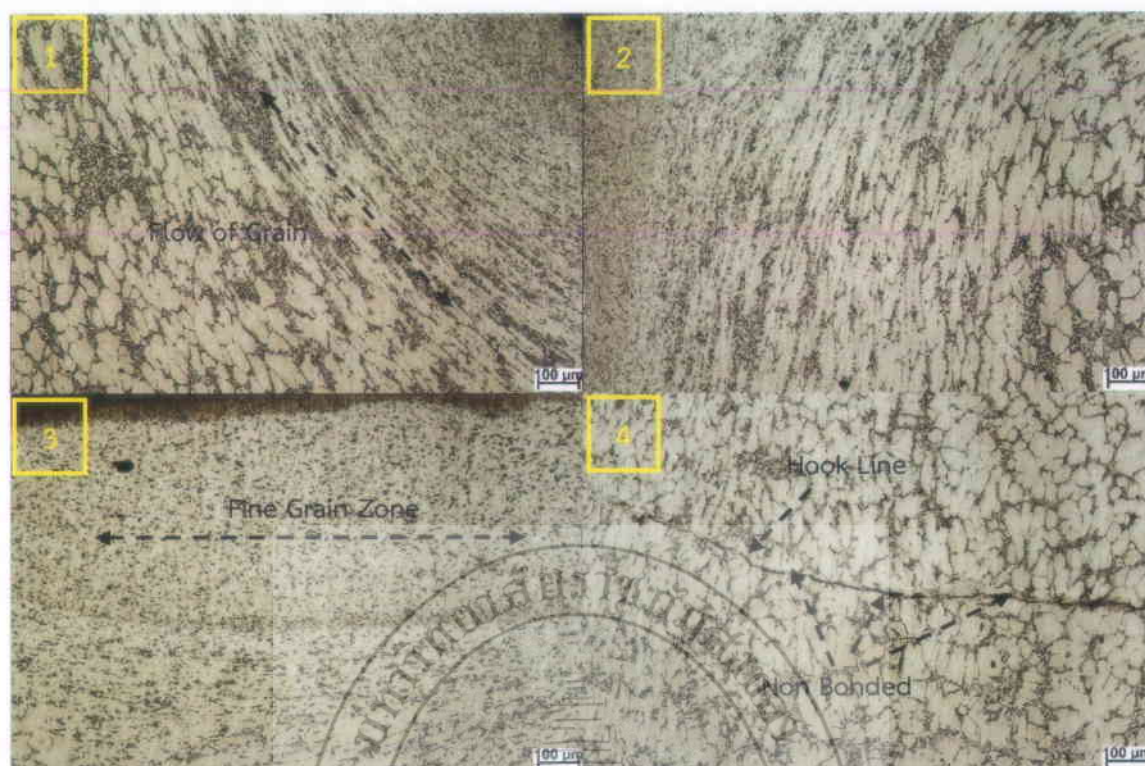
รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า การเพิ่มระยะกดจาก 1 มิลลิเมตร ไปสู่ระยะกดที่ 1.5 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าเนื้อเชื่อมสมบูรณ์ ไม่เกิดรอยแตกร้าวหรือจุดบกพร่องอื่นๆ บริเวณเนื้อเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ตำแหน่งที่ 3 และ 4 เพราะระยะกดที่ 1.5 มิลลิเมตร ทำให้เกิดพฤติกรรมการกดขึ้นงานชั้นบนและชั้นล่างให้แน่นด้วยกันในขณะที่เชื่อมเสียดทานแบบจุด ดังนั้นระยะกดที่สูงกว่าสามารถเชื่อมเสียดทานแบบจุดแล้วขึ้นงานเกิดจุดบกพร่องได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะกดที่น้อยกว่า ซึ่งมีผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกันกับที่ตัวแปรความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าระยะกดมีผลต่อการยึดติดของชิ้นงาน แต่อย่างไรก็ตามระยะกดที่สูงมากๆ อาจนำไปสู่การเกิดครีบของชิ้นงานหลังการเชื่อมที่สูงเกินไป และอาจนำไปสู่ความเสียหายของหัวพินในระหว่างการเชื่อม เพราะเป็นการเพิ่มแรงเสียดทานที่สูงขึ้นในขณะที่เชื่อม สำหรับโครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเดิม โดยบริเวณเนื้อเชื่อมเกิดเกราละเอียด และบริเวณอิทธิพลทางความร้อนเกิดเกรนหยาบ (T. Long, W. Tang, A.P. Reynolds, 2007) ซึ่งมีผลการทดลองไปในทำนองเดียวกันกับตัวแปรการทดลองอื่นๆ บริเวณที่ได้รับความร้อนใกล้ๆ กับป่าของหัวกวนพบว่ามีการเจริญเติบโตของเกรนเป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากได้รับความร้อนที่สูงดังแสดงในรูปที่ 4.10 ตำแหน่งที่ 1 และ 2 อีกทั้งยังมีขนาดเกรนที่ใหญ่และมีลักษณะเป็นเกรนที่หยาบ



รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

4.2.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า เวลาในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยให้ชิ้นงานในขณะที่เชื่อมมีเวลาในการสะสมความร้อนในการเชื่อมขึ้นด้วย จะเห็นได้ว่าที่บริเวณรอบๆ หัวกวนได้บ้างที่สัมผัสกับชิ้นงานแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเดิมของเนื้อโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลง มีการไหลตัวของเนื้อวัสดุเหมือนตัวแปรอื่นๆ แต่ลักษณะการไหลตัวของเกรนก่อนกลมจะยืดยาวกว่าที่เวลาในการเชื่อมที่ 30 วินาที เนื่องจากเวลาในการกดแช่ที่สูงทำให้เกรนก่อนกลมเดิมของเนื้อวัสดุมีเวลาในการรับความร้อนสะสม ทำให้ยึดได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ตำแหน่งที่ 1 และ 2 อย่างไรก็ตามบริเวณเนื้อเชื่อมพบว่าการเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ ใกล้แนวเชื่อมพบตะเข็บรอยต่อของชิ้นงานหลังการเชื่อมในบริเวณ Advancing side ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดความร้อนที่ไม่เพียงพอ (M.W. Mahoney, etc., 1998) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ตำแหน่งที่ 4 ในทางตรงกันข้ามบริเวณใกล้ครึ่งชิ้นงานด้าน Retreating side ไม่พบจุดพบกพร่องของชิ้นงาน โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงจนเฟสยูเทคติกมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง แทรกตัวระหว่างเฟสอะลูมิเนียมเมตริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ตำแหน่งที่ 3 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วบริเวณเนื้อเชื่อม จะส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีคุณสมบัติในการรับความแข็งแรงที่ดี เพราะเฟสยูเทคติกที่กระจายตัวจะมีพฤติกรรมในการรับแรงกระทำได้ดี



รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดล็ก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

4.2.8 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดล็ก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

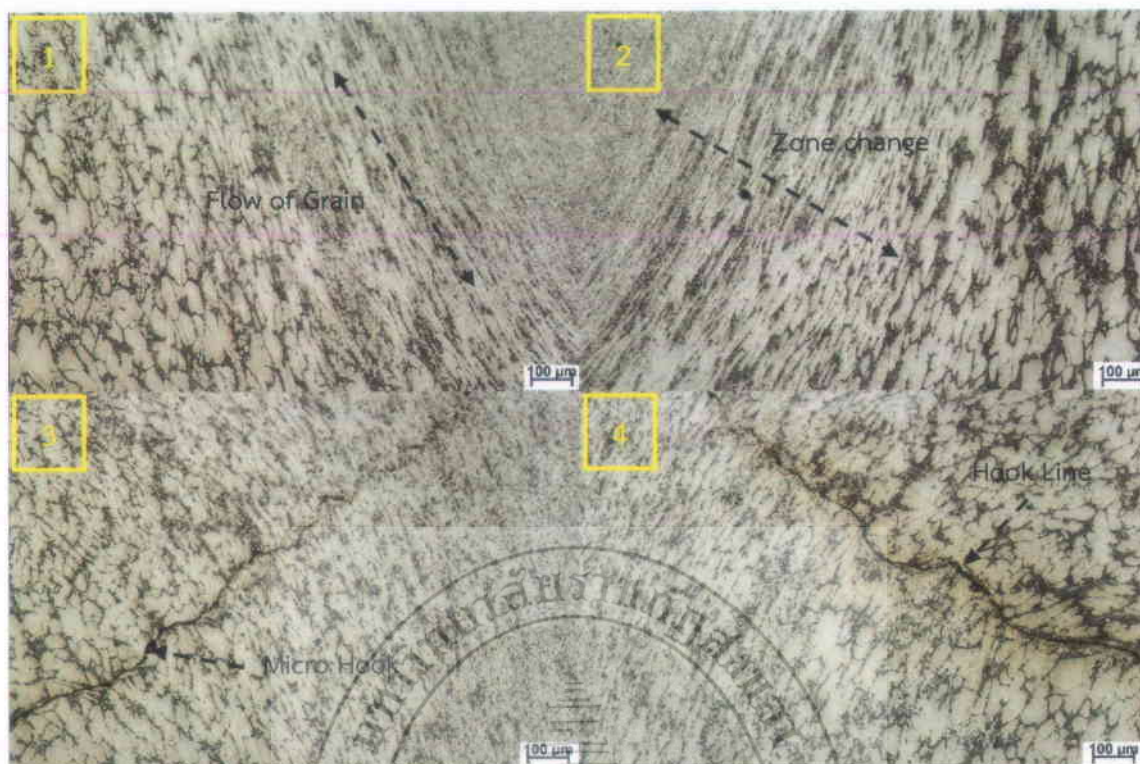
การเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดล็ก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที แสดงโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าการระยะในการกดล็กเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อการยึดติดของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความลึกในการกดที่สูงกว่ามีแนวโน้มในการยึดติดที่ดีกว่าระยะในการกดของชิ้นงานที่น้อยกว่า โดยเมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณเนื้อเชื่อมของความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดล็ก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที ในตำแหน่งที่ 4 ของรูปที่ 4.12 ไม่เกิดตะเข็บรอยต่อของชิ้นงาน ชิ้นงานเชื่อมประสานเข้ากันได้ดี ในขณะที่รูปที่ 4.12 ในตำแหน่งที่ 3 ซึ่งเป็นบริเวณเนื้อเชื่อมระหว่างทั้งสองชิ้นก็มีผลการทดลองไปในทำนองเดียวกัน ชิ้นงานเชื่อมมีความสมบูรณ์หลังการเชื่อม โดยไม่พบจุดบกพร่องสำหรับรูปที่ 4.12 ในตำแหน่งที่ 1 และ 2 ก็ไม่พบจุดบกพร่องของชิ้นงาน เป็นที่น่าสังเกตว่าการเชื่อมเสียดทานแบบจุดความเร็วรอบในการหมุนเชื่อม ระยะกดล็ก และเวลาในการเชื่อมมีผลต่อลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน ตัวแปรเหล่านี้จะเป็นปัจจัยหลักในการสร้างแรงเสียดทานระหว่างการเชื่อม ซึ่งแรงเสียดทานจะเป็นตัวกำหนดความร้อนดังสมการ $F = \mu P$ เมื่อค่า μ เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่า P คือค่าแรงที่กระทำในขณะที่เชื่อมเสียดทานแบบจุด (K. Masaki, Y.S. Sato, M. Maeda, H. Kokawa, 2008)



รูปที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

4.2.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

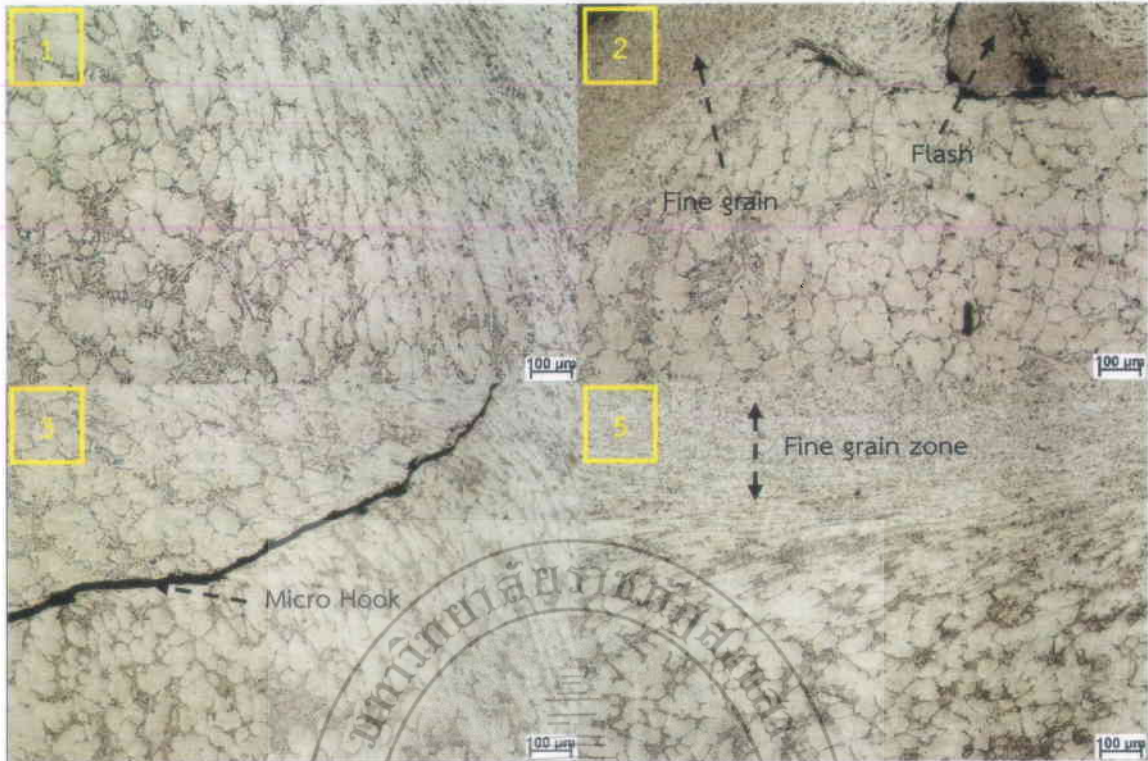
การเพิ่มความเร็วรอบในการเชื่อมจาก 380 รอบ/นาที ไปยัง ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ส่งผลต่อโครงสร้างอย่างชัดเจน โดยรูปที่ 4.13 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน แต่ชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุดไม่สมบูรณ์ ความเร็วรอบในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่สูงมากเกินไปอาจนำไปสู่การสูญเสียความร้อนจากการหมุนของหัวกวน ทำให้เกิดความร้อนสะสมที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วหมุนสูงๆ มีการยึดติดที่ยาก โดยรูปที่ 4.13 ในตำแหน่งที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นบริเวณเนื้อเชื่อมระหว่างชิ้นงานด้านบนและด้านล่างก็มีผลการทดลองไปในทำนองเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเกิดตะเข็บช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างชิ้นงานทั้งสองชิ้น ลักษณะรอยตะเข็บแนวเชื่อมจะเริ่มจากเนื้อเชื่อมยาวขนาดชิ้นงานเชื่อมไปยังขอบของชิ้นงาน ซึ่งแสดงความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานหลังการเชื่อม ตะเข็บช่องว่างขนาดใหญ่จะส่งผลให้ความสามารถในการรับสมบัติทางด้านแรงดึงของชิ้นงานลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานขาดได้ง่ายเมื่อเกิดการรับแรงดึงกระทำ (Tensile Load) อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณอื่นๆ ของรอยเชื่อมพบว่า มีผลที่สอดคล้องกับการทดลองที่ตัวแปรในการทดลองอื่นๆ โดยรูปที่ 4.13 ในตำแหน่งที่ 1 และ 2 ซึ่งรับอิทธิพลทางความร้อนก็เกิดการไหลตัวของเกรนก้อนกลมเช่นกัน



รูปที่ 4.13 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

4.2.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

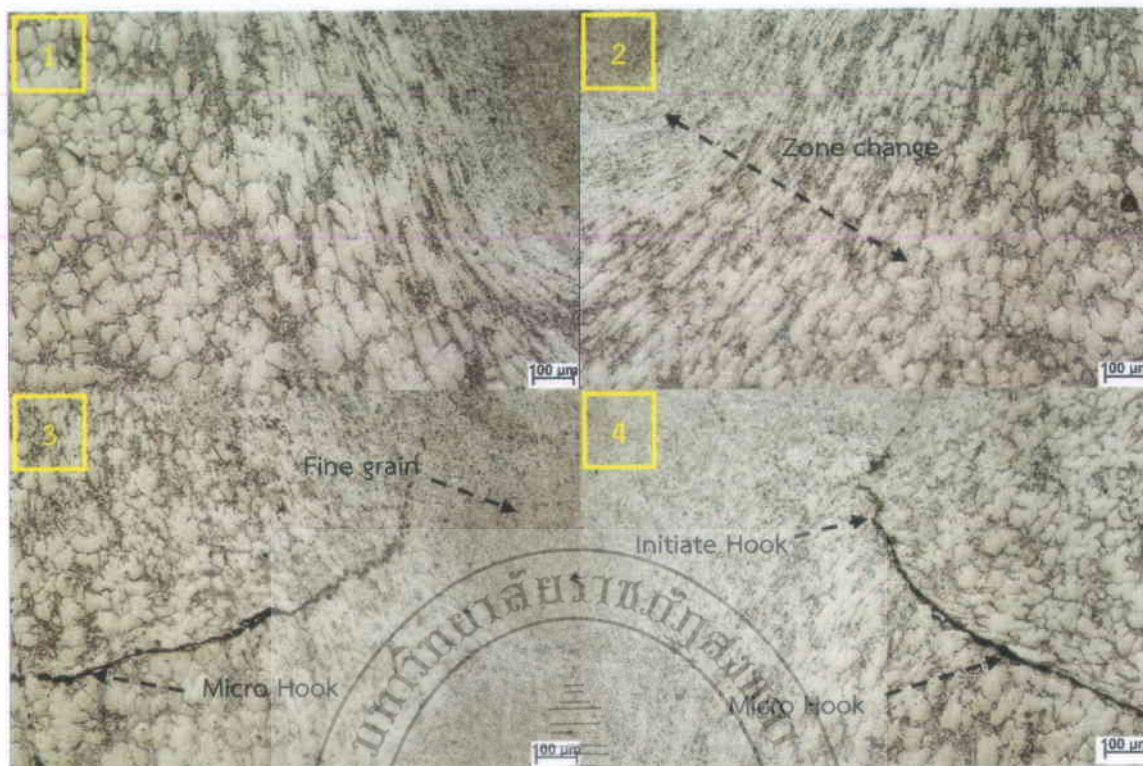
รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า สำหรับการทดลองที่ตัวแปรนี้แสดงให้เห็นว่า ตะเข็บช่องว่างขนาดใหญ่มีปริมาณที่ลดลงในบริเวณ Advancing side ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ตำแหน่งที่ 4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นเป็นแบบเกรนละเอียดและเกรนหยาบขนานกัน เพราะอิทธิพลของแรงกระทำในการเชื่อมส่งผลให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน แต่บริเวณใกล้ครีบกั้นงานด้าน Retreating side พบตะเข็บช่องว่างขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ตำแหน่งที่ 3 ตะเข็บช่องว่างขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการแผ่ความร้อนในขณะที่เชื่อมเสียตทานแบบจุดของชิ้นงาน นั่นเป็นสาเหตุอีกประการที่ชิ้นงานไม่สามารถยึดติดกันได้ รูปที่ 4.14 ตำแหน่งที่ 2 เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับบ่าของหัวควน โดยโครงสร้างจุลภาคบริเวณครีบกั้นของชิ้นงานมีลักษณะของเกรนที่ละเอียดคล้ายๆ บริเวณเนื้อเชื่อม เนื่องจากบริเวณครีบกั้นของชิ้นงานได้รับแรงและความร้อนกระทำ จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างก่อนไหลตัวไปเป็นครีบกั้นของชิ้นงาน หลังการเชื่อมเสียตทานแบบจุด และรูปที่ 4.14 ตำแหน่งที่ 1 ก็มีการไหลตัวของเนื้อวัสดุเดิมอย่างชัดเจน ซึ่งไปในทำนองเดียวกันกับผลการทดลองที่ตัวแปรอื่นๆ



รูปที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 30 วินาที

4.2.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

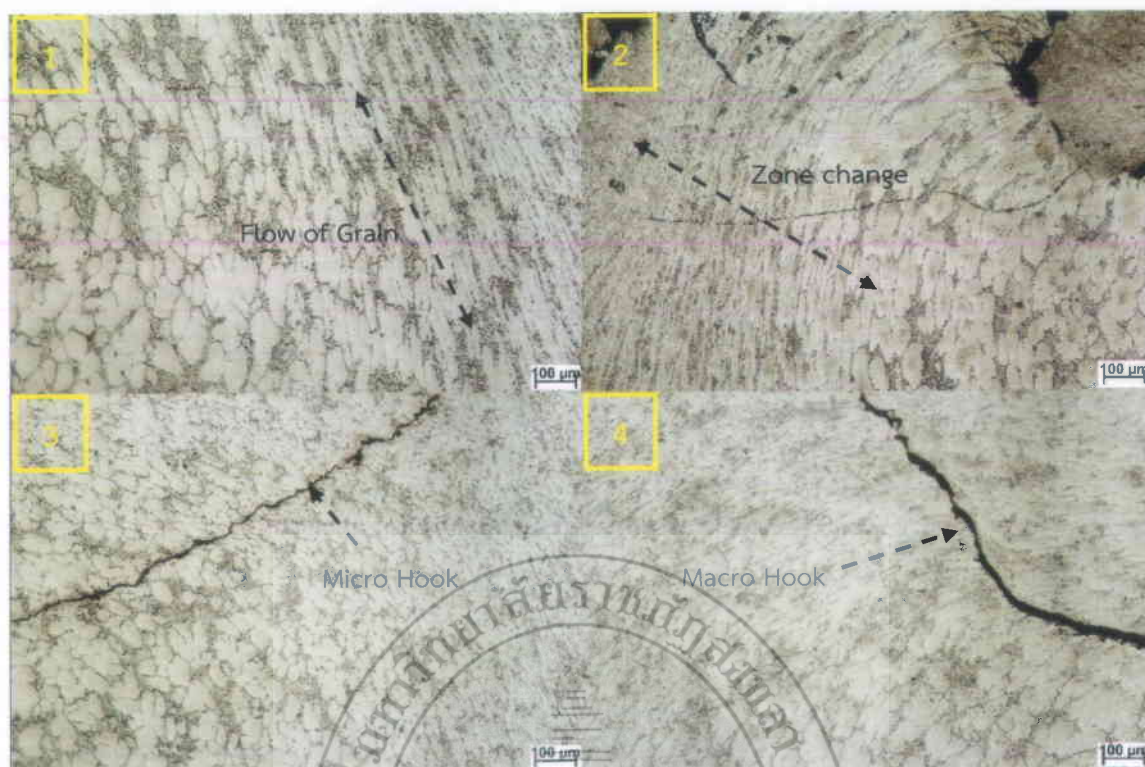
จากการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ผ่านการขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งมีความเป็นไปได้ในการเชื่อมด้วยวิธีการนี้ โดยตัวแปรในการทดลองเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าโครงสร้างจุลภาคแต่ละบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน บริเวณเนื้อเชื่อมเกิดตะเข็บช่องว่างขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ตำแหน่งที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ตะเข็บช่องว่างจะเริ่มเกิดจากเนื้อเชื่อม และมีแนวยาวไปเรื่อยๆ ขนาดกับชิ้นงาน โดยจะเริ่มเกิดตะเข็บขนาดเล็กๆ ที่เนื้อเชื่อม แล้วช่องว่างตะเข็บจะเริ่มกว้างขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงบริเวณขอบของชิ้นงานเชื่อม ลักษณะเช่นนี้มีผลมาจากความร้อนจากการเชื่อมที่สะสมน้อยเกินไป การควบคุมความร้อนสะสมในการเชื่อมจึงเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบจุด ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานจะถูกสร้างมาจากตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดในการเชื่อม นอกจากตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมแล้ว การสร้างความร้อนยังมาจากปัจจัยอื่นๆ เช่นขนาดบ่าของหัวกวน สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ดังสมการ $q_0 = 4/3\pi^2 \mu P \omega R^3$ เมื่อ μ เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่า P คือ ค่าแรงที่กระทำในขณะเชื่อมเสียดทานแบบจุด ω คือ การเคลื่อนที่ของเส้นรอบวงกลม R คือรัศมีขอบบ่าของหัวกวน และค่า π เป็นค่าคงที่ในการทดลอง ตามลำดับ (K. Masaki, Y.S. Sato, M. Maeda, H. Kokawa, 2008)



รูปที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

4.2.12 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

รูปที่ 4.16 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตัวแปรความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที ที่กำลังขยาย 100 เท่า สำหรับการเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนเชื่อมที่ 2500 รอบ/นาที ในทุกการทดลอง การเพิ่มระยะกดลึกหรือการเพิ่มเวลาในการกดแช่ก็ไม่สามารถทำให้ชิ้นงานหลังการเชื่อมกำจัดตะเข็บช่องว่างจากการเชื่อมได้ รูปที่ 4.16 ตำแหน่งที่ 3 และ 4 แสดงบริเวณเนื้อเชื่อมรอยต่อของชิ้นงาน พบว่าเกิดตะเข็บช่องว่างจากการเชื่อมทั้งด้าน Advancing side และด้าน Retreating side การเชื่อมประสานกันที่ไม่สมบูรณ์ โดยเนื้อเชื่อมบางส่วนของชิ้นงานไม่ประสานกัน เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ 380 และ 1240 รอบ/นาที อิทธิพลทางความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมเสียดทานแบบจุดจะเกิดเฉพาะบริเวณที่ป่าและรอบๆ หัวกวน ซึ่งต่างจากการเชื่อมแบบหลอมละลาย ดังนั้นบริเวณที่ยึดติดกันของการเชื่อมเสียดทานแบบจุดจะอยู่บริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนและแรงกระทำ ซึ่งจะอยู่รอบๆ ของหัวกวนชิ้นงาน อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานแบบจุดก็มีความร้อนเข้าเพียงพอในระหว่างการเชื่อมที่ส่งผลให้ชิ้นงานยึดติดกัน และส่งผลให้บริเวณต่างๆ ของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคตามตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง โดยบริเวณเนื้อเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคมากที่สุด เนื่องจากได้รับแรงกระทำจากการกวนและความร้อนมากที่สุดจึงส่งผลให้เกรนส่วนใหญ่ละเอียด สำหรับบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนก็มีการเปลี่ยนแปลงของเกรนเช่นกัน โดยลักษณะการเกิดการไหลของเกรนตามทิศทางการหมุนของหัวกวน เกรนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่หยาบ และบริเวณเนื้อเดิมที่ไม่ได้รับความร้อนในการเชื่อม เกรนก่อนกดเดิมก็ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากเนื้อเดิมของวัสดุ



รูปที่ 4.16 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร เวลาในการกดแช่ 60 วินาที

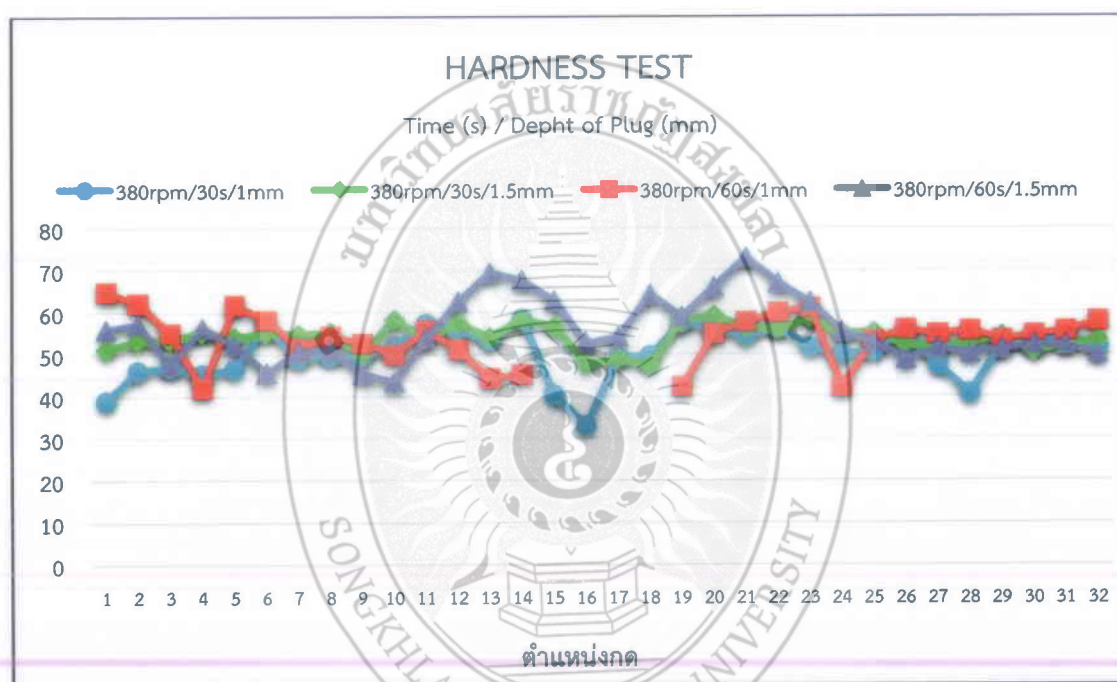
4.3 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมจะทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส หัวกดเพชรรูปทรงพีระมิด โดยการกดบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยเชื่อมตามแนวขวางของรอยต่อ ซึ่งชิ้นงานถูกตัดชิ้นนานกับรอยเชื่อม และนำชิ้นงานไปขัดผิวหน้าให้เรียบ สำหรับการทดสอบแรงกดจะใช้แรงกด 100 กรัมต่อแรง เวลาในการกดค้างไว้เป็นเวลา 10 วินาที บนเนื้อเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน และเนื้อโลหะเดิม ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบความแข็งของชิ้นงาน ในหารกดจะกดในระยะห่างกันประมาณ 400 μm หรือประมาณ 0.4 มิลลิเมตร ตัวแปรที่ความเร็วรอบ 380, 1240 และ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที ตามลำดับผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานแสดงดังนี้

4.3.1 ทดสอบความแข็งของบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที

รูปที่ 4.17 แสดงกราฟผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ตัวแปรความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที โดยมีการตรวจสอบความแข็งทั้งหมด 32 ตำแหน่ง จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) ที่ได้จากการกดวัดความแข็ง เฉลี่ยมีค่า 40.58 HV บริเวณเนื้อเชื่อม (WZ) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 53.99 HV ซึ่งสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม เนื่องจากบริเวณเนื้อเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากความร้อน หลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบจุด จนนำไปสู่เกรนละเอียดในบริเวณเนื้อเชื่อม ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนหลังการเชื่อม (TMAZ) ที่ประกอบด้วยด้าน Retreating side และ Advancing side ทั้งสองด้านมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งที่วัดค่าได้จากการกดเฉลี่ยอยู่ที่ 52.36 HV เมื่อนำค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมไปเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์

พบว่า คิดเป็น 24.83 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน Retreating side และ Advancing side มีค่าที่สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 22.49 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะกดลึกพบว่าที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งสูงกว่าตัวแปรที่ผ่านการเชื่อมที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร เนื่องจากการกดที่สูงนำไปสู่การบีบอัดเนื้อวัสดุในระหว่างเชื่อมเสียดทานแบบจุดให้มีความหนาแน่นด้วย (R.S. Mishra, 2008) และเมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกดพบว่าที่เวลาในการกด 60 วินาที มีแนวโน้มให้ค่าความแข็งที่ต่ำกว่า ที่เวลาในการกด 30 วินาที เพราะเวลาในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่ 60 วินาที ทำให้การตกตะกอนของเฟสบริเวณเนื้อเชื่อมสมบูรณ์กว่าเวลาน้อยน้อยกว่า ส่งผลให้มีค่าความแข็งที่ดีตามไปด้วย

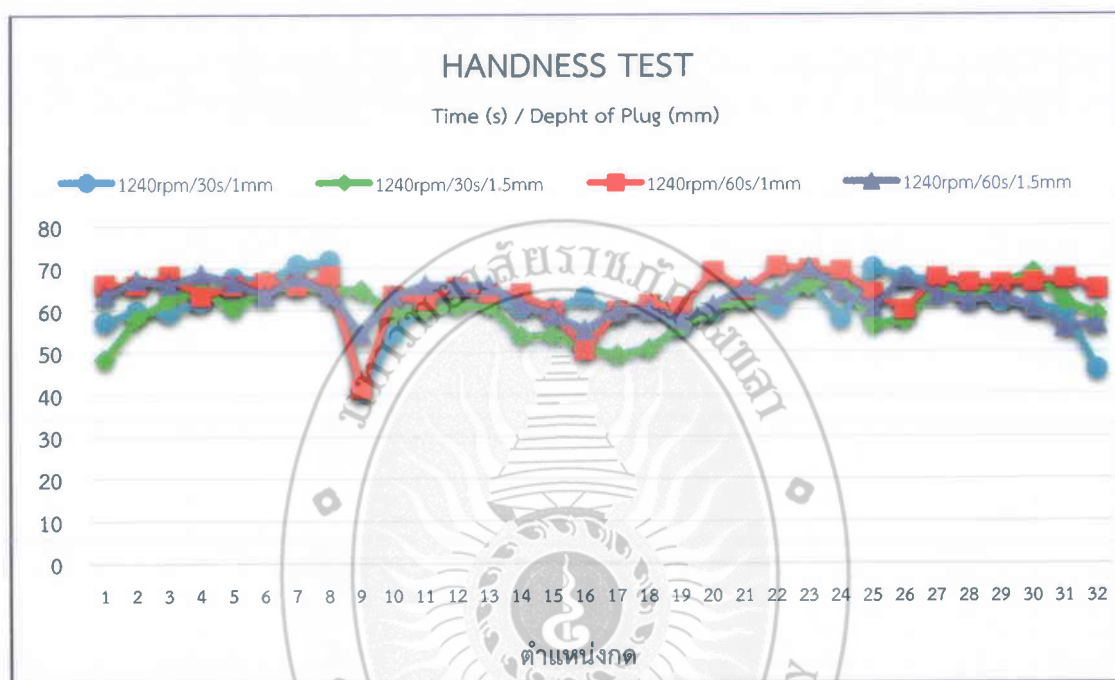


รูปที่ 4.17 แสดงค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกด 30 และ 60 วินาที

4.3.2 ทดสอบความแข็งของบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที

การเพิ่มความเร็วรอบในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดส่งผลให้เกิดความร้อนในขณะเชื่อมที่สูงตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเชื่อมที่ความเร็ว 380 รอบ/นาที จะเห็นว่าที่ความเร็วในการเชื่อมที่ 1240 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิมที่ได้จากการตรวจสอบ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 41.33 HV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมของเนื้อวัสดุที่ความเร็วเชื่อม 380 รอบ/นาที แต่บริเวณเนื้อเชื่อมกลับพบว่ามีความแข็งที่สูงกว่า โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 61.81 HV ซึ่งเป็นค่าความแข็งสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่นๆ ในรอยเชื่อม และที่บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนประกอบทั้งด้าน Retreating side และ Advancing side มีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแข็งที่ได้

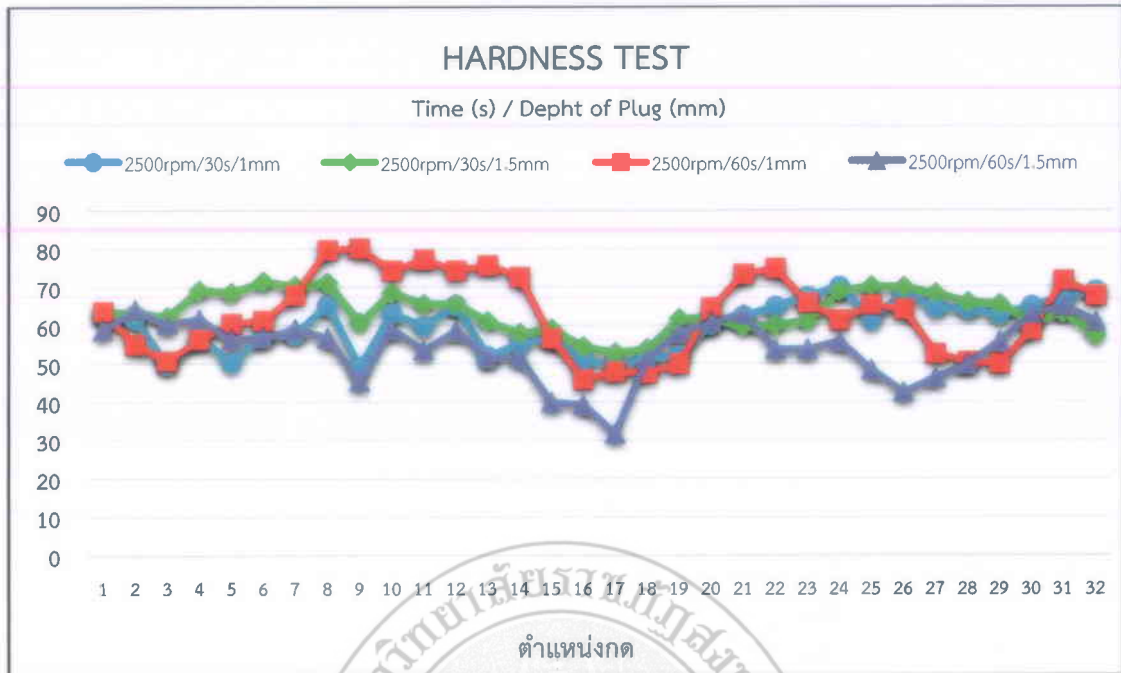
จากการตรวจสอบ มีค่าเฉลี่ยที่ 59.47 HV ซึ่งมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน เป็นบริเวณที่ได้รับการเปลี่ยนแปลงของความร้อน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อม สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 34.34 เปอร์เซ็นต์ ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนมีค่าสูงกว่าเนื้อโลหะ เดิม คิดเป็น 31.04 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มระยะกดลึกและเวลาในการเชื่อมมีแนวโน้มที่ทำให้ค่าความ แข็งเพิ่มขึ้น เพราะนำไปสู่การเกิดการเรียงตัวของเฟสยูเทคติกใหม่หลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบจุด



รูปที่ 4.18 แสดงค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที

4.3.3 ทดสอบความแข็งของบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที

รูปที่ 4.19 แสดงกราฟผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ตัวแปรความเร็วรอบ 2500 รอบ/ นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิมเฉลี่ยมีค่า 40.87 HV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน กับเนื้อโลหะเดิมในทุกๆ การทดลอง และบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งสูงกว่าเนื้อโลหะเดิมและบริเวณที่ ได้รับอิทธิพลจากความร้อน มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 60.66 HV คิดเป็น 33.10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ ความแข็งเดิมของเนื้อโลหะ อย่างไรก็ตามบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนมีค่าความแข็งเฉลี่ย อยู่ที่ 58.25 HV เมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งเดิมของเนื้อโลหะ คิดเป็น 32.12 เปอร์เซ็นต์ เป็นที่น่าสังเกตว่าที่ ความเร็วรอบสูงมีแนวโน้มที่ทำให้ค่าความแข็งลดลง เพราะการหมุนด้วยความเร็วที่สูงจะเกิดการสูญเสียความ ร้อนบางส่วนในระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Mukuna P, 2014) ซึ่งความแข็งของชิ้นงานเชื่อมจะ ขึ้นอยู่กับความร้อนและการกระจายตัวของเฟสยูเทคติก



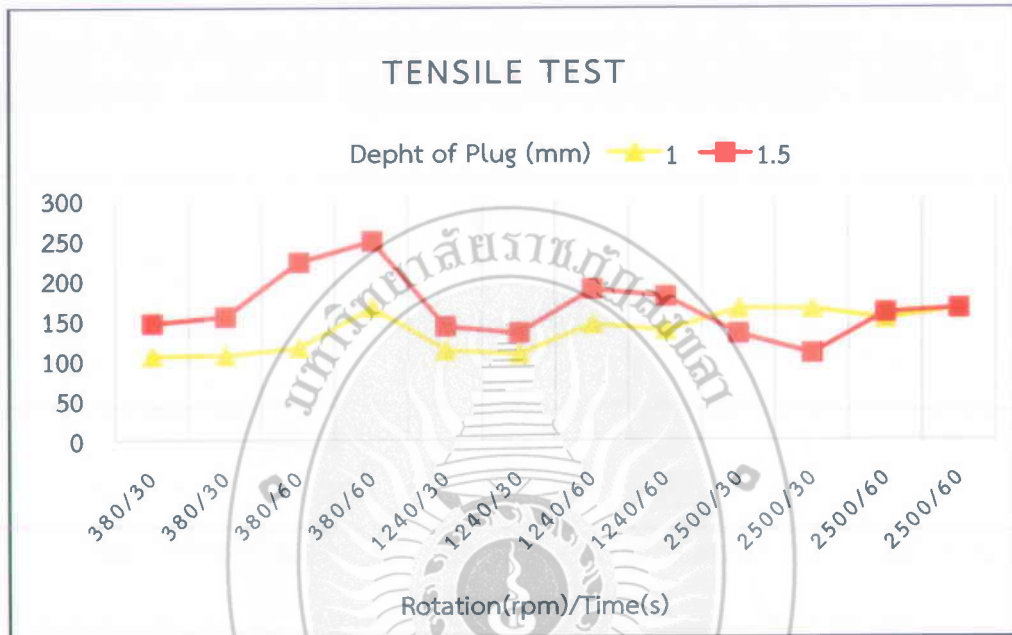
รูปที่ 4.19 แสดงค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ระยะกวดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกวดแช่ 30 และ 60 วินาที

จากการทดสอบความแข็งที่ความเร็วรอบ 380, 1240 และ 2500 รอบ/นาที ระยะกวดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกวดแช่ 30 และ 60 วินาที สรุปได้ว่าบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งมากกว่าเนื้อโลหะเดิม ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ ระยะกวดลึกและเวลาในการกวดแช่ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง การเพิ่มเวลาในการกวดแช่มีแนวโน้มทำให้ค่าความแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น เพราะความร้อนทำให้เกรนมีขนาดที่เล็กลงเมื่อเทียบกับเกรนก่อนกลมเดิมของวัสดุ

4.4 การทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือน

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ ระยะกวดลึก และเวลาในการกวดแช่ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เมื่อทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือนในแต่ละปัจจัย จะเห็นได้ว่าผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 380, 1240 และ 2500 รอบ/นาที ระยะกวดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตร และระยะเวลาในการกวดแช่ 30 และ 60 วินาที มีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลมาจากความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมและลักษณะโครงสร้างจุลภาค จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึงเฉือนที่ตัวแปรความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ระยะกวดลึก 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกวดแช่ 60 วินาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยสูงที่สุด อยู่ที่ 233.48 MPa เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวมีความสมบูรณ์ของเนื้อเชื่อม บริเวณรอยเชื่อมไม่พบจุดบกพร่องหลังการเชื่อม และลักษณะโครงสร้างจุลภาคมีเกรนที่ละเอียดกระจายสม่ำเสมอเนื้อเชื่อม นำไปสู่ความแข็งแรงที่ดีของชิ้นงาน ในทางตรงกันข้ามความแข็งแรงดึงเฉือนที่ตัวแปรความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ระยะกวดลึก 1 มิลลิเมตร และเวลาในการกวดแช่ 30 วินาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยต่ำที่สุด อยู่ที่ 97.46 MPa อย่างไรก็ตามที่ความเร็วรอบในการเชื่อม

ที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที มีผลการทดสอบแรงดึงเดือนที่ดีกว่าที่ความเร็วรอบ 1240 และ 2500 รอบ/นาที เพราะรอบในการกวนที่ช้าสามารถลากเนื้อวัสดุให้กวนเข้ากันได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามรอบในการกวนที่สูง ทำให้เนื้อวัสดุเกิดการไหลตัวที่ไม่ดี อีกสาเหตุที่เกิดขึ้นมาจากการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1240 และ 2500 รอบ/นาที จะพบตะเข็บช่องว่างหลังการเชื่อมที่มาก จะเห็นได้ว่าตัวแปรในการเชื่อมที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเดือนที่แตกต่างกันด้วยเช่นกัน ดังนั้นการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 จึงเป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญเช่นกัน



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงเดือนที่ความเร็วรอบ 380, 1240 และ 2500 รอบ/นาที ระยะกดลึก 1 และ 1.5 มิลลิเมตรและเวลาในการกดแช่ 30 และ 60 วินาที

4.5 การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงเดือนด้วยวิธีการทางสถิติ

ในสมมุติฐานการทดลองจะทำการพิจารณาที่ผลกระทบทหลัก (Main effects) และผลกระทบ (Interaction) ที่ 2 ปัจจัย ดังต่อไปนี้

พิจารณา Main Effect

- ทดสอบสมมุติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบของเครื่องมือ

τ_1, τ_2, τ_3 คือ ความเร็วรอบของกรรมวิธีเสียดทานแบบจุด

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2 \neq \tau_3 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบแตกต่างกัน

- ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของระยะเวลาการกดแช่

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ คือ ระยะเวลาการกดแช่

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของระยะเวลาการกดแช่ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของระยะเวลาการกดแช่แตกต่างกัน

- ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของปัจจัยระยะกดลึก

λ_1, λ_2 คือ ระยะกดลึก

$H_0 : \lambda_1 = \lambda_2 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของระยะกดลึกที่ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \lambda_1 \neq \lambda_2 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของระยะกดลึกที่แตกต่างกัน

พิจารณา 2 Factor Interaction Effect

- ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและเวลาในการกดแช่

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2$)

$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2$)

- ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและระยะกดลึก

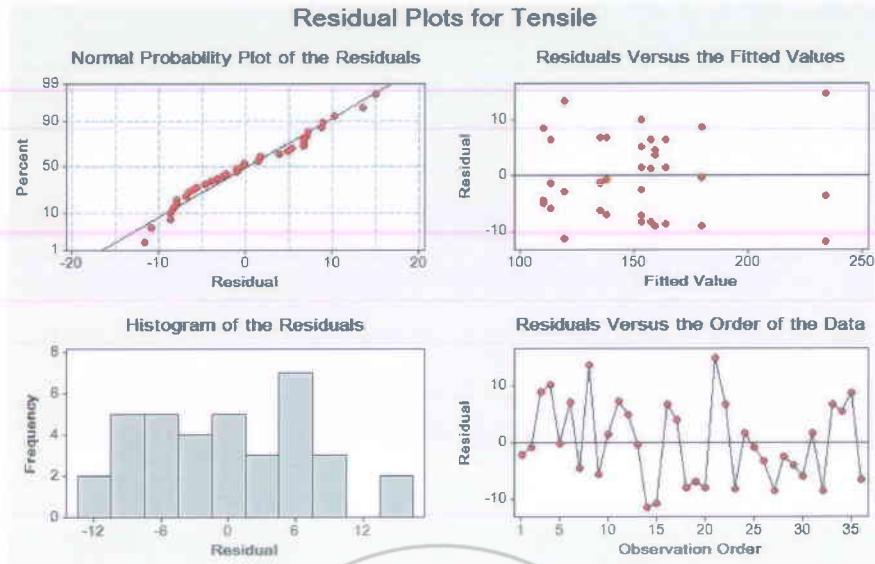
$H_0 : (\tau\lambda)_{ij} = 0$ ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2$)

$H_1 : (\tau\lambda)_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2$)

4.5.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม เป็นเส้นตรง และการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ในลักษณะใด เพื่อให้มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลองอยู่ภายใต้สภาวะการควบคุมโดยพิจารณา ดังนี้

พิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล โดยดูจากกราฟ Rresidual versus the order of the data จากรูปที่ 4.9 เพื่อพิจารณาว่าข้อมูลมีลักษณะสุ่มอยู่ภายใต้พิสัยควบคุมหรือไม่จากลักษณะของจุดที่ควรให้ความสำคัญ จากรูปที่ 4.21 ดังกล่าวไม่พบความผิดปกติของเส้นกราฟ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม



รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง

พิจารณากระจายตัวว่าข้อมูลเป็นแบบการกระจายตัวแบบปกติ เนื่องจากข้อมูลมีมากกว่า 30 ตัว จึงพิจารณาจาก Histogram of the residuals ดังรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะใกล้เคียงการกระจายตัวแบบ Normal distribution จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติพิจารณาข้อมูลรอบค่าศูนย์ ลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกันมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์จาก (Model Adequacy Checking) ดังรูปที่ 4.21 ลักษณะข้อมูล Residuals versus the fitted values ที่ได้มีบางค่าที่กระจายตัวออกห่างจากจุดศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอทำให้ไม่มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลอง มีการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน จากรูปที่ 4.22 แสดงช่วงความเชื่อมั่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของรอยเชื่อมจากปัจจัยต่างๆ เหลื่อมกัน แสดงว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองทั้ง 12 ครั้ง ไม่มีความแตกต่างกันซึ่งสามารถทดสอบได้ดังนี้

ทดสอบความแตกต่างกันของความแปรปรวน จากสมมติฐาน

$$\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_4^2, \sigma_5^2, \sigma_6^2, \sigma_7^2, \sigma_8^2, \sigma_9^2, \sigma_{10}^2, \sigma_{11}^2, \sigma_{12}^2 \text{ คือ ค่าความแปรปรวนของแต่ละ}$$

การทดลอง

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2 = \sigma_6^2 = \sigma_7^2 = \sigma_8^2 = \sigma_9^2 = \sigma_{10}^2 = \sigma_{11}^2 = \sigma_{12}^2$$

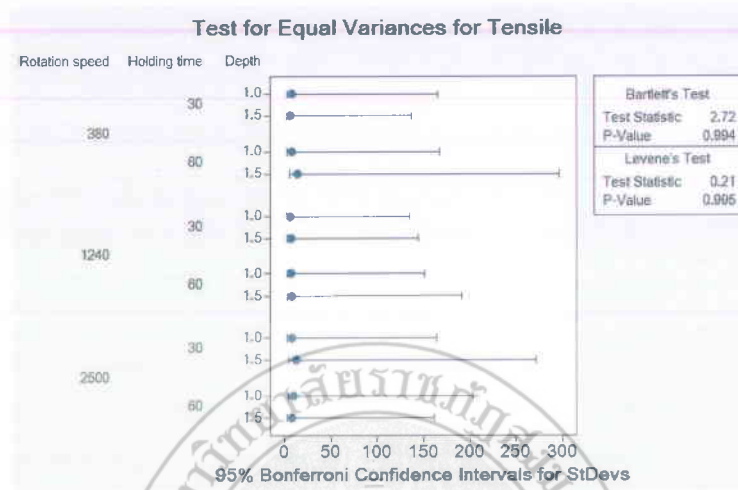
ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 เท่ากัน

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \sigma_4^2 \neq \sigma_5^2 \neq \sigma_6^2 \neq \sigma_7^2 \neq \sigma_8^2 \neq \sigma_9^2 \neq \sigma_{10}^2 \neq \sigma_{11}^2 \neq \sigma_{12}^2$$

ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 ไม่เท่ากัน

ทดสอบสมมติฐาน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

จาก Bartlett's Test ผลการคำนวณที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ยอมรับ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.746 ซึ่งมีความมากกว่าเมื่อเทียบกับค่า $\alpha = 0.05$ จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 12 ครั้ง มีค่าเท่ากัน หรือมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.22 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าความแข็งแรงดึงเส้นตามปัจจัยต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 95.42% หมายความว่า ความผันแปรต่างๆ ของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์หรือปัจจัยต่างๆ ที่กำหนดให้คงที่ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 95.42% ส่วนที่เหลือประมาณ 4.58% เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) ดังนั้นการออกแบบการทดลองครั้งนี้ ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.1 ANOVA ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบ ระยะกดลึก และเวลาในการกดแช่

Analysis of Variance for Tensile, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation speed	2	3677.5	3677.5	1838.7	24.60	0.000
Holding time	1	13893.3	13893.3	13893.3	185.91	0.000
Depth	1	4956.6	4956.6	4956.6	66.33	0.000
Rotation speed*Holding time	2	4006.6	4006.6	2003.3	26.81	0.000
Rotation speed*Depth	2	8550.3	8550.3	4275.2	57.21	0.000
Holding time*Depth	1	2065.4	2065.4	2065.4	27.64	0.000
Rotation speed*Holding time*Depth	2	230.2	230.2	115.1	1.54	0.235
Error	24	1793.6	1793.6	74.7		
Total	35	39173.5				

S = 8.64478 R-Sq = 95.42% R-Sq(adj) = 93.32%

4.5.2 ทดสอบสมมติฐานของการทดลอง

ในการทดสอบสมมติฐานในการทดลองจะทำการพิจารณาที่ผลกระทบหลัก (Main effects) และผลกระทบ (interaction) ที่ 3 ปัจจัย ดังต่อไปนี้

พิจารณา Main Effect

- ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบของเครื่องมือ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0 \text{ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบไม่แตกต่างกัน}$$

$$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2 \neq \tau_3 \neq 0 \text{ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบแตกต่างกัน}$$

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบ มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

- ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของระยะเวลาการกดแช่

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0 \text{ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของระยะเวลาการกดแช่ไม่แตกต่างกัน}$$

$$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq 0 \text{ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของระยะเวลาการกดแช่แตกต่างกัน}$$

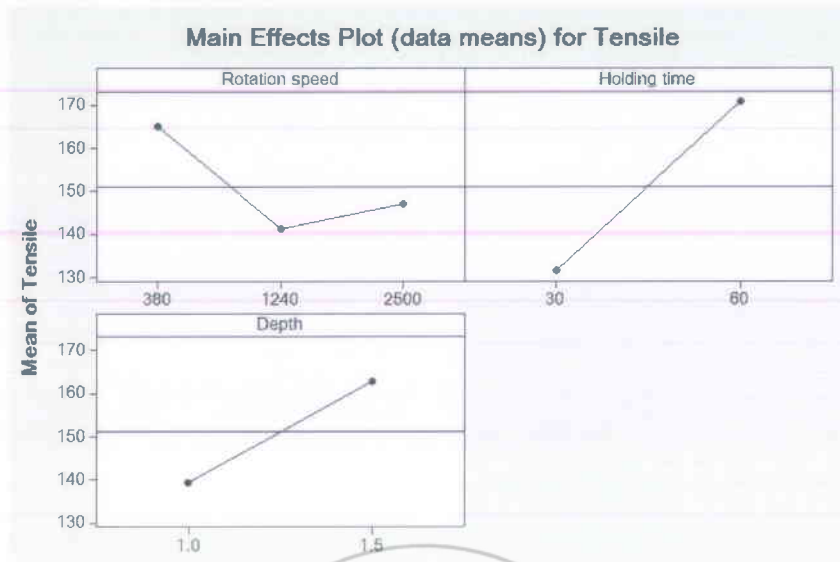
- ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของปัจจัยระยะกดลึก

$$H_0 : \lambda_1 = \lambda_2 = 0 \text{ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของระยะกดลึกที่ไม่แตกต่างกัน}$$

$$H_1 : \lambda_1 \neq \lambda_2 \neq 0 \text{ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของระยะกดลึกที่แตกต่างกัน}$$

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยระยะกดลึกและเวลาการกดแช่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ความเร็วรอบ ระยะกดลึก และเวลาในการกดแช่เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือน พบว่าการเพิ่มขึ้นของระยะกดลึก จาก 1 มิลลิเมตร เพิ่มเป็น 1.5 มิลลิเมตร และเพิ่มเวลาในการกดแช่ จาก 30 วินาที เพิ่มเป็น 60 วินาที ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยของแต่ละระยะกดลึกและเวลาการกดแช่นั้นเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มความเร็วยรอบ พบว่าความเร็วที่ 380 รอบ/นาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนเฉลี่ยสูงสุด ส่วนความเร็วรอบที่ 1240 รอบ/นาที นั้นมีค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงเฉือนน้อยลงมา และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบเป็น 2500 รอบ/นาที แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงเดือนกับความเร็วรอบ ระยะกดลึกและเวลาการกดแช่

พิจารณา 2 Factor Interaction Effect

- ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและเวลาในการกดแช่

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ ทุกระดับ } i, j \text{ ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา } (i = 1,2,3; j = 1,2)$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ มีบาง } i, j \text{ มีอิทธิพลของอันตรกิริยา } (i = 1,2,3; j = 1,2)$$

พิจารณา 2 Factor Interaction Effect

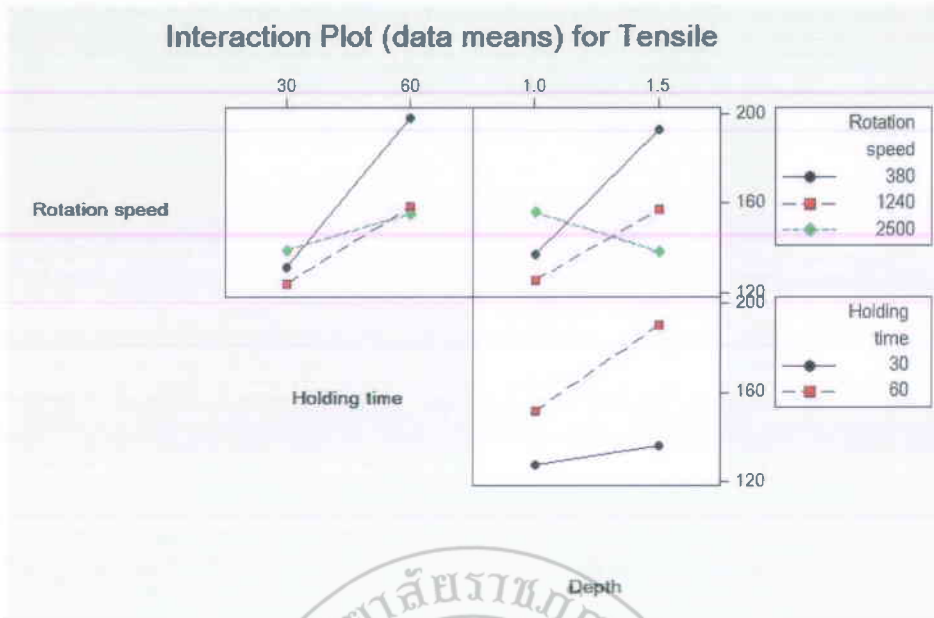
- ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและระยะกดลึก

$$H_0 : (\tau\lambda)_{ij} = 0 \text{ ทุกระดับ } i, j \text{ ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา } (i = 1,2,3; j = 1,2)$$

$$H_1 : (\tau\lambda)_{ij} \neq 0 \text{ มีบาง } i, j \text{ มีอิทธิพลของอันตรกิริยา } (i = 1,2,3; j = 1,2)$$

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอันตรกิริยาด้วย ANOVA พบว่า ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่ามีอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วดิ้นกวนมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเดือน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

รูปที่ 4.24 กราฟแสดง Interaction ระหว่างอิทธิพลของระยะกดลึก เวลาในการกดแช่ และความเร็วรอบ พบว่าที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงดึงเดือนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของระยะกดลึกจาก 1 มิลลิเมตร เป็น 1.5 มิลลิเมตร และเวลาการกดแช่ จาก 30 วินาที เป็น 60 วินาที โดยพบว่าค่าความแข็งแรงดึงเดือนเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร และเวลาการกดแช่ 60 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 อันตรกิริยาระหว่างค่าความแข็งแรงตึงเนื้อกับความเร็วยอบ ระยะกดลึก และเวลาการกดแข็ง



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การทดลองเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 ในงานวิจัยนี้ ผลการทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบความแข็ง และการทดสอบความแรงดึงเฉือน และการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา สามารถสรุปได้ว่า

5.1 สรุปผล

(1) ตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 356 พบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อม คือ ที่ความเร็วรอบ 380 รอบ/นาที ที่ระยะกดลึก 1.5 มิลลิเมตร และเวลาในการกดแช่ 60 วินาที โดยให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 233.48 MPa

(2) การทดสอบความแข็งชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบจุดพบว่า ที่ความเร็วรอบ 1240 รอบ/นาที ที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร และเวลาในการกดแช่ 60 วินาที มีค่าความแข็งที่มากที่สุด คือ 61.81 HV ซึ่งเพิ่มขึ้น 34.34 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม

(3) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าความแข็งแรงดึงเฉือนตามปัจจัยต่างๆ สำหรับการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 95.42 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์หรือปัจจัยต่างๆ ที่กำหนดให้คงที่ในการทดลอง ส่วนที่เหลือประมาณ 4.58 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นการออกแบบการทดลองครั้งนี้ ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ควรนำหลักการในการเชื่อมเสียดทานแบบจุดไปพัฒนาหรือประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

(2) ควรนำโลหะหรือวัสดุที่มีรูปทรงต่างกันมาทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุด เพื่อให้ได้รูปแบบชิ้นงานที่หลากหลาย

(3) ควรนำวัสดุที่ต่างชนิดกันหรือวัสดุกลุ่มมีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน มาศึกษาทดลองเชื่อมโดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

บรรณานุกรม

- กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ (2554) การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดของรอยต่อเกยอะลูมิเนียมผสมเกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- เจนณรงค์ นาคเทวัญ (2555) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 7075 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ธงชัย เครือเผื่อ (2552) การเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356 ด้วยการเสียดทานแบบกวน ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ประกาศ เมืองจันทร์บุรี (2550) อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะและสมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ซึ่งหล่อโดยเทคโนโลยีการหล่อกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
- มุหามัด เต๊ะยอ (2554) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 กับอะลูมิเนียมผสม AA6061-T651 โดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติสาขาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- วรพงศ์ บุญช่วยแทน (2554) การตรวจหารอยบกพร่องในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 หล่อกิ่งของแข็งโดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- วรพงศ์ บุญช่วยแทน ธเนศ รัตนวิไล ประกาศ เมืองจันทร์บุรี และกนิษฐ์ ตะปะสา (2554) การเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 356 โดยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสภาพของกระบวนการทางความร้อน T6 บทความวิจัย วิศวกรรมสาร มข ปีที่ 38 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2554
- ศุภชัย ชัยณรงค์ (2554) การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งโดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- อดิศร เป็เลียนดิษฐ์ และกิตติพงษ์ กิมะพงษ์ (2554) อิทธิพลระยะลึกและรูปทรงบ่าของเครื่องมือเชื่อมต่อความแข็งแรงของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอะลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- Mukuna P. (2014) "Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Materials: An Overview".
- R.S. Mishra, Z.Y. Ma, (2005) " Friction Stir Welding and Processing." Journal of Material Science and Engineering. Vol. 50.
- X. W. Yang, T. Fu, and W. Y. Li1, (2014) "Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macroand Microstructure, Property, and Process Modelling" Advances in Materials Science and Engineering. pp. 1–11.
- Z. Shen, X. Yang, Z. Zhang, L. Cui, and T. Li, (2013) "Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints," Materials and Design, vol. 44, pp. 476–486.
- T. Long, W. Tang, A.P. Reynolds, (2007) "Process response parameter relationships in Al alloy friction stir welds". Sci. Technol. Weld. Join. 12, 311–317.

- M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling, W.H. Bingel, (1998) "Properties of friction stir-welded 7075 T651 aluminum". Metall. Mater. Trans. A 29, 1955–1964.
- K. Masaki, Y.S. Sato, M. Maeda, H. Kokawa, (2008) "Experimental estimation of strain rate during FSW of Al-alloy using plain strain compression". Mater. Sci. Forum 580–582, 299–302.
- K. Masaki, Y.S. Sato, M. Maeda, H. Kokawa, (2008) "Experimental simulation of recrystallized microstructure in friction stir welded Al alloy using a plain-strain compression test". Scripta Mater. 58, 355–360.
- R.S. Mishra, (2008) "Preface to the Viewpoint Set on friction stir processing". Scripta Mater. 58, 325–326.



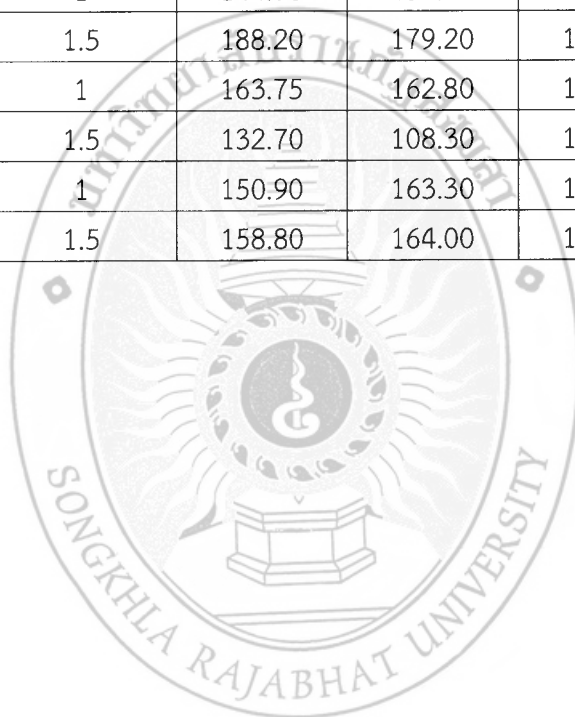


ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบแรงดึง

ตารางผนวก ก ผลการทดสอบแรงดึงเดือนของชิ้นงานเชื่อม

Rotation (RPM)	Time (s)	Depth of plug (mm)	Sample 1 (MPa)	Sample 2 (MPa)	Sample 3 (MPa)	ค่าเฉลี่ย
380	30	1	105.20	105.90	118.60	109.90
		1.5	146.00	154.50	158.25	152.91
	60	1	155.40	165.40	170.40	163.73
		1.5	221.90	248.40	230.15	233.48
1240	30	1	112.10	107.50	119.80	113.13
		1.5	141.90	133.80	128.85	134.85
	60	1	144.70	137.10	130.90	137.56
		1.5	188.20	179.20	170.70	179.36
2500	30	1	163.75	162.80	150.28	158.94
		1.5	132.70	108.30	116.50	119.16
	60	1	150.90	163.30	145.10	153.10
		1.5	158.80	164.00	149.40	157.40





ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางผนวก ข ผลการทดสอบความแข็ง

Rotation Speed	380				1240				2500			
	30		60		30		60		30		60	
Depth of plug	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5	1	1.5
1	38.9	51.1	64.9	55.9	57.1	48.2	66.1	63.4	63.1	63.2	63.6	58.8
2	46.1	53.2	62.2	57.2	59.8	58.0	65.9	67.2	61.7	63.3	55.0	64.0
3	47.0	53.4	55.1	47.6	59.5	62.4	68.2	66.1	49.8	62.1	50.7	60.3
4	45.3	55.2	42.0	56.3	61.9	65.0	63.2	68.6	56.8	69.1	56.4	61.6
5	46.6	54.0	61.8	52.6	67.6	60.4	65.8	66.6	50.3	68.5	60.5	56.3
6	56.7	55.1	58.2	45.7	67.0	64.9	66.6	63.4	57.4	71.4	61.3	56.8
7	49.0	54.8	51.6	50.7	70.8	65.7	65.8	68.0	57.6	70.2	68.0	59.0
8	49.7	55.2	54.4	51.2	71.1	64.9	68.1	63.8	65.3	71.1	79.7	56.7
9	49.6	50.1	52.6	45.3	40.5	64.6	41.2	54.2	49.0	60.6	80.1	45.3
10	52.0	58.2	50.0	43.5	54.2	59.2	63.4	63.3	63.1	68.4	74.3	59.0
11	57.3	53.6	55.8	53.9	61.3	59.8	62.2	65.9	59.7	65.5	77.2	53.4
12	55.8	57.3	51.2	62.5	65.5	60.8	65.4	65.6	65.2	65.5	74.3	58.5
13	53.3	53.9	44.4	69.4	63.0	61.0	63.9	65.8	51.8	60.1	75.7	51.5
14	58.4	58.3	45.3	67.5	60.3	53.6	63.8	61.3	55.1	57.8	72.6	51.5
15	40.4	56.5	-	62.7	60.3	54.0	59.7	58.6	56.7	58.9	56.6	39.8
16	33.1	47.7	-	52.6	62.9	50.9	50.4	55.2	50.8	54.3	45.8	39.2
17	49.4	48.8	-	54.1	59.3	49.1	59.6	59.8	49.6	52.7	47.8	31.6
18	49.7	47.4	-	64.2	60.7	50.6	61.2	59.9	51.4	53.7	47.5	51.5
19	57.6	57.9	42.4	58.9	55.8	56.0	60.6	57.5	52.2	61.5	49.9	58.0
20	56.0	59.1	54.9	65.9	59.5	59.7	69.1	60.9	60.2	61.9	64.5	60.8
21	54.3	56.3	57.7	72.9	62.4	62.2	64.5	65.2	62.3	59.5	73.3	62.7
22	56.2	55.9	59.9	66.9	60.5	63.7	70.3	63.3	64.8	59.9	74.8	53.6
23	51.6	58.4	61.0	62.3	66.2	65.4	69.6	69.8	67.4	61.0	65.7	53.6
24	50	54.9	42.2	55.3	57.7	67.6	69.2	64.3	70.0	68.8	61.3	55.7
25	50.6	55.1	53.3	52.8	69.9	56.3	63.8	60.4	61.2	70.1	65.2	48.2
26	55.6	52.3	55.9	48.8	67.5	57.3	59.8	67.6	68.3	69.8	64.0	42.4
27	47.3	51.2	54.8	51.5	66.5	65.6	67.5	63.4	64.4	68.1	52.5	46.2
28	40.7	52.8	55.6	50.3	63.4	63.1	66.3	62.0	64.0	65.9	50.4	49.8
29	52.2	54.2	53.4	51.3	61.7	66.1	66.2	63.0	62.5	65.3	49.8	55.7
30	53.7	50.6	54.6	52.4	60.9	68.7	66.5	60.4	64.9	60.7	58.7	62.9
31	54	52.3	55.5	52.1	59.4	61.6	67.3	55.7	66.9	63.1	71.6	64.8
32	51.6	53.2	57.8	50.1	45.7	58.6	64.9	56.4	68.9	57.0	67.6	60.8
ค่าเฉลี่ย	50.3	54.0	53.9	55.8	61.2	60.2	63.9	62.7	59.8	63.4	63.0	54.1

หมายเหตุ: บริเวณกึ่งกลางเนื้อเชื่อมที่ 15-18 ที่ตัวแปรความเร็วรอบ 380 รอบต่อนาที เวลาทดสอบ 60 วินาที และระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร ไม่สามารถวัดค่าความแข็งได้ เนื่องจากเกิดการขาดของชิ้นงานเชื่อมที่ปลายหัวพิน

ประวัติผู้ทำวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ นายชัยยุทธ มिंगาม
เลขที่บัตรประจำตัวประชาชน (13 หลัก) 19099 00044 231
วัน/เดือน/ปีเกิด 12 มกราคม 2528
วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ป.โท) สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม สังกัด โปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์
ตำแหน่ง พนักงานมหาวิทยาลัย
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ 110/5 หมู่ที่ 10 ต. น้ำน้อย อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90110
โทรศัพท์ 083-1715652 E-mail Chaiyoot_thailand@hotmail.co.th

ประสบการณ์ในงานวิจัย

ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

ศิวะ สิทธิพงศ์, ชัยยุทธ มिंगาม และประภาศ เมืองจันทร์บุรี “การเปรียบเทียบกรรมวิธีการเชื่อมซ่อมเพื่อยืดอายุการใช้งานของเพลาสวิง” วารสารการเชื่อมไทย ฉบับที่ 54 มกราคม-เมษายน 2554, 11-18.

เดช เหมือนขาว ยงยุทธ ดุลยกุล และชัยยุทธ มिंगาม “โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของทองเหลืองโดยกระบวนการเชื่อมแพร่” วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, ครั้งที่ 5, 499-509.

Chaiyoot Meengam, Muhamad Tehyo, Prapas Muangjunburee and Jessada Wannasin “Dissimilar Materials Joining between SSM356-T6 and AA6061-T651 by Friction Stir Welding” Applied Mechanics and Materials Vol. 372, pp 478-485.

Chaiyoot Meengam, Prapas Muangjunburee, Suppachai Chainarong “Investigation on Mechanical Properties and Microstructure of SSM 356-T6 Aluminium Alloy by Diffusion Bonding” Advanced Materials Research Vols. 881-883, pp 1301-1306.

Kulyuth Boonseng, **Chaiyoot Meengam**, Suppachai Chainarong, and Prapas Muangjunburee “Microstructure and Hardness of Friction Welded SSM 356 Aluminium Alloy” Advanced Materials Research Vols. 887-888, pp 1273-1279.

Chaiyoot Meengam, Prapas Muangjunburee, Jessada Wannasin “Diffusion Bonding of Semi-Solid (SSM 356) Cast Aluminum Alloy” International Journal of Modern Engineering Research (IJMER) Vols.4 (5), pp 5-11.

Suppachai Chainarong, Prapas Muangjunburee and **Chaiyoot Meengam** “Friction Welding of SSM356 with SSM7075 Aluminium Alloys” Australian Journal of Basic and Applied Sciences Vols.8 (15), pp 277-284.

Suppachai Chainarong, **Chaiyoot Meengam** and Kulyuth Boonseng “Effect of Friction Welding on tensile strength of Polymethyl Methacrylate (PMMA) by Computerized Numerical Control Machine” วารสารวิจัย มข. ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มกราคม – มีนาคม 2558. (ตอบรับการลงตีพิมพ์)

ตีพิมพ์ในรายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการ

ชัยยุทธ มिंगาม และประภาศ เมืองจันทร์บุรี (2555) “การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งโดยการแพร่” การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5 จัดโดยภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ร่วมกับสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (ISIT) และศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น ระหว่างวันที่ 19-20 มกราคม 2555

เดช เหมือนขาว ยงยุทธ ดุลยกุล และ**ชัยยุทธ มिंगาม** (2556) “การศึกษาและออกแบบการผลิตน้ำมันดิบจากขยะพลาสติก” การประชุมวิชาการ การพัฒนาชนบทที่ยั่งยืน 2556 ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 9-10 พฤษภาคม 2556.

กุลยุทธ บุญแข็ง สมศักดิ์ แก้วพลอย ศุภชัย ชัยณรงค์ และ**ชัยยุทธ มिंगาม** (2556) “ผลของความขรุขระจากการกลิ้งปกผิวเหล็ก AISI 1045 ด้วยเครื่องกลิ้งอัตโนมัติ” การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ ประจำปี 2556. 11-14 กันยายน 2556. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ร่วมกับ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

กุลยุทธ บุญแข็ง สมศักดิ์ แก้วพลอย ศุภชัย ชัยณรงค์ และ**ชัยยุทธ มिंगาม** (2556) “อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อความขรุขระของการกลิ้งปาดผิวหน้า เหล็ก AISI 1045 ด้วยเครื่องกลิ้งอัตโนมัติ” การประชุมวิชาการ “นเรศวรวิจัย” ครั้งที่ 9: ความรู้สู่เชิงพาณิชย์ นำเศรษฐกิจไทยก้าวไกลอาเซียน และเทมา-งามวิจัย ครั้งที่ 1: เทมา-งามวิจัย นำโลจิสติกส์ไทยสู่อาเซียน. 28-29 กรกฎาคม 2556. มหาวิทยาลัยนเรศวร

กุลยุทธ บุญแข็ง ผจงจิต พิจิตบรรจง ศุภชัย ชัยณรงค์ และ**ชัยยุทธ มिंगาม** (2556) “ปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตน้ำตาลโตนด กรณีศึกษา กลุ่มแม่บ้านคลองฉนวน ต.ชุมพล อ.สทิงพระ จ.สงขลา” การประชุมวิชาการ “นเรศวรวิจัย” ครั้งที่ 9: ความรู้สู่เชิงพาณิชย์ นำเศรษฐกิจไทยก้าวไกลอาเซียน และเทมา-งามวิจัย ครั้งที่ 1: เทมา-งามวิจัย นำโลจิสติกส์ไทยสู่อาเซียน. 28-29 กรกฎาคม 2556. มหาวิทยาลัยนเรศวร

ศุภชัย ชัยณรงค์ กุลยุทธ บุญแข็ง **ชัยยุทธ มिंगาม** และประภาศ เมืองจันทร์บุรี (2556) “การเชื่อมเสียดทานของอะคริลิกโดยใช้เครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติ” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556, 16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา จังหวัดชลบุรี

ยงยุทธ ดุลยกุล ซูไฮดี สนิ เดช เหมือนขาว และ**ชัยยุทธ มिंगาม** (2556) “ศึกษาพฤติกรรมการทางกลของรอยต่ออะลูมิเนียมจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสปีนนิ่ง” การประชุมวิชาการทางโลหะวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชูไฮดี สนิ ยงยุทธ ดุลยกุล **ชัยยุทธ มีงาม** (2557) “การศึกษาวิจัยของดรอร์ปิดที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมของวัสดุอะลูมิเนียมเกรด AL-1100” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2557, 30-31 ตุลาคม 2557 สุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ

เดช เหมือนขาว ยงยุทธ ดุลยกุล **ชัยยุทธ มีงาม** “การอัดรีดพลาสติกกรีไซเคิลระหว่างโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงและโพลีเอทิลีนเทอร์พทาเลต” การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2557, 30-31 ตุลาคม 2557 สุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ

CHAIYOOT MEENGAM, SUPPACHAI CHAINARONG and KULYUTH BOONSENG “Joining of Semi Solid Metal 7075 Aluminum Alloys with Friction Welding” International Symposium on Hybrid Materials and Processing, (HyMaP 2014) 10-13 November, Busan, Korea, 2014.

Y.DUNYAKUL, **C.MEENGAM**, D.MAUNKHAW and S.CHAINARONG “Effect of Diffusion Bonding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar SSM7075 with SSM356 Aluminum Alloy Joints” International Symposium on Hybrid Materials and Processing, (HyMaP 2014) 10-13 November, Busan, Korea, 2014.

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ นายศุภชัย ชัยณรงค์
 เลขที่บัตรประจำตัวประชาชน (13 หลัก) 19098 00063 170
 วัน/เดือน/ปีเกิด 27 ธันวาคม 2527
 วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ป.โท) สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ
 คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม สังกัด โปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์
 ตำแหน่ง พนักงานมหาวิทยาลัย
 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ 733 ถ. เพชรเกษม ต. หาดใหญ่ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90110
 โทรศัพท์ 089-6595906 E-mail c_suppachai@hotmail.com

ประสบการณ์ในงานวิจัย

ศุภชัย ชัยณรงค์ เสกสรร สุธรรมานนท์ และประภาศ เมืองจันทร์บุรี “การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งโดยกรรมวิธีเสียดทานแบบกวน” การประชุมช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม 13-15 ตุลาคม 2553. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (IE Network 2010)

กุลยุทธ บุญแข็ง ผจญจิต พิจิตบรรจง และ**ศุภชัย ชัยณรงค์** “แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานสำหรับกลุ่มรับซื้อน้ำยาง กรณีศึกษา กลุ่มรับซื้อน้ำยาง ต.สะทอน อ.นาทวี จ.สงขลา” นวัตกรรมวิจัย ครั้งที่ 8 นวัตกรรมความรู้สู่ประชาคมอาเซียน. 28-29 กรกฎาคม 2555. มหาวิทยาลัยนเรศวร

กฤษณกร บุญเช่ง ผจงจิต พิจิตบรรจง และศุภชัย ชัยณรงค์ “การพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้านเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ กรณีศึกษา เครื่องตีมันรกแท้ กลุ่มแม่บ้านเพ็ญอาด อ.ปากพะยูน จ.พัทลุง” การสัมมนาวิชาการประจำปี 2555: Eco Innovation and Solution 2012. 17-18 ตุลาคม 2555. สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Chaiyoot Meengam, Prapas Muangjunburee, **Suppachai Chainarong** “Investigation on Mechanical Properties and Microstructure of SSM 356-T6 Aluminium Alloy by Diffusion Bonding” *Advanced Materials Research* Vols. 881-883, pp 1301-1306.

Kulyuth Boonseng, Chaiyoot Meengam, **Suppachai Chainarong**, and Prapas Muangjunburee “Microstructure and Hardness of Friction Welded SSM 356 Aluminium Alloy” *Advanced Materials Research* (2014).

Suppachai Chainarong, Prapas Muangjunburee and Chaiyoot Meengam “Friction Welding of SSM356 with SSM7075 Aluminium Alloys” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* Vols.8 (15), pp 277-284.

Suppachai Chainarong, Chaiyoot Meengam and Kulyuth Boonseng “Effect of Friction Welding on tensile strength of Polymethyl Methacrylate (PMMA) by Computerized Numerical Control Machine” *วารสารวิจัย มข.* ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มกราคม – มีนาคม 2558. (ตอบรับการลงตีพิมพ์)

CHAIYOOT MEENGAM, **SUPPACHAI CHAINARONG** and KULYUTH BOONSENG “Joining of Semi Solid Metal 7075 Aluminum Alloys with Friction Welding” *International Symposium on Hybrid Materials and Processing, (HyMaP 2014)* 10-13 November, Busan, Korea, 2014.

Y.DUNYAKUL, C.MEENGAM, D.MAUNKHAW and **S.CHAINARONG** “Effect of Diffusion Bonding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar SSM7075 with SSM356 Aluminum Alloy Joints” *International Symposium on Hybrid Materials and Processing, (HyMaP 2014)* 10-13 November, Busan, Korea, 2014.