ตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือน ของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมผสม AA5052 และทองแดงผสม C11000

Spot Welding Parameters Affect the Tensile Shear Strength of a Friction - Stir Lap Joint of the AA5052 Aluminum Alloy with the C11000 Copper Alloys

ประดิษฐ์ สังข์ศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีการศึกษา 2557 ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# ตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือน ของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมผสมAA5052 และทองแดงผสมC11000



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีการศึกษา 2557 ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# Spot Welding Parameters Affect the Tensile Shear Strength of a Friction-Stir Lap Joint of the AA5052 Aluminum Alloy with the

**C11000 Copper Alloys** 



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING PROGRAM IN MANUFACTURING ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI ACADEMIC YEAR 2014 COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่ส่งผลต่อความแข็งแรง
	ดึงเฉือนของรอยต่อเกยระหว่างอะลูมิเนียมผสม AA5052 และ
	ทองแคงผสม C11000
ชื่อ – นามสกุล	นายประดิษฐ์ สังข์ศิริ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

รอยต่อวัสดุต่างชนิดถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเลกทรอนิกส์ รอยต่อนี้มีข้อดีในการเพิ่มความ ยึดหยุ่น และลดน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างทำให้เกิดการประหยัดพลังงานในรถยนต์ งานวิจัยนี้มี มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึง เฉือนของรอยต่อเกยอลูมิเนียมผสมAA5052 และทองแดงผสม C11000 และศึกษาโครงสร้างจุลภาก ของรอยต่อ

การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดถูกประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อเกยวัสดุต่างชนิดระหว่าง อลูมิเนียมผสม AA5052 และทองแดงผสม C11000 ที่ประกอบด้วยตัวแปรการเชื่อมต่างๆ เช่น กวามเร็วรอบ กวามเร็วเดินป้อน และเวลาในการกดแช่ รอยต่อเกยที่ได้จากการเชื่อมตามตัวแปรที่ กำหนดถูกเตรียมและทำการศึกษาศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อเกย

ผลการทคลองโดยสรุปมีคังนี้ ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ก่าความแข็งแรงคึงเฉือนสูงสุด 864 นิว ตัน คือ กวามเร็วรอบ 3,500 รอบ/นาที กวามเร็วเดินป้อนตัวกวน 6 มิลลิเมตร/นาที และระยะเวลาใน การกดแช่ 4 วินาที กวามแข็งแรงคึงเฉือนของรอยต่อเกยมีก่าเพิ่มขึ้นเมื่อกวามเร็วรอบและกวามเร็ว เดินป้อนเพิ่มขึ้น โกรงสร้างทางมหภาคของโลหะเชื่อมบริเวณใต้บ่ากวนมีลักษณะการก่อตัวที่เป็น ตะขอสูงที่ผิวสัมผัสของรอยต่อ โกรงสร้างจุลภากบริเวณอินเทอร์เฟสแสดงพื้นที่การรวมตัวของ ทองแคงและอลูมิเนียมและส่งผลทำให้รอยต่อเกยมีก่ากวามแข็งแรงคึงเฉือนสูง

กำสำคัญ : การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด อลูมิเนียม ทองแดง ความแข็งแรงดึงเฉือน

	Spot Welding Parameters Affect the Tensile Shear Strength of a
Thesis Title	Friction-Stir Lap Joint of the AA5052 Aluminum Alloy with the
	C11000 Copper Alloys
Name - Surname	Mr. Pradit Sangsiri
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
Academic Year	2014

\*\*\* \* \*

#### ABSTRACT

A joining of two different materials was widely applied in various industries such as an automobile industry, electrical industry and electronic industry. The advantages of this joint are increasing flexibility of the joint and decreasing the gross weight of the structure. It is also affecting the energy saving of the automobiles. This research aims to study the effects of friction stir spot welding parameters upon the tensile shear strength and the microstructure of the lap joint between AA5052 aluminum alloy and C11000 copper alloy.

The research was carried out by using a friction stir spot welding of the lap joint between AA5052 aluminum alloy and C11000 copper alloy. The experiments were conducted by varying important welding parameters such as rotating speed, pin insert rate and holding time. The joints that produced by given welding parameters were tested for their mechanical properties and examined their microstructure of the joints.

The experimental results showed that the maximum tensile shear strength of 864 N could be obtained by applying welding parameters at rotating speed of 3,500 rpm, the pin insert rate of 6 mm/min, and the holding time of 4 s. It was also founded that the increasing the rotating speed and the pin insert rate will resulted in increasing the tensile shear strength. The increasing of the shear strength was due to the high hook at the joint interface beneath the tool shoulder that can be observed by the examined macrostructure. Moreover, the examination of the microstructure at the joint interface showed the area that copper and aluminum were mixed. This also resulted in increasing the tensile shear strength of the lap joint.

Keywords: friction spot joining, aluminum, copper, shear tensile strength

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ด้วยการช่วยเหลือของผู้มีอุปการะกุณ ที่ให้ข้อเสนอแนะ ด้านข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ในด้านต่าง ๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตร์ตราจารย์ คร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง ผู้ช่วยศาตราจารย์ คร.ศิริชัย ต่อสกุล คณะกรรมการสอบ และ ผู้ช่วยศาตรา จารย์ คร.พิชัย จันทร์มณี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความ ช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากรของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสุพรรณบุรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และ วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และให้กวามช่วยเหลือ ตลอคช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถ นำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน



ประดิษฐ์ สังข์ศิริ

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(14)
บทที่	
1 บทน้ำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาคว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสคุที่ใช้ในการทดลอง	4
2.2 การเชื่อม	12
2.3 การเชื่อมเสียคทานกวนแบบจุด	13
2.4 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน	16
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภากและโครงสร้างจุลภาก	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย	23
3.1 การเตรียมวัสคุและอุปกรณ์	23
3.2 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง	29
3.3 กระบวนการเชื่อมเสียคทานกวนแบบจุค	31
3.4 การทคสอบความแข็งแรงคึงเฉือน	32
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค	34
3.6 การทดสอบความแข็ง	35

# สารบัญ (ต่อ)

บทที่ ห	เน้า
4 ผลการทคลองและการอภิปรายผลการวิจัย	37
4.1 อิทธิพลของความเร็วเดินป้อนที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกย	37
4.2 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีผลต่อความแข็งแรงคึงเฉือนของรอยต่อเกย	45
4.3 อิทธิพลของเวลากดแช่ที่มีผลต่อความแข็งแรงคึงเฉือนของรอยต่อ	55
4.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของรอยต่อเกย	67
4.5 การทคสอบความแข็งของรอยเชื่อม	81
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	82
5.1 สรุปผลการการทคลอง	82
5.2 ข้อเสนอแนะในการทคลอง	83
รายการอ้างอิง	84
ภาคผนวก ก โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด	89
ภาคผนวก ข โครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอ (Hook)	94
ภาคผนวก ค_ค่าทดสอบความแข็งแรงคึงเฉือน1	103
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	112
ประวัติผู้เขียน 1	125



# สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกชนิดของอลูมิเนียมตามระบบตัวเลข	4
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ของอลูมิเนียมผสม AA5052	7
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสมแมกนี้เซียม AA5052	8
ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ของทองแดงและทองแดงผสม	10
ตารางที่ 2.5 แสดงขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงเฉือนตามมาตรฐาน JIS Z 3136	17
ตารางที่ 2.6 น้ำยากัดผิวชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E407-99	21
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเกมีของอลูมิเนียมเกรด 5052 (AA5052) (ร้อยละ โดยน้ำหนัก %)	23
ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมเกรด 5052 (AA5052)	23
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเกมีของทองแดงผสมเกรด C11000 (ร้อยละ โดยน้ำหนัก %)	24
ตารางที่ 3.4 สมบัติทางกลของ ทองแคงผสม C11000	24
ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมทางเกมีของเหล็กกล้ำเกรื่องมือ SKD 11	27
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบที่เชื่อมค้วยเวลากคแช่ 2 วินาที	42
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบที่เชื่อมค้วยเวลากคแช่ 2 วินาที	52
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบที่เชื่อมค้วยเวลากคแช่ 4 วินาที	62
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบที่เชื่อมค้วยเวลากคแช่ 6 วินาที	65
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบที่เชื่อมค้วยเวลากคแช่ 8 วินาที.	67



### สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แผนภาพสมคุลอลูมิเนียม-แมกนีเซียม	7
ภาพที่ 2.2 กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด	13
ภาพที่ 2.3 กลไกการรวมตัวของรอยต่อในขณะที่วัสดุเกิดการอ่อนตัว	14
ภาพที่ 2.4 ลักษณะรูปร่างและส่วนต่างๆของตัวกวน	15
ภาพที่ 2.5 ชิ้นงานทคสอบแรงคึงเฉือนตามมาตรฐาน JIS Z 3136	16
ภาพที่ 2.6 ความเค้น(Stress) ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ	17
ภาพที่ 2.7 (ก) แรงเฉือนเดี่ยว (ข) แรงเฉือนคู่	18
ภาพที่ 2.8 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งแบบวิคเกอร์ส	19
ภาพที่ 3.1 ขนาคชิ้นงานทคลองในการเชื่อม อะลูมิเนียมผสม AA5052 (Unit : mm)	24
ภาพที่ 3.2 ขนาคชิ้นงานทคลองในการเชื่อม ทองแคงผสม C11000 (Unit : mm)	25
ภาพที่ 3.3 ชิ้นงานทคลองลักษณะการต่อเกย	25
ภาพที่ 3.4 ลักษณะแบบร่างการวางชิ้นงานทคลองในการเชื่อม	25
ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทคลอง (Fixture)	25
ภาพที่ 3.6 ขนาดและรูปร่างของเครื่องมือเชื่อม	28
ภาพที่ 3.7 เครื่องกัด CNC Millingที่ใช้สำหรับการเชื่อม	29
ภาพที่ 3.8 ชิ้นงานทคลองที่ไม่สามารถเชื่อมติค ด้วยความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที ความเร็วเคิน	
ป้อน 1 มม./นาที และเวลากดแช่ 1 วินาที	30
ภาพที่ 3.9 การเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม	31
ภาพที่ 3.10 จับยึคชิ้นงานบนอุปกรณ์จับยึด	32
ภาพที่ 3.11 ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม	32
ภาพที่ 3.12 การจับยึคชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทคสอบแรงคึงเฉือน	33
ภาพที่ 3.13 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)	33
ภาพที่ 3.14 การเตรียมชิ้นตรวจสอบ โครงสร้างมหาภาคและ โครงสร้างจุลภาค	34
ภาพที่ 3.15 เครื่องขัดจานหมุน	34
ภาพที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Micro Scope)	35
ภาพที่ 3.17 ชิ้นงานทคสอบความแข็ง	36
ภาพที่ 3.18 เครื่องทคสอบความแข็งไมโครวิกเกอรส์ ยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น T – X7-LCD	36

н	เน้า
ภาพที่ 4.1 รอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 1 มม./นาที ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที	
และเวลากดแช่ 1 วินาที	37
ภาพที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่ 2 วินาที	
ที่ความเร็วเดินป้อน (ก) 2 มม./นาที (บ) 4 มม./นาที (ค) 6 มม./นาที (ง) 8 มม./นาที	38
ภาพที่ 4.3 โครงสร้างภาคตั้ครอยต่อเกยที่เชื่อมค้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที และเวลากค	
แช่ 2 วินาที(ก) โครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอและอินเทอร์เฟสของรอยต่อที่	
ความเร็วเคินป้อน (ข) 2 มม./นาที(ค) 4 มม./นาที (ง) 6 มม./นาที และ (ง) 8 มม./นาที	40
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงเฉือน ความสูงของตะขอ และความเร็วเดินป้อน	
2-8 มม./นาที่ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่คงที่ 2 วินาที.	41
ภาพที่ 4.5 รูปแบบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงคึงเฉือน	42
ภาพที่ 4.6 รูปแบบลักษณะการพังทลายที่ผิวสัมผัส ของความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที เวลากดแช่	
2 วินาที	43
ภาพที่ 4.7 โครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่เชื่อมค้วยความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที ความเร็ว	
เดินป้อน6 มม./นาที และเวลากดแช่ 2 วินาที	44
ภาพที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่ 2 วินาที	
ที่ความเร็วเดินป้อน (ก) 2 มม./นาที (ข) 4 มม./นาที (ค) 6 มม./นาที (ง) 8 มม./นาที	45
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอกของรอยเชื่อม กับความเร็ว	
เดินป้อน 2-8 มม./นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที และเวลากด	
แช่คงที่ 2 วินาที	47
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขอบบ่าของรอยเชื่อมกับความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./	
นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่กงที่ 2 วินาที	47
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างภาคตัครอยต่อเกยที่เชื่อมค้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที และเวลากค	
แช่ 2  วินาที(ก) โครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอและอินเทอร์เฟสของรอยต่อที่	
ความเร็วเดินป้อน (ข) 2 มม./นาที(ค) 4 มม./นาที (ง) 6 มม./นาที และ (ง) 8 มม./นาที	48
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างภาคตัดรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที และเวลากด	
แช่ 2 วินาที (ก) โครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอและอินเทอร์เฟสของรอยต่อที่	
ความเร็วเดินป้อน (ข) 2 มม./นาที(ค) 4 มม./นาที (ง) 6 มม./นาที และ (ง) 8 มม./นาที	50

н	น้ำ
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคึงเฉือน ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และ	
ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 2 วินาที	51
ภาพที่ 4.14 รูปแบบลักษณะการพังทลายที่ โลหะเชื่อมความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน	
ป้อน 6 มม./นาที และเวลากดแช่ 2 วินาที	53
ภาพที่ 4.15 โครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที ความเร็ว	
เดินป้อน6 มม./นาที และเวลากดแช่ 2 วินาที	54
ภาพที่ 4.16 โครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ด้วยเวลากดแช่ 4 วินาที	
ความเร็วเดินป้อน (ก) 2 มม./นาที (ข) 4 มม./นาที (ค) 6 มม./นาที และ (ง) 8 มม./นาที .	56
ภาพที่ 4.17 (ก).ขนาคเส้นผ่าสูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอก D ของรอยเชื่อม ที่เวลากคแช่ 4 วินาที	57
ภาพที่ 4.17 (ข) ขนาคเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอก D ของรอยเชื่อม ที่เวลากคแช่ 6 วินาที	57
ภาพที่ 4.17 (ก) ขนาดเส้นผ่าสูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอก D ของรอยเชื่อม ที่เวลากดแช่ 8 วินาที	58
ภาพที่ 4.18 โครงสร้างภาคตัครอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที และเวลากด	
แช่ 4 วินาที (ก) โครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอและอินเทอร์เฟสของรอยต่อที่	
ความเร็วเดินป้อน (ข) 2 มม./นาที(ค) 4 มม./นาที (ง) 6 มม./นาที และ (ง) 8 มม./นาที	59
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะขอ ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และ	
ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากคแช่ 4 วินาที	60
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคึงเฉือน ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และ	
ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 4 วินาที	61
ภาพที่ 4.21 รูปแบบลักษณะการพังทลายที่โลหะอลูมิเนียม ของความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ที่	
ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที และเวลากดแช่ 4 วินาที	62
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะขอที่ความเร็วเดินป้อนเชื่อม 2-8 มม./นาที และ	
ความเร็วรอบ2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 6 วินาที	63
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคึงเฉือน ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และ	
ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 6 วินาที	64
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะขอ  ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที ความเร็ว	
รอบ 2500 - 4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 8 วินาที	65

к И	เน้า
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคึงเฉือน ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และ	
ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 8 วินาที	66
ภาพที่ 4.26 โครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที ความเร็ว	
เดินป้อน6 มม./นาที และเวลากดแช่ 4 วินาที	68
ภาพที่ 4.27 โครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที ความเร็ว	
เดินป้อน 8 มม./นาที และเวลากดแช่ 6 วินาที	69
ภาพที่ 4.28 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping บริเวณตะขอ (Hook)	
ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 6 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 4	
วินาที	71
ภาพที่ 4.29 ปริมาณธาตุ (%) บริเวณตะขอ (Hook) ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน	
ป้อน 6 มม/นาทีและเวลากคแช่ 4 วินาที	72
ภาพที่ 4.30 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทกนิก EPMA-Mapping บริเวณตะขอ (Hook)	
ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 8 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 6	
วินาที	72
ภาพที่ 4.31 ปริมาณธาตุ (%) บริเวณตะขอ (Hook) ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน	
ป้อน 8 มม/นาทีและเวลากคแช่ 6 วินาที	73
ภาพที่ 4.32 เปรียบเทียบปริมาณความหนาแน่นของปริมาณธาตุ (%) บริเวณตะขอ	74
ภาพที่ 4.33 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping บริเวณอินเทอร์เฟสที่	
ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 6 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 4	
วินาที	75
ภาพที่ 4.34 ปริมาณของธาตุ (%) บริเวณอินเทอร์เฟส (Interface) ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที	
ความเร็วเดินป้อน 6 มม/นาทีและเวลากดแช่ 4 วินาที	76
ภาพที่ 4.35 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping บริเวณอินเทอร์เฟสที่	
ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 8 มิลลิเมตร/นาที และเวลากดแช่ 6	
วินาที	77
ภาพที่ 4.36 เปรียบเทียบปริมาณความหนาแน่นของปริมาณธาตุ (%) บริเวณอินเทอร์เฟส	78
ภาพที่ 4.37 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีก่ากวามแข็งแรงดึงเฉือนต่ำสุด	79

ł	าน้ำ
ภาพที่ 4.38 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงคึงเฉือนสูงสุด	80
ภาพที่ 4.39 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมจุด (ก) Stir Zone (SZ), (บ) Thermo - Mechanical Affect	
Zone (TMAZ), (A) Heat Affect Zone (HAZ), (A) Bead Metal (BM)	81



# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

FSW	การเชื่อมเสียดทานกวน (Friction Stir Welding,)
FSSW	การเชื่อมเสียคทานกวนแบบจุค ( Friction Stir Spot Welding,)
HAZ	บริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone)
Sec.	วินาที
kgf	แรงกด (กิโลกรัม)
mm	มิลลิเมตร
mm/min	ความเร็วเดินป้อน (Feed)
rpm	ความเร็วรอบ (Speed)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
HV	หน่วยความแข็ง (Micro HardnessViker)



บทที่ 1 บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รอยต่อของวัสดุที่แตกต่างชนิดกันถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบทางด้านเทคนิคและประโยชน์จากคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุเหล่านั้น [1] อลูมิเนียม และทองแดง เป็นโลหะทั่วไปที่มักใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆเช่น อุตสาหกรรมไฟฟ้าและ อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรมทางเคมีและนิวเคลียร์, อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ และอุตสาหกรรม ยานยนต์เป็นต้น [2] แต่อย่างไรก็ตาม โลหะทองแดงและอลูมิเนียม มีความยากลำบากในการต่อยึดเข้า ด้วยกันด้วยวิธีปกติโดยทั่วไปเช่น การเชื่อมแก๊ส, การเชื่อมอาร์ก, การเชื่อมความต้านทานแบบจุด, การประสาน (Brazing), และการบัดกรี เพราะอลูมิเนียมและทองแดง มีความสามารถในการ แพร่กระจายความร้อนได้สูงในบรรดาทั้งหมดของวัสดุโลหะในระหว่างการเชื่อมแบบหลอมละลาย ธรรมดา นอกจากนี้ยังเกิดอ๊อกซิเคชั่นที่ร้ายแรงที่อุณหภูมิหลอมละลายและความร้อนทำให้เกิดรอย แตกร้าวในรอยต่อและปัญหาที่ยากและหลีกเลี่ยงไม่ได้กือสมบัติทางกลที่อาจด้อยลงได้ในการเชื่อม ทองแดงและอลูมิเนียมด้วยวิธีหลอมละลายดังกล่าว

ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในการเชื่อมวัสดุที่แตกต่างชนิดกันจึงนำไปสู่เทกนิกของการ เชื่อมซึ่งเป็นการพัฒนาวิธีการเชื่อมต่อวัสดุขึ้นใหม่ด้วยเทกนิกกระบวนการเชื่อมวัสดุที่อยู่ในสถานะ ของแข็งที่ไม่มีการหลอมละลายในการเชื่อมเสียดทานกวน (Friction Stir Welding, FSW ) ซึ่งมี แนวโน้มที่จะสร้างรอยต่อที่เป็นวัสดุแตกต่างชนิดกันได้ การเชื่อมด้วยกระบวนการ FSW ซึ่งถูกกิดก้น ขึ้นมาเพื่อสร้างรอยต่อของอลูมิเนียมผสม ในปัจจุบันเทกนิกของกระบวนการ FSW ซึ่งถูกกิดก้น ขึ้นมาเพื่อสร้างรอยต่อของอลูมิเนียมผสม ในปัจจุบันเทกนิกของกระบวนการเรื่อมแบบ FSW ได้รับ การพัฒนาอย่างมากและกลายเป็นสามารถใช้ได้กับการเชื่อมต่อกับวัสดุโลหะอื่นๆอีกมากมายที่มีจุด หลอมละลายสูง เช่น ทองแดง, อลูมิเนียม, ไทเทเนียม, เหล็ก และอื่นๆเป็นต้น [3,5,4] เมื่อเทียบกับ วิธีการหลอมละลายอื่นๆ กระบวนการ FSW สามารถเชื่อมโลหะได้ต่ำกว่าจุดหลอมละลาย แต่มี ข้อจำกัดในการเชื่อมวัสดุที่เป็นแผ่นบาง จึงได้มีการพัฒนาการเชื่อมวัสดุแผ่นบางขึ้นมาด้วย กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด (Friction Stir Spot Welding, FSSW) โดยได้รับการพัฒนา บนหลักการพื้นฐานของการเชื่อมเสียดทานกวน (FSW) ซึ่งในกรณีของ FSSW นี้กระบวนการเชื่อม กือ เครื่องมือจะหมุนกวนลงไปอยู่ในชิ้นงานที่ต่อเกยกันอยู่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งของเวลาแล้วถอย กลับของดัวกวนโดยสร้างแรงเสียดทานกวนที่จุดๆหนึ่ง

ที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าได้มีการเชื่อมวัสดุต่างชนิดสำหรับรอยต่อของอลูมิเนียม กับทองแดง

หรือกับวัสดุโลหะแผ่นบางอื่นๆ เช่น Y. F. Sun , H. Fujii [6] ใด้ประสบความสำเร็จในกระบวนการ เชื่อม FSSW กับรอยต่อเกยของโลหะผสม Zr<sub>55</sub> Cu<sub>30</sub> Al<sub>10</sub> Ni<sub>5</sub> (BMG) แผ่นหนา 2 มิลลิเมตรกับ ทองแคงบริสุทธิ์ พบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบางส่วนมีลักษณะคล้ายพื้นเสื่อยเกิดขึ้นที่ขอบ ของแผ่น BMG และบางนิวเคลียส (Nucleuses) ขนาดนาโนที่กระจัดกระจายอยู่ในค้าน BMG ตาม อินเตอร์เฟสร่วม Cu / BMG ที่ด้านบนของทองแดง (Cu) ใกล้กับรูแกนเชื่อม (Key Hole) ขึ้นส่วน BMG ถูกฝั่งอยู่ในเนื้อแท้ของทองแดง ผลที่ตามมาอย่างมีนัยสำคัญ ของการทดสอบแรงดึงเฉือนแสดง ให้เห็นว่ารอยต่อของทองแดง (Cu) กับ BMG รอยต่อพังทลายที่แรงดึงสูงสุด 2300 นิวตัน ผ่านพื้นที่ บริเวณกวนพังทลายแบบดึงฉีกขาดออกมา ,Y.C.Chen at al. [7] ใด้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณ อินเตอร์เฟซและพันธะรอยขีดข่วนเป็นวงกลมบริเวณของการเชื่อมกวนเสียดทานแบบจุด แนวทาง ใหม่สำหรับการเชื่อมอลูมิเนียมอย่างรวดเร็วกับแผ่นเหล็กยานยนต์, FSSWอลูมิเนียม [8,9,10], เหล็กกล้ากับอลูมิเนี่ยม [11,12,13] และแมกนีเซียมกับอลูมิเนียม [14]

อย่างไรก็ตามสำหรับรอยต่อ อลูมิเนี่ยม AA5052 กับทองแดงผสม C11000 ที่เป็นรอยต่อ เกยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด (FSSW) ยังไม่พบรายงานจากการวิจัยจนถึง ขณะนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีกรอบแนวความคิดในการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของรอยต่อเกยอลูมิเนียม AA5052 และทองแดงผสม C11000 เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมได้แก่ความเร็วรอบของตัวกวน (รอบต่อนาที), อัตราความเร็วในการ ป้อนกวน (มิลลิเมตรต่อนาที) และระยะเวลาในการกดแช่ (วินาที) ที่มีผลกระทบต่อความเก้นแรงดึง เฉือนสูงสุดและส่งผลโดยตรงต่อโกรงสร้างทางจุลภาคของรอยต่ออลูมิเนียมAA5052กับทองแดงผสม C11000 ซึ่งงานวิจัยนี้เพื่อให้ได้รอยต่อที่มีความแข็งแรงในการประยุกต์ใช้งาน และเป็นข้อมูลในการ พัฒนาต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด ของรอยต่อเกยการ เชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดระหว่างอลูมิเนี่ยม AA5052 และ ทองแดงผสม C11000

1.2.2 ศึกษาโครงสร้างมหภาค จุลภาคและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมกวนเสียดทานแบบจุดอลูมิ เนี่ยมผสม AA5052 และทองแดงผสม C11000

#### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของตัวแปรการเชื่อม เสียคทานกวนแบบจุคของรอยต่อเกย อลูมิเนี่ยม AA5052 และทองแคงผสม C11000 ที่มีผลต่อโครง ้สร้างมหภาค จุลภาคและสมบัติทางกลของรอยเชื่อม โคยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคังนี้

1.3.1 เชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด รอยต่อเกยแผ่นอลูมิเนียม AA5052 ขนาด กว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร และแผ่นทองแดง C11000 ขนาด กว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร

1.3.2 เชื่อมรอยต่อเกยโดยกำหนดให้ระยะรอยต่อเกยที่ 30 มิลลิเมตร ทองแดงอยู่ด้านบนและ
อลูมิเนียมอยู่ด้านล่าง

1.3.3 ศึกษาตัวแปรการเชื่อม

1) ความเร็วรอบตัวกวน ที่ 2500, 3000, 3500 และ 4000 รอบต่อนาที

2) ความเร็วเดินในการเชื่อม ที่ 2, 4, 6 และ 8 มิลลิเมตรต่อนาที

3) เวลาในการกดแช่ ที่ 2, 4, 6 และ 8 วินาที

4) ระยะตำแหน่งตัวกวน 0.7 มิลลิเมตร

5) ความลึกในการกคตัวกวนที่ 1.0 มิลลิเมตร

1.3.4 ทคสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม โดยทคสอบความแข็งแรงดึงเฉือนและทคสอบ ความแข็งของรอยเชื่อม

1.3.5 ศึกษาโครงสร้างมหภาคจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่บริเวณรอยเชื่อม ที่สภาวะต่างๆ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 เพื่อเป็นข้อมูลในการกำหนดค่าตัวแปรการเชื่อมกวนเสียดทานแบบจุดที่ทำให้เกิดความ แข็งแรงคึงเฉือนสูงสุดของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA5052 และทองแดง C11000

1.4.2 เพื่อเป็นการพัฒนาแนวทางและประยุกต์เทคโนโลยีทางด้านการเชื่อมแรงเสียดทานกวน แบบจุดเป็นพื้นฐานในการทำวิจัยต่อไป

 1.4.3 เพื่อเป็นการพัฒนาองก์ความรู้ใหม่ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการพัฒนาการเชื่อมใน แบบสถานะของแข็ง (Solid-State Welding) ต่อไปในอนาคต

# บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

#### 1) อะลูมิเนียม(Aluminum) [15]

อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมเป็นวัสดุกลุ่มของโลหะนอกกลุ่มเหล็กมีคุณสมบัติที่ดีคือ มี น้ำหนักเบา มีค่าความแข็งแรงสูงมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีเนื่องจากมีการสร้างผิวออกไซค์มา ปิดผิวไว้ตลอดเวลา มีค่าการนำกระแสไฟฟ้าได้ดี และมีคุณสมบัติทางด้านหล่อหลอมที่ดี โดยมี อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ สามารถรวมตัวกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะผสมได้ง่ายมีความสามารถในการ ใหลอยู่ในเกณฑ์สูง สามารถหล่อหลอมและขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆได้ง่าย แต่ข้อเสียของอลูมิเนียมก็มีอยู่ บ้างเหมือนกัน โดยเฉพาะอลูมิเนียมมีขอบเขตการยึดหยุ่น (Elastic limit) ต่ำ ทำให้การใช้งานถูกกำจัด ขอบเขตไปบ้าง แต่จากคุณสมบัติที่ดีหลายประการนี้ทำให้อลูมิเนียม จึงเป็นที่นิยมใช้งานอย่าง กว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ

การแบ่งประเภทของอลูมิเนียมสามารถทำการแบ่งได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับเกณฑ์ในการแบ่ง โดยในแง่ของกรรมวิธีการผลิตอลูมิเนียมสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่คือ อลูมิเนียมแปร รูปเย็น (Wrought Aluminum Alloys) และอลูมิเนียมหล่อผสม (Cast Aluminum Alloys) และหากจะ ทำการแบ่งโดยใช้เกณฑ์ของส่วนผสมทางเคมี สามารถที่จะแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ อลูมิเนียมบริสุทธิ์ และอลูมิเนียมผสม โดยในการกำหนดแบ่งและเรียกชื่ออลูมิเนียมแปรรูปเย็นนั้น นิยมเรียกตามมาตรฐานของอเมริกาที่ทางสมากมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา (Aluminum Association) เป็นผู้กำหนดโดยใช้หลักเกณฑ์แบ่งตามธาตุที่ผสม ซึ่งกำหนดเป็นตัวเลข 4 หลักโดย ตัวเลขหลักที่หนึ่งเป็นการแบ่งกลุ่มของอลูมิเนียมซึ่งสามารถแบ่งได้ 9 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.1

สัญลักษณ์	<b>ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอลูมิเนี</b> ยม	
1XXX	อลูมิเนียม ที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00%	
2XXX	ทองแดง (Copper, Cu)	
3XXX	แมงกานีส (Manganese , Mn)	
4XXX	ซิลิกอน (Silicon , Si)	

a	0	9	94		
ตารางท์ 2.1	แสดงการจำแน	เกชนดขอ	งอลมเนยมต	ามระบบตวเลข	[16]
					L - AI

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอลูมิเนียม			
5XXX	แมกนี้เซียม (Magnesium , Mg)			
6XXX	แมกนี้เซียมกับซิลิกอน (Magnesium , Mg and Silicon , Si)			
7XXX	สังกะสี (Zinc , Zn)			
8XXX	ธาตุอื่นๆ (Other Element)			
9XXX	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)			

ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกชนิดของอลูมิเนียมตามระบบตัวเลข [ต่อ]

ตัวเลขหลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุด ในการแสดงกลุ่มของอลูมิเนียมผสม ซึ่งมี อยู่ 8 กลุ่ม ตามตาราง เช่น <u>1XXX แ</u>ทนโลหะที่มีอลูมิเนียมไม่น้อยกว่า 99% โดยน้ำหนัก เป็นต้น

ตัวเลขหลักที่สอง เป็นสัญลักษณ์ใช้สำหรับกำกับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ส่วนผสมของ โลหะ ให้แตกต่างไปจากโลหะผสมเดิม เช่น ตัวเลข 0 แสดงว่า เป็นโลหะผสมคั้งเดิม ส่วนตัวเลข 1-9 แสดงว่า เป็นโลหะที่ผสมเข้าไปเปลี่ยนแปลงจากเดิม ยกตัวอย่างเช่น หมายเลข 2024 ตัวเลขหลักที่ สองคือ 0 (4.5%Cu, 1.5%Mg, 0.5%Si, 0.1%Cr) เมื่อเทียบกับหมายเลข 2218 ตัวเลขหลักที่สอง คือ 2(4.0%Cu, 2.0%Ni, 1.5%Mg, 0.2%Si)

ตัวเลขหลักที่สาม และ สี่ เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงชนิดย่อยๆ ของโลหะที่ผสมในกลุ่ม เดียวกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ มักจะเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น หมายเลข <u>2014</u> ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 14 (4.4%Cu , 0.8%Si , 0.8%Mn , 0.4%Mg) และ หมายเลข <u>2017</u> ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 17 (4.0%Cu , 0.8%Si , 0.5%Mn , 0.5%Mg , 0.1%Cr)

เฉพาะอลูมิเนียมในกลุ่ม <u>1XXX</u> ตัวเลขหลักที่สาม และ หลักที่สี่ จะแสดงปริมาณของ อลูมิเนียมที่เป็น จุดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ที่ปรากฎภายหลัง 99% เช่น หมายเลข <u>1060</u> และ หมายเลข <u>1080</u> หมายถึง อลูมิเนียมขึ้นรูป ที่มีอลูมิเนียม 99.60% และ 99.80% ตามลำดับ

อลูมิเนียมบริสุทธิ์ สัญลักษณ์ IXXX ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์ของ อลูมิเนียมที่ 99.0% ถึง 99.9% อลูมิเนียมในกลุ่มนี้ยังจะมีความด้านทานการกัดกร่อนได้ดีสามารถนำ ไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการแผงสะท้อนแสงในไฟหน้า รถยนต์ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเลือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการ ต่างๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสียคือในด้านของ ความแข็งแรง และคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสคุชนิดอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจือ อื่นเพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็นคือการทำให้แข็งได้ด้วยความเด้น อลูมิเนียมผสมทองแดง สัญลักษณ์ 2XXX เป็นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงคุณสมบัติ ทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงและความสามารถในการ เชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ คือจะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีทางกล

อลูมิเนียมผสมแมงกานีส สัญลักษณ์ 3XXX เป็นอลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเหมือนกับ อลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุง คุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

อลูมิเนียมผสมซิลิกอน สัญลักษณ์ 4XXX อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถ ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางกวามร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะ แข็งตัวจะไม่เกิดการแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติม สำหรับเชื่อมอลูมิเนียมผสมและอลูมิเนียมหล่อ

อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม สัญลักษณ์ 5XXX บางครั้งจะมีการเติม แมงกานีสลงไปด้วย อลูมิเนียมเจือชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จึง นิยมนำไปทำลวดเติมสำหรับเชื่อมเหมือนกับอนุกรม 4XXX นอกจากนั้นยังนำไปทำเป็นถังหรือขวด บรรจุแก๊ส (Storage Vessels)

อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม ซิลิกอน สัญลักษณ์ 6XXX อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกล ที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการ เชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสียคือเมื่อนำอลูมิเนียมผสมชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการ ให้ความร้อนแบบต่างๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน

อลูมิเนียมผสมสังกะสี แมกนี้เซียม สัญลักษณ์ 7XXX อลูมิเนียมชนิดมีการผสมธาตุสังกะสี เป็นธาตุหลักและและแมงกานีสเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและ โครเมียมอีกเล็กน้อย อลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความด้านทาน การกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ก่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณ แนวเชื่อม อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความ ร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาอลูมิเนียมชนิดนี้ โดยการผสมแมกนีเซียมลงไปและ กำจัดทองแดงออกไปทำให้ความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้น โดยจะไม่เกิดการอ่อน ตัวบริเวณแนวเชื่อมเพราะบริเวณดังกล่าวได้เกิดการแข็งตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ อล**ูมิเนียมผสม AA5052** เป็นอลูมิเนียมผสมที่มีแมกนีเซียม 2.5 % และโครเมียม 0.25 % อลูมิเนียมผสมชนิดนี้นิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยานยนตร์ ชิ้นส่วนในเรือ เครื่องบิน ภาชนะ เครื่องใช้ ปลอกหุ้มสายเคเบิ้ล งานโลหะแผ่น ท่อไฮครอลิก และ ถังน้ำมัน อลูมิเนียมผสม AA5052 มีส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

เกรด	Si	Al	Zn	Cu	Cr	Mg	Mn
AA 5052	0.25	สมคุลย์	0.10	0.10	0.15-0.35	2.2-2.8	0.10
ความต้านทานแรงคึง(Tensile strength) 165 MPa							

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ของอลูมิเนียมผสม AA5052 [16]

แผนภาพสมดุล (Phash Diagram)อลูมิเนียม 5052 แมกนีเซียม เป็นโลหะที่มีโครงสร้าง ผลึก Hexagonal และ มีอุณหภูมิหลอมละลาย ใกล้เคียงกับอลูมิเนียม คือ ที่อุณหภูมิ 560°C จึงทำให้ การละลาย ของแมกนีเซียม ในอลูมิเนียมได้ไม่มาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำละลายได้ประมาณ 3% ที่ อุณหภูมิห้อง และละลาย ได้สูงสุดที่ 15.35% ที่อุณหภูมิ 451°C ดังในแผนภาพสมดุล จะพบว่าจะเกิด ปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 450°C ที่ 34.5% แมกนีเซียม ปฏิกิริยายูเทคติกนี้ จะให้โครงสร้าง อลูมิเนียม และ โครงสร้าง Bซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะ มีสูตรทางเคมีว่า Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> มีคุณสมบัติแข็ง และเปราะ



ภาพที่ 2.1 แผนภาพสมคุลอลูมิเนียม-แมกนีเซียม [17]

อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงมาก , การขึ้นรูปดี , ลักษณะพิเศษ ทางการเชื่อม และ ด้านทานการกัดกร่อนสูง คุณสมบัติสำคัญของ อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม คือ ตอบสนองการเชื่อมดี ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อใช้แก๊สอาร์กอน ในขบวนการเชื่อม และ อลูมิเนียม 5052 มีสมบัติทางกล แสดงคังตารางที่ 2.3

สมบัติทางกล							
เกรด	ความ แข็งแรงดึง (MPA)	ความถ้ำ (MPA)	ความ ยี่ดหยุ่น(%)	ค่าความแขึง (HB)	ความแข็งแรงเฉือน (MPA)		
0	195	90	25-27	47	125		
H32	230	195	12-16	60	140		
H34	260	215	10-12	68	145		
H36	275	240	8-9	73	160		
H38	590	255	9 z 16	77	165		

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA5052

#### 2) ทองแดงและทองแดงผสมอัลลอย (Coppers and Copper Alloys) [18]

ทองแคงและทองแคงผสมอัลลอย (Coppers and Copper Alloys) ทองแคง เป็นโลหะ ชนิดแรกที่ถูกก้นพบและนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดของมนุษยชาติ ทองแคงที่มีสีเหลือง-แคงเป็นสุด ยอควัสดุที่มีกวามเหนียว (Extremely Ductile) ที่มีโกรงสร้างผลึก (Crystal Structure) รู้จักในนาม ถูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ (Face-Center-Cubicหรือ FCC) มีก่าสื่อนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ที่ 97% ดีสุดเป็นอันดับสองรองจากโลหะ เงิน (Silver) มีก่าสื่อนำกวามร้อน (Thermal Conductivity) ที่ 37% ดีสุดเป็นอันดับ เป็นเส้น (Rods), แผ่นหนา/บาง/เส้น (Plates/Sheets/Strips), ท่อหนา/บาง (Tubes/Pipes),ชนิดที่ผ่านกระบวนการบีบอัด (Extrusions),แผ่นฟอยล์ (Foils),ชนิดที่ผ่านกระบวนการ ทุบขณะร้อน (Forgings), แบบเส้นลวด (Wires) และการหล่อ (Casting) จากโรงงานหล่อโลหะต่างๆ

มาตรฐานทองแคงของยุโรปเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาโดย ComitéEuropéen de Normalisation (CEN) โดยระบบนี้จะใช้เลขหกหลัก แอลฟา-เชิงตัวเลขในการระบุ ตัวอักษรตัวแรก "C" จะแสดงทองแคงผสม ตัวอักษรตัวที่สองจะแสดงรูปแบบการผลิต เช่น B คือจากแท่งอิงกอท สำหรับการหลอมใหม่เพื่อการหล่อผลิตภัณฑ์, C คือผลิตภัณฑ์จากการหล่อ, F คือวัสคุเติมเต็มสำหรับ การประสาน และเชื่อม, M คือมาสเตอร์อัลลอยค์, R คือ Refined unwrought copper, S คือ เศษ, W คือ ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูป และ X วัสคุไม่ได้มาตรฐาน หมายเลขสามหลักถูกใช้ในการระบุวัสคุ และตัวอักษร ตัวสุคท้ายจะแสดงกลุ่มวัสคุของทองแคง และเพื่อขยายระบบจำนวนชื่อที่ระบุ

ในอเมริกาใต้ มาตรฐานของทองแดงสำหรับทองแดงผสมจะใช้ของ Unified Numbering System (UNS) ที่ออกโดย American Society for Testing and Materials (ASTM) และ Society of Automotive Engineers (SAE) ภายใต้ระบบของ UNS ทองแดง และทองแดงผสมจะระบุโดยใช้ตัวเลข ห้าหลักที่ขึ้นต้นด้วยตัวอักษร C โดยรหัสห้าหลักนี้จะใช้พื้นฐานของการแทนที่ระบบตัวเลขเดิมที่มี สามหลัก ที่พัฒนาโดย U.S. copper and brass industry

ในระบบ UNS หมายเลขจาก C10000 ถึง C79999 หมายถึงอัลลอยค์ที่ทำขึ้น ในขณะที่อัล ลอยค์จากการหล่อจะมีชื่อจาก C80000 ถึง C99999 จากสองประเภทนี้สามารถแบ่งกลุ่มส่วนประกอบ ของทองแคงผสม ได้เป็นหกกลุ่มใหญ่คือ ทองแคง, ทองแคงผสมอัลลอยค์ที่ปริมาณสูง (high-alloy coppers), ทองเหลือง, บรอนซ์, นิกเกิล และนิกเกิลเงิน ส่วนอัลลอยค์ที่ไม่อยู่ในหกกลุ่มนี้ และถูก แบ่งเป็น ทองแคง-สังกะสี อัลลอยค์ ส่วนประกอบที่ทำขึ้น หรืออัลลอยค์พิเศษ และการหล่อ ส่วนประกอบ

มาตรฐานทองแคงของญี่ปุ่น JIS มีพื้นฐานมาจากมาตรฐาน ISO การกำหนดชื่อจะเริ่มต้น ด้วยตัวอักษร JIS และตามด้วยตัวอักษร C สำหรับทองแคงที่หล่อขึ้น และทองแคงผสม หมายเลขสี่ หลักที่ใช้จะขึ้นอยู่กับธาตุผสมที่ใส่เข้าไป ตัวอย่างเช่น JIS C1020 ประกอบด้วย Cu 99.9%, JIS C2720 กือ Cu-Zn (ทองเหลือง), JIS

ทองแคงเป็นโลหะที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ 1) ทองแคงหล่อผสมอัล ลอย (Cast Copper Alloys) มีรหัส UNS C80000 ถึง C99999 ปกติจะมีส่วนผสมของธาตุต่างๆ มากกว่า 1ธาตุขึ้นไป และ 2) ทองแคงผสมอัลลอย (Wrought Copper Alloys) มีรหัส UNS C10000 ถึง C79999 สามารถผลิตด้วยกรรมวิธีที่หลากหลาย เช่น การอบอ่อน (Annealed), การขึ้นรูปเย็น (Cold Worked), การชุบแข็งด้วยการอบคืนไฟ (Hardened by Heat Treatments), การกลายความเค้น (Stress Relieved)

การจัดกลุ่มประเภทของทองแดงและทองแดงผสมอัลลอย เกรดทองแคงถูกแบ่งเป็น 6 กลุ่ม ใหญ่ๆคือ ทองแดง, ทองแดงผสมอัลลอยด์ (High-Copper Alloys) , ทองเหลือง, บรอนซ์, ทองแดง-นิกเกิล อัลลอยด์ และนิกเกิล-เงิน อัลลอยด์

ทองแดง เป็นทองแดงบริสุทธิ์เป็นโลหะที่มีธาตุทองแดงผสมอยู่อย่างน้อย 99.3% หรือ มากกว่าที่ใช้ในการก้าเป็นหลัก เพราะมีน้ำหนักเบา และอ่อน อีกทั้งยังมีธาตุอื่นๆผสมอยู่ไม่ถึง 0.7% เกรคของทองแคงบริสุทธิ์ที่ระบุโคย UNS คือ C10100 ถึง C13000 โดยเกรคทองแคงที่เบานี้ ประกอบด้วยธาตุอัลลอยค์เพียงเล็กน้อยที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของทองแคง อย่างใดอย่างหนึ่ง

ทองแคงผสมอัลลอยค์ (High-Copper Alloys) C11000 ปกติทองแคงผสมอัลลอย (Wrought-Copper Alloys) จะมีปริมาณธาตุทองแคงผสมอยู่ระหว่าง 99.3 - 96% ในขณะที่ ทองแคง หล่อผสม (Cast-Copper Alloys) มีปริมาณทองแคงผสมอยู่เกิน 94% และผสมธาตุเงินเข้าไป C11000 ทำมาจากทองแคงขั้วลบ ซึ่งทองแคงได้ผ่านการปรับแต่งให้มีสภาพการนำไฟฟ้า และ C11000 เป็น เกรคทองแคงที่ใช้ในการนำไฟฟ้าโดยทั่วไป เพราะมีสภาพการนำไฟฟ้าสูง มากกว่า 100% IACS และ มีปริมาณออกซิเจนเท่ากับ C12500 แต่มีส่วนประกอบซัลเฟอร์ที่แตกต่างกัน โดย C11000 มีความไม่ บริสุทธิ์ของโลหะอยู่ทั้งหมด 50 ppm รวมทั้งซัลเฟอร์

Copper	Cu	Ag	P	As	Sb	Te	Other
UNS no.		min.					
C10200	99.95	Ser		Long sta			
C10300	99.95		0.001-0.005				
C10400	99.95	0.027					
C10800	99.95		0.005-0.012				
C11000	99.90	24		26	Por		
C11300	99.90	0.027		ER P	S		
C12000	99.90	3	0.004-0.012		02		
C12200	99.90	Č.	0.015-0.040		6		
C12500	99.88	30	เทลโงกิจ	0.012	0.003	0.025	0.050 Ni,
			ภานเส	9.			0.003 Bi,
							0.004 Pb
C13000	99.88	0.085		0.012	0.003	0.025	0.050 Ni,
							0.003 Bi,
							0.004 Pb
C14200	99.40		0.015-0.040	0.15-0.50			

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ของทองแดงและทองแดงผสม

ทองแดงผสมอัลลอยค์ ( High-Copper Alloys ) มาตราฐานเกรค C11000 ซึ่งเป็นเกรค อุตสาหกรรมที่นิยมใช้กันทั่วไป เช่น งานกลึงชิ้นส่วนต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอะไหล่รถยนต์ ส่วนประกอบ ในเครื่องจักร อุตสาหกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมห้องเย็น อุตสาหกรรมชุบงานปั้มขึ้นรูป งานแม่พิมพ์ เป็นต้น [18]

คุณสมบัติโดยทั่วไปของทองแดง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

- ระบบผลิก FCC

- ความหนาแน่น (ที่ 20°C) 8.96 g.cm<sup>-3</sup>

- จุดหลอมเหลว 1,805°C

- จุดเดือด 2,562°C

- ความต้านทานไฟฟ้า (ที่ 20 °C) 16.78 nΩ.m

- สัมประสิทธิ์การขยายดัว (ที่ 20 °C) 16.5 μm.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

สมบัติเชิงกุล

- Youngs modulus 110-128 GPa

- Tensile Strength 17 Kg/mm2

- Hardness 35 – 50 HB

- Elastic Limit 10 Kg/mm<sup>2</sup>

- Elongation 35 - 50 %

ทองเหลือง (Brasses) ทองเหลืองเป็นอัลลอยที่มีสังกะสี (Zinc) เป็นส่วนผสมหลัก (ไม่ว่า จะมี Iron, Aluminum, Nickel หรือ Silicon ผสมหรือไม่ก็ตาม) ทองเหลืองผสมอัลลอย (Wrought Alloys) สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

1) Copper-Zinc Alloys

2) Copper-Zinc-Lead Alloys (Leaded Brasses)

3) Copper-Zinc-Tin Alloys (Tin Brasses)

คุณสมบัติทองเหลือง (Brasses) จะมีสีเหลืองมีทองแดงผสม 50 % แต่ถ้าผสมมากกว่านี้ เช่น มีทองแดง 70 % ขึ้นไปจะทำให้เนื้อทองแดงอ่อนมาก เรียกว่า ทอมบัค (Tombak) ใช้งานมากที่สุด รีคเป็นแผ่นได้ คึงเป็นเส้นได้ การนำไฟฟ้าลดลงแต่กวามแข็งเพิ่มขึ้น

ทองแดง-นิกเกิล อัลลอยด์ (copper-nickels, cupro-nickels) คือเกรดทองแดงที่ประกอบด้วย นิกเกิล 1.5-45% เป็นธาตุหลัก ตามที่ Unified Numbering System (UNS) กำหนด ทองแดง-นิกเกิล อัล ลอยด์ระบุด้วยหมายเลขจาก UNS C70000 ถึง UNS C73499 อัลลอยด์กลุ่มนี้ใช้ในการผลิตเหรียญ อุปกรณ์ที่ใช้ในน้ำทะเล เครื่องระเหย (evaporators) ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger tubes) ระบบไฮครอลิคในยานยนต์ (automotive hydraulic) ระบบหล่อเย็น (cooling systems) ทำงคลวด ด้านทาน แหวนลูกสูบเครื่องยนต์ และบรรทัดโลหะ

บรอนซ์ (Bronzes) บรอนซ์ เกิดจากทองแดงผสมสังกะสีประสมดีบุก แบ่งออกเป็นหลาย ชนิด ได้แก่ บรอนซ์อะลูมิเนียม (Cu + Zn + Sn + AI – BZAI) มีความเค้นแรงคึงสูงมาก (70 กก./มม.2) ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เชื่อมได้ดี บัดกรีอ่อนและแข็งไม่ติด ใช้ทำทุ่นอาร์เมเจอร์ ทำชุดเฟืองหนอน ทำก้านลิ้น, บรอนซ์ดีบุก (Cu + Zn + Sn – BZSn) มีดีบุกไม่เกิน 20% มีความแข็งแรงใช้ทำสปริงล้อ ตามตัวหนอนในกังหันตะแกรงลวด งานต่อเรือเดินทะเล บรอนซ์ตะกั่ว (Cu + Zn + Sn + Pb – BZPb) มีผิวลิ่น รับแรงกดอัดบนผิวตัวมันเองใช้ทำเป็นวัสดุแบริ่ง บรอนซ์เบริลเลียม (Cu + Zn + Sn + Pb – BZPb) มีผิวลิ่น รับแรงกดอัดบนผิวตัวมันเองใช้ทำเป็นวัสดุแบริ่ง บรอนซ์เบริลเลียม (Cu + Zn + Sn + Be – BZBe) มีความยืดหยุ่น ชุบแข็งได้แต่ต้องเผาให้ร้อน 7000 – 800 °C แล้วจุ่มในน้ำ นำไปอบเหนียวที่ อุณหภูมิ 2500 – 4000°C ในสูญญากาศ ทำสปริงแข็งทำจุดแหลมชนกัน ทำเป็นแบริ่งในเครื่องมือ อุปกรณ์

ทองแดงผสมนิกเกิล-สังกะสี (Copper-Nickels-Zinc) รู้จักในนาม นิกเกิล เงิน ( Nickel Silvers ) ที่มีส่วนผสมของ Zinc เป็นหลัก และรองลงมาคือ Nickel ทองแดงผสมนิกเกิลกับสังกะสี (Cu 40 – 70%, Zn 20 – 45% Ni 10-30%) ไม่ได้มีส่วนประกอบของเงิน และอาจจะเป็นทองเหลืองที่ เพิ่มนิกเกิลเข้าไป โดยที่นิกเกิลถูกเพิ่มเข้าไปในปริมาณมากแต่ในความเป็นจริงแล้วอยู่ระหว่าง 9 ถึง 30% ขึ้นอยู่กับงานที่ใช้ และปริมาณฑองแดงมีแนวโน้มที่จะเท่าเดิมคือประมาณ 60-65% แต่สังกะสีจะ ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิล ปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เปลี่ยนเป็นสีขาว เงินเพิ่มความด้านทาน การกัดกร่อน และลดความอ่อน ประโยชน์ ทำเครื่องมือมีคม เครื่องโลหะรูปพรรณต่าง ๆ ชุดเครื่องมือ เขียนแบบ เครื่องมืองานประณีต เช่น ช้อน ส้อม และ กรอบนาฬิกา

### 2.2 การเชื่อม (Welding)

การเชื่อม หมายถึง การต่อวัสดุโดยให้รวมตัวเข้าด้วยกัน ปกติใช้วิธีทำให้ชิ้นงานหลอม ละลายและการเพิ่มเนื้อโลหะเติมลงในแอ่งหลอมละลายของวัสดุที่หลอมเหลว เมื่อเย็นตัวรอยต่อจะมี ความแข็งแรง บางครั้งใช้แรงดันร่วมกับความร้อน หรืออย่างเดียว เพื่อให้เกิดรอยเชื่อม การเชื่อม สามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding)และ การเชื่อมใน สภาวะของแข็ง (Solid state welding)

การเชื่อมแบบหลอมละลาย คือ การประสานโลหะสองชิ้นให้รอยต่อเกิดเป็นแนวเชื่อมติด เป็นเนื้อเดียวกันตลอดแนวประสานโดยใช้ความร้อนและลวดเชื่อมเติมเนื้อประสาน การเชื่อมอาจจะ ใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อประสานหรืออาจจะไม่ใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อประสานก็ได้ นอกจากนี้ยังจำแนก ชนิดการเชื่อมได้ตามลักษณะของพลังงานความร้อนที่นำมาใช้เชื่อมตามลักษณะของม่านแก๊สที่ปก กลุมบริเวณจุดที่ทำการเชื่อมขณะโลหะหลอมละลายไม่ให้ทำปฏิกิริยากับอากาศได้

การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding)) คือ การประสานโลหะสองชนิดให้ ติดกันโดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานโดยอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เช่น การเชื่อมจุด (Spot welding) การเชื่อมจากเปลวแก๊ส (Gas press welding) การเชื่อมจากสารเคมีพร้อมแรงอัดไม่ใช้ความร้อนเช่น การเชื่อมอัดเย็น (Cold press welding) และการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding)

### 2.3 การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ( Friction Stir Spot Welding : FSSW )

กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด เป็นกระบวนการเชื่อมวัสดุในสถานะของแข็ง (Solid State) ที่ได้รับการพัฒนาบนหลักการพื้นฐานของการเชื่อมกวนแรงเสียดทาน (Friction Stir Welding: FSW ) ซึ่งมีข้อจำกัดในการเชื่อมวัสดุแผ่นบางที่ไม่สามารถทำได้จึงได้มีการพัฒนาการเชื่อม วัสดุแผ่นบางขึ้นมาด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ซึ่งเป็นการเชื่อมวัสดุโดยอาศัยความ ร้อนจากการเสียดสี (Frictional Heating) ระหว่างผิวของแกนหมุนกับเนื้อโลหะหรือวัสดุนั้นๆมี อุณหภูมิที่เกิดขึ้นต่ำกว่าจุดหลอมละลาย จึงส่งผลให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติก (Plastic deformation) กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด มีกระบวนการเชื่อมพื้นฐานดังแสดงใน ภาพที่ 2.2 เครื่องมือเชื่อมที่ประกอบไปด้วยตัวกวนที่หมุนถูกกดลงไปในรอยต่อดังแสดงในภาพที่ 2.2(ก) จนกระทั่งปลายของตัวกวนถูกสอดเข้าไปในระยะที่กำหนดในชิ้นงานที่รอยต่อเกย ความร้อนที่เกิด จากการเสียดทานระหว่างผิวเครื่องมือเชื่อมทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเคลื่อนที่ไหลวน หรือการกวนของเนื้อวัสดุเนื่องจากตัวกวน ดังภาพที่2.2(ข) ทำให้เกิดการรวมตัวของวัสดุบริเวณ จุดเชื่อมที่รอยต่อ ตัวกวนนี้จะถูกสอดแช่อยู่ตามระยะเวลาหนึ่งที่กำหนด จากนั้นตัวกวนจะถูกยกขึ้น ดังภาพที่2.2(ค) และทำให้เกิดรอยเชื่อมเสียทานขึ้นที่ถูดๆหนึ่งบนรอยต่อ [19]





กลไกการรวมตัวของเนื้อวัสดุบริเวณการกวน (Stir zone) ที่ตัวกวนถูกสอดเข้าไปในระยะที่ กำหนดในชิ้นงานที่รอยต่อแสดงดังภาพที่ 2.3 แล้วทำให้เกิดกวามร้อนจากการเสียดสี ระหว่างผิวของ แกนหมุนกับเนื้อโลหะจนเนื้อของโลหะวัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรอยู่ในสภาวะ



ภาพที่ 2.3 กลไกการรวมตัวของรอยต่อในขณะที่วัสดุเกิดการอ่อนตัว [19]

พลาสติก (Plastic deformation) ในขณะที่เกิดการหมุนเครื่องมือเชื่อม วัสดุที่อ่อนตัวบริเวณตัวกวนจะ ถูกดันให้ใหลวนไปตามขอบของตัวกวน ภาพที่2.3(ก) ในขณะเดียวกันบริเวณรอบนอกภายใต้บ่า เครื่องมือเชื่อมวัสดุที่เกิดการอ่อนตัวจะเกิดการใหลวนโดยจะถูกลากไปตามทิศทางการหมุนของ เครื่องมือเชื่อมภาพที่ 2.3(ข) ทำให้เกิดการเชื่อมต่อของวัสดุบริเวณนั้น ดังนั้นตัวแปรต่าง ๆ ของการ เชื่อม จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่จะนำไปสู่ความแข็งแรงของรอยต่อ ตัวแปรการเชื่อมที่สำคัญต่าง ๆ ประกอบไปด้วย

2.3.1 เครื่องมือเชื่อม (ตัวกวน) เป็นอุปกรณ์สำคัญที่เป็นตัวกลางในการหมุนกวนเสียคสิให้เกิด ความร้อนขึ้นระหว่าง ชิ้นงานทั้งสอง ซึ่งเราเรียกว่า เครื่องมือเชื่อมหรือตัวกวน หน้าที่หลักของตัว กวนคือเป็นผิวสัมผัสกับวัสดุชิ้นงานโดยทำให้เกิดความร้อนโดยการเสียคสี (Frictional Heating) และเกิดการรวมของวัสดุรอบรอยต่อในแนวเชื่อมเข้าด้วยกัน [6] ดังนั้นเครื่องมือเชื่อมจึงจำเป็นจะต้อง ทนต่อความร้อนสูงได้โดยไม่เปลี่ยนรูปหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยส่วนประกอบของ เครื่องมือเชื่อม (ตัวกวน) ที่สำคัญจะมี 2 ส่วนคือ

 บ่าให้ความร้อน (Tool Shoulder) คือส่วนที่ให้ความร้อนโดยการหมุนสัมผัสกับ ผิวชิ้นงานที่จะเชื่อมซึ่งความเร็วและพื้นที่สัมผัสของบ่านั้นจะมีผลโดยตรงต่อการให้ความร้อน นอกจากนี้บ่าของหัวกดเชื่อมยังทำหน้าที่ในการส่งแรงกดสู่เนื้อวัสดุเพื่อให้เกิดการซึมลึกของเนื้อ เชื่อมโดยส่วนใหญ่ยังไม่มีการกำหนดหลักเกณฑ์ที่แน่นอนในการกำหนดขนาดของบ่าให้ความร้อน แต่จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาขนาดของบ่าให้ความร้อนที่ดีควรอยู่ที่ 3-4 เท่าของความหนาวัสดุที่ ทำการเชื่อม [6]



ภาพที่ 2.4 ลักษณะรูปร่างและส่วนต่างๆของตัวกวน [6]

2) แถนหมุน (Pin) คือส่วนที่ทำหน้าที่หมุนถวนเนื้อวัสดุที่ได้รับความร้อนจนมี สภาพอ่อนตัวเป็นพลาสติกทำให้เกิดการรวมตัวของเนื้อวัสดุโดยมีลักษณะเป็นแถนยืดออกไปจากบ่า ให้ความร้อน ขนาดของสลักแถนหมุนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่าค่าความหนาของวัสดุ ชิ้นงานซึ่งให้ผลด้านความแข็งแรงของสลักแถนหมุนที่ดี เนื่องจากเป็นส่วนที่ต้องเข้าไปอยู่ในเนื้อของ ชิ้นงานจากข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยในต่างประเทศโดยส่วนใหญ่นิยมให้ระยะห่างระหว่างแผ่นรองหลัง กับผิวปลายหน้าตัดแถนหมุน (Pin) มีระยะเผื่ออยู่ในช่วง 0.3 - 0.1 มิลลิเมตรและเรียกระยะนี้ว่าระยะ Penetration [6] ดังแสดงในภาพที่ 2.4

ลักษณะของเครื่องมือเชื่อมจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าโดยส่วนใหญ่มีลักษณะ เป็นแท่งทรงกระบอกกลม โดยมีบ่าของเครื่องมือ เป็นตัวสัมผัสกับผิวขึ้นงานด้านบนทำให้เกิดการ เสียดสีของวัตถุ และมีตัวกวน ที่เข้าไปอยู่ในเนื้อของชิ้นงานทำให้เกิดการกวนไหลวนของเนื้อวัสดุที่ อ่อนตัวในบริเวณแกนกวน เกิดการรวมตัวกันของเนื้อโลหะทั้งสองทำให้เกิดเฟสของสารประกอบ เชิงโลหะ (Intermetallic Compound, IMC) ขึ้นใหม่บริเวณที่แกนกวนของโลหะแผ่นทั้งสองจึงเชื่อม ติดกันที่บริเวณรอยต่อ

2.3.2 เครื่องกัด (Milling machine) ที่ใช้ในการเชื่อม FSSW เป็นระบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วย กอมพิวเตอร์ (CNC Milling) ที่เป็นตัวกำหนดตัวแปรในการเชื่อมได้แก่ ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) ความเร็วเดินป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที) ของเครื่องมือเชื่อมในการสอดตัวกวนลงสู่รอยต่อและ ระยะเวลาในการกดแช่ (วินาที) ตัวแปรต่างๆเหล่านี้ทำให้เนื้อวัสดุบริเวณแนวเชื่อมเกิดการ เปลี่ยนแปลงโดยความเร็วรอบที่แตกต่างกันนั้นทำให้วัสดุรอบๆ ตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะ หมุนวนที่แตกต่างกันไปและเกิดความร้อนจากการเสียดทานที่ต่างกัน ในขณะเดียวกันความเร็วเดิน ป้อนของเครื่องมือเชื่อมในการสอดตัวกวนลงสู่รอยต่อก็จะทำให้เกิดแรงกดในการเคลื่อนย้ายเนื้อวัสดุ ที่หมุนกวนจากด้านถ่างของตัวกวนไปสู่ด้านบนในขณะที่ระยะเวลาในการกดแช่ ทำให้แนวเชื่อมที่ เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์ที่แตกต่างกันไป ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมนั้นจะมีความสัมพันธ์กันระหว่าง ความเร็วรอบกับระยะเวลาในการกดแช่ในแนวเชื่อมว่าสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใดซึ่งก็ขึ้นอยู่กับวัสดุ ที่ทำการเชื่อมด้วย

#### 2.4 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน

#### 2.4.1 การทดสอบแรงดึง [20]

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นวิธีของการทดสอบหาสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน ซึ่งกวามเสียหายของชิ้นงาน อุปกรณ์ เครื่องจักร ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นมีสาเหตุหลักๆมาจากการรับแรง ดึงกระทำที่มากกว่าความแข็งแรงของชิ้นงาน และจะทำให้เนื้อวัสดุในชิ้นงานแยกออกจากกันหรือเกิด การฉีกขาดและแตกหัก โดยทั่วไปการทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุ ภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกนข้อมูลและการกำนวณในการทดสอบแรงดึงโดยทั่วไปได้แก่ ขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic limit) ร้อยละการยึด (Percent elongation) โมดูลัสความยึดหยุ่น (Modulus of elasticity)ขีดจำกัดแบบสัดส่วน (Proportional limit) ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Percent reduction in area) กวามแข็งแรงดึง (Tensile strength) จุดจำนน (Yield point)และความ แข็งแรงจำนน (Yield strength) เป็นค้น กระบวนการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM มีดังนี้ E8 สำหรับวัสดุโลหะ D638 สำหรับวัสดุพลาสติก D2343 สำหรับวัสดุไฟเบอร์ D897 สำหรับวัสดุกาว D987 สำหรับวัสดุกระดาษ และ D412 สำหรับวัสดุขาง และการทดสอบแรงดึงสำหรับชิ้นทดสอบจะ ใช้ตามแบบมาตรฐาน JIS Z 3136 ดังแสดงในภาพที่ 2.5 และตารางที่ 2.5 [21]



ภาพที่ 2.5 ชิ้นงานทคสอบแรงคึงเฉือนตามมาตรฐาน JIS Z 3136 [21]

ความหนาชิ้นงาน (T)	ความกว้าง (W)	ความยาว (L)	ระยะการต่อเกย
ນີດດີເນຕະ	ນີດດີເນຕຽ	ນີດດີເນຕຽ	(D) ນີດຄືເນຕຽ
น้อยกว่า 0.8	20	75	20
0.8-1.3	30	100	30
1.3-2.5	40	125	40
2.5-3.5	50	150	55
3.5-4.4	50	150	70
4.4-5.0	50	150	80

ตารางที่ 2.5 แสดงขนาคชิ้นงานทคสอบแรงคึงเฉือนตามมาตรฐาน JIS Z 3136 [21]

ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงด้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อ หนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะ พูดถึงความเก้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำ ภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาก่าความเก้นเขียนเป็นสมการได้ดังนี้กือ [22]

$$\sigma = \frac{P}{A}$$
(2.1)

เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1N/m<sup>2</sup>) หรือ kgf/mm<sup>2</sup>หรือ psi (lbf/in<sup>2</sup>)

P = แรงภายนอกที่มากระทำมีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำมีหน่วยเป็น m<sup>2</sup> หรือ mm<sup>2</sup> หรือ in<sup>2</sup>

ความเก้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

(1) ความเก้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน แสดงดังภาพที่ 2.6 ก.



ภาพที่ 2.6 ความเค้น(Stress) ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ [23]

(2) ความเก้นแรงอัค (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับ พื้นที่ภากตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ซึ่งแสดงคังภาพที่ 2.6 ข.



ภาพที่2.7 (ก) แรงเฉือนเดี่ยว (ข) แรงเฉือนกู่ [23]

(3) ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำในทิศทางขนานกับ พื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้อะตอมของวัสดุเคลื่อนออกจากกัน มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หาร ด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.7

2.4.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ความแข็งของวัสดุเป็นตัวซี้สมบัติทางกลที่สำคัญในการด้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่างด้านทานการ ขูดขีดที่ผิว ด้านทานต่อการเสียดสี ด้านทานต่อการกด ด้านทานต่อแรงดึงและ กวามเหนียว โดยปัจจัยที่มีผลต่อถ่าความแข็งของวัสดุนั้นคือโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาและ ส่วนผสมทางเคมีภายในวัสดุ ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะมีความแข็งที่แตกต่างกัน การนำโลหะไปใช้งาน จึงต้องเลือกใช้โลหะที่มีความแข็งที่แตกต่างกันเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานนั้นการใช้ เครื่องมือทดสอบความแข็งที่ผิวของโลหะ จะทำให้ทราบถึงกุณสมบัติของโลหะนั้นว่ามีความแข็งและ ด้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างได้มากน้อยเพียงใด โดยมีการทดสอบความแข็งได้หลายวิธีด้วยกันคือ การวัดความแข็งแบบขิดข่วน (Scratch hardness test) การวัดความแข็งแบบกระดอน (Rebound hardness test) และการวัดความแข็งแบบกด (Indentation hardness test) แต่ละวิชีจะขึ้นอยู่กับลักษณะ การนำไปใช้งานของวัสดุโลหะนั้นซึ่งในงานวิจัยนี้จะวัดค่าความแข็งเป็นจุดๆบนผิวชิ้นงานทดสอบจึง ใช้การทดสอบความแข็งแบบกด (Indentation hardness test) โดยการทดสอบความแข็งของวัสดุแบบ กด(Indentation hardness test) มีอยู่หลายวิธีที่นิยมใช้ได้แก่

> 1) การทคสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Testing ; HB) 2) การทคสอบความแข็งแบบวิคเกอร์ (Vicker Hardness Testing ; HV) 3) การทคสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockewll Hardness Testing ; HR) 4) การทคสอบความแข็งแบบ ทูกอน (Tukon Hardness Test)

การทคสอบความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness) นิยมใช้การทคสอบแบบไมโครวิก เกอร์ (Micro vicker Hardness Testing) โดยค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด ซึ่งแรงที่ใช้เป็นแรงกคงที่โดยความแข็งของวัสคุจะมีผลต่อความลึกของรอยกด หัวกคที่ใช้จะเป็นหัว กดที่ทำด้วยเพชรรูปทรงปีระมิคฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสทุกด้านทำมุม 136 องศาโคยแรงที่ใช้กดมีตั้งแต่ 1-1000 กรัมขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสคุ แสดงคังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งแบบวิคเกอร์ส [23]

ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์จะได้จากการวัดความกว้างของรอยกดที่มีลักษณะเป็น สี่เหลี่ยมจัตุรัสจากนั้นนำมากำนวณก่าความแข็งโดยใช้สูตรที่ 2.2 [23]

$$HV = \frac{354P}{d^2}$$

(2,2)

โดยที่

HV คือ ก่ากวามแข็งแบบวิกเกอร์

- P คือ แรงกด (กรัม)
- d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d1 และ d2 เฉลี่ย (มม.)

วิธีการวัดค่าความแข็งวิธีนี้เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กพื้นที่การวัดความแข็งน้อยแต่ที่ นิยมมากที่สูดคือการนำไปวัดความแข็งของโครงสร้างจุลภาคในวัสดุ การวัดชั้นความแข็งลึกของงาน ที่ชุบผิวแข็งและการวัดความแข็งแนวเชื่อม โดยค่าความแข็งที่วัดได้มีหน่วยเป็น HV (Hardness of vickers hardness testing)

#### 2.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

2.6.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหาภาค (Macro Structure Examination) เป็นการ ตรวจสอบทางกายภาพหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า จุดประสงค์ของการ ตรวจสอบเพื่อดูความสมบูรณ์ของบริเวณจุดเชื่อม ความแตกต่างรูปร่างของการเชื่อมเสียดทานแบบจุด การแบ่งเขตชั้นของรอยเชื่อม ลักษณะการผสมรวมกันของเนื้อโลหะบริเวณพื้นที่กวนเชื่อม (Stir zone) ความกว้างของบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน (Heat affect zone: HAZ) ตลอดจนลักษณะ จุดบกพร่องต่างๆ ของรอยเชื่อม

2.6.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro Structure Examination) เป็นการตรวจสอบ โครงสร้างของโลหะที่ใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกาลังขยายสูงกว่า 10 เท่า ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจาก หลอคไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนสามารถให้ กำลังขยายได้สูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่า เป็นการตรวจสอบเพื่อดูการกระจายตัวและลักษณะ เกรนของโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat affected Zone) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal) สาหรับน้ำยากัดผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคในงานวิจัยนี้ได้กาหนดตามมาตรฐาน ASTM E407-99 ดังตารางที่ 2.6

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดในตริก	กรดในตริก (HNO <sub>3</sub> ) 10	ทองแดงและ	จุ่มหรือเช็ด
	มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 90	ทองเหลือง	นาน 10 -30
	มิถลิลิตร		วินาที
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรด	เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCI3)	ทองแดงผสม	จุ่มหรือเช็คถู
ไฮโดรคลอริก (Ferric	2-5 มิลลิลิตร	S	ด้วยสำลี
Chloride and	กรดไฮโครคลอริก(HCI) 5-	0.5	นาน 5-15 วินาที
Hydrochloric Acid)	30 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 100		
	มิถลิลิตร		
กรคไฮโครฟลูออริก	กรคไฮโครฟลูออริก 1 ถึง 2	อะลูมิเนียมผสม	จุ่มหรือเช็ด
(HydrofluoricAcid)	มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100		นาน 15-45 วินาที
	มิลลิลิตร		

	a	9J						
ตารางที่ 2.6	น้ำยากัดผิ	วชิ้นงานทศ	าสอบด	າາມມາ	ตรฐาน .	ASTM E	2407 <b>-</b> 99 [24	4]

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
โซเคียมไฮครอกไซค์	โซเคียมไฮครอกไซค์	อะลูมิเนียมผสม	เช็คด้วยสำลี
(Sodium Hydroxide)	(NaOH) 1 มิลลิลิตร ผสม		นาน 10-15 วินาที
	กับน้ำ 100 มิลลิลิตร		

ตารางที่ 2.6 น้ำยากัดผิวชิ้นงานทคสอบตามมาตรฐาน ASTM E407-99 [ต่อ]

### 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในงานเชื่อม ที่มีผลต่อสมบัติ ทางโลหะวิทยา สมบัติทางกลของรอยต่อวัสดุต่าง ๆ เช่น

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [25] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด เช่น ความเร็วในการกดตัวกวนลงสู่รอยต่อ ความเร็วรอบของตัวกวน และระยะเวลากดแช่ตัวกวน ต่อ ความแข็งแรงของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ผลการทดลองพบว่า รอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถเกิดขึ้นได้ดีด้วยการเชื่อมด้วย การเสียดทานแบบจุดและแสดงความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่อเกยประมาณ 95% ของความแข็งแรง ของอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการทดลอง การเพิ่มความเร็วในการกดความเร็วรอบของตัวกวน และการเพิ่มระยะเวลาในการกด ทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความเร็วรอบ กาดว่าทำให้กวามร้อนเสียดทานเพิ่มและส่งผลต่อการเกาะยึดระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก

สุทธิพร คงเพีชร์ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ สุรัตน์ ตรัยวนพงษ์ [11] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ เหมาะสมที่สุดต่อความด้านทานแรงดึงเฉือน ในการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Spot Joining : FSJ) ของรอยต่อเกยระหว่าง อลูมิเนียม ผสม 1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACC โดยการ นำเอาเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจานวน 3<sup>3</sup> (Full Factorial Designs) เพื่อศึกษาอิทธิพลของ ความเริ่วรอบของตัวกวน ระยะเวลาในการกดแช่ และความเร็วในการสอดตัว กวน ที่มีผลต่อความด้านทานแรงดึงเฉือนแล้วนำผลการทดลองที่ได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบตัว กวน ที่มีผลต่อความด้านทานแรงดึงเฉือนแล้วนำผลการทดลองที่ได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบตัว กวน ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผล จากนั้นทำการวัดขนาดเพื่อเปรียบเทียบพื้นที่การเชื่อมยึดและ ศึกษาลักษณะการรวมตัวของวัสดุบริเวณอินเตอร์เฟสของรอยต่อที่เกิดการเชื่อมยึดเพื่อเปรียบเทียบผล ในแต่ละความเร็วรอบ ผลการทดสอบความด้านแรงดึงเฉือนของรอยต่อ ที่ระดับ **α** = 0.05 พบว่าค่าที่ เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่าง ๆ คือ ความเร็วรอบของตัวกวน เท่ากับ 4500 รอบ/นาที ระยะเวลาในการ กดแช่ เท่ากับ 2 วินาทีความเร็วในการสอดตัวกวน เท่ากับ 6 มม./ นาที ซึ่งสามารถด้านทานแรงดึง เฉือนสูงสุดได้ 2323.50 นิวตัน
Y. F. Sun , H. Fujii [6] ได้ประสบความสำเร็จในกระบวนการเชื่อม FSSW กับรอยต่อเกย ของโลหะผสม Zr<sub>55</sub> Cu<sub>30</sub> Al<sub>10</sub> Ni<sub>5</sub> (BMG) แผ่นหนา 2 มิลลิเมตรกับทองแดงบริสุทธิ์ พบว่าลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคบางส่วนมีลักษณะคล้ายพื้นเลื่อยเกิดขึ้นที่ขอบของแผ่น BMG และบาง นิวเคลียส (Nucleuses) ขนาดนาโนที่กระจัดกระจายอยู่ในด้าน BMG ตามอินเตอร์เฟสร่วม Cu / BMG ที่ด้านบนของทองแดง (Cu) ใกล้กับรูแกนเชื่อม (Key Hole) ขึ้นส่วน BMG ถูกฝังอยู่ในเนื้อแท้ของ ทองแดง ผลที่ตามมาอย่างมีนัยสำคัญของการทดสอบแรงดึงเฉือนแสดงให้เห็นว่ารอยต่อของทองแดง (Cu) กับ BMG รอยต่อพังทลายที่แรงดึงสูงสุด 2300 นิวตัน ผ่านพื้นที่บริเวณกวนพังทลายแบบดึงฉีก ขาดออกมา

T. Saeida, A. Abdollah-zadehb, B. Sazgarib [26] ได้ศึกษารอยต่อเกยของโลหะผสม อลูมิเนียม 1060 และทองแดงบริสุทธิ์ โดยการเชื่อมเสียดทานกวนและผลของความเร็วในการเชื่อม บริเวณผิวสัมผัสinterface) ศึกษาทางสัณฐานวิทยา,และความแข็งแรงที่ถูกตรวจสอบ ผลการทดลอง พบว่าในอลูมิเนียมใกล้กับบริเวณผิวสัมผัส (interface) จะเกิดโลหะประกอบ Al /Cu มีพื้นที่มืดที่ถูก สร้างขึ้นในบริเวณนี้สารประกอบโลหะ (intermetallic) ของ Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> และ Al<sub>2</sub>Cu และบางส่วนตรวจ พบการแตกร้าว (Microcracks) จำนวนของการแตกร้าว (Microcracks) ดังกล่าวลดลงด้วยความเร็วการ เชื่อมที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าความเร็วสูงขึ้นในการเชื่อมจาก 118 และ 190 มม./นาที, ข้อบกพร่อง ที่เป็นโพรงกำลังก่อตัวขึ้นภายในรอยต่อเป็นผลมาจากความร้อนไม่เพียงพอ ผลของการทดสอบแรง ดึงเฉือนเผยให้เห็นว่าแรงดึงเลือนสูงสุดของรอยต่อได้ที่ความเร็วการเชื่อมจาก 95 มม./ นาที ที่ ความเร็วการเชื่อมนี้ ไม่มีข้อบกพร่องในโพรงและรอยแตกร้าว (Microcracks) น้อยที่พบในการเชื่อม



# บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การคำเนินการวิจัยนี้ใช้กรรมวิธีการการเชื่อมเสียคทานกวนแบบจุคโดยใช้ อลูมิเนี่ยมผสม AA5052 และทองแดงผสม C11000 ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร เป็นชิ้นงานทคลองเชื่อม แผ่นโลหะทั้ง สองอยู่ในลักษณะต่อเกยกัน โดยเชื่อมด้วยตัวกวนรูปแบบเดียว แล้วนำชิ้นงานที่เชื่อมแล้วไปศึกษา สมบัติทางกล และตรวจสอบโครงสร้างมหาภาคและจุลภาค การวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการคำเนินการ ดังนี้

### 3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย

3.1.1 วัสคุที่ใช้ในการทคลอง

1) อลูมิเนียมผสม AA5052 วัสดุที่ใช้ในการทดลองขนาดที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3136 ขนาดกวามยาว 100 มิลลิเมตรทิศทางตามการรีดขึ้นรูป ขนาดกวามกว้าง 30 มิลลิเมตร และ กวามหนา 1 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมเกรด 5052 (AA5052) (ร้อยละ โดยน้ำหนัก %)

อลูมิเนียมผสม AA5052											
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Sn	Pb	Cr
96.32	0.147	0.360	<0.024	0.036	2.897	0.003	< 0.01	<0.010	0.012	0.032	0.17

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมเกรด 5052 (AA5052)

ความแข็งแรงดึงเฉือน(N)	Elongation (%)	ความแข็ง (HV)
6298.67	4.34	65.72



2) ทองแคงผสม C11000 ขนาดที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z3136 ขนาดกวาม
ยาว 100 มิลลิเมตร ทิศทางตามการรีดขึ้นรูป ขนาดกวามกว้าง 30 มิลลิเมตร และกวามหนา 1
มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3.2

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเกมีของทองแคงผสมเกรค C11000 (ร้อยละ โดยน้ำหนัก %)

ทองแดงผสม C11000									
Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Si	Mn	Al	Cr
99.93 < 0.008 < 0.008 0.019 < 0.010 < 0.010 < 0.008 0.013 < 0.010 0.012									

ตารางที่ 3.4 สมบัติทางกลของ ทองแดงผสม C11000

ความแข็งแรงดึงเฉือน(N)	Elongation (%)	ความแข็ง (HV)
6552.33	16.22	67.21
le l	man. ก. สีเรางง	



ภาพที่ 3.2 ขนาคชิ้นงานทคลองในการเชื่อม ทองแคงผสม C11000 (Unit : mm)

 การเตรียมชิ้นงานทดสอบในลักษณะการต่อเกยโดยให้ อลูมิเนียมผสม AA5052 อยู่ ด้านล่างและ ทองแดงผสม C11000 อยู่ด้านบน มีระยะการซ้อนเกยที่ 30 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.3



3.1.2 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือ

 อุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงานทดสอบ (Fixture) เป็นอุปกรณ์ในการจับยึดชิ้นงาน ตัวอย่างในการเชื่อม เพื่อให้ชิ้นงานตัวอย่างสามารถจับยึดได้อย่างมั่นคงถูกต้องในตำแหน่งที่ทำการ เชื่อมที่ตำแหน่งเดียวกันในทุกๆชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการเชื่อม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องนำไปทำการ วิจัยต่อไป การออกแบบอุปกรณ์ในการจับยึด ในการเชื่อมเสียทานกวนแบบจุด จะออกแบบโดยศึกษา พิจารณาจากรูปแบบของการจัดวางชิ้นงานตัวอย่างในลักษณะการต่อเกย ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ลักษณะแบบร่างการวางชิ้นงานทุคลองในการเชื่อม

อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน(Fixture) ในการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ดังภาพที่3.5 มี ส่วนประกอบหลักที่สำคัญดังนี้



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดลอง (Fixture) 1:แผ่นฐานรองงาน 2:แผ่นกดทับชิ้นงาน 3:สลักนำ 4 : สลักเกลียวยึด (1) แผ่นฐานรองงาน มีหน้าที่ในการรองรับชิ้นงานในขณะทำการเชื่อม สามารถจับ ยึดกับโต๊ะเครื่องกัดหรือจับยึดด้วยปากกาจับชิ้นงานบนเครื่องกัดให้มีความมั่นคงแข็งแรงมากที่สุดได้ ในขณะทำการเชื่อม

(2) แผ่นกดทับชิ้นงาน มีหน้าที่ในการกดทับชิ้นงานทดสอบไม่ให้หลุดจากแผ่น ฐานรองงานขณะทำการเชื่อม เพื่อให้สามารถจับยึดชิ้นงานได้แน่นและมั่นคงและรวดเร็วในการ ทำงาน และออกแบบให้ตรงกลางของแผ่นกดทับมีรูตรงกลางเพื่อเปิดเป็นตำแหน่งสำหรับการเชื่อม เสียดทานแบบจุด

(3) สลักนำ สวมอัคติคกับแผ่นฐานรองมีหน้าที่เป็นแกนสลักไกค์นำสวมประกอบให้ รวคเร็วและตรงตำแหน่งทุกกรั้งกับแผ่นกคทับชิ้นงานเมื่อมีการถอคและประกอบในการจับยึดชิ้นงาน ทคสอบ

(4) สลักเกลียวยึด มีหน้าในการยึดแผ่นกดทับชิ้นงานทดสอบกับแผ่นฐานรองงาน เพื่อจับยึดชิ้นงานทดสอบไม่ให้ขยับเลื่อนหรือหลุดออกจากตำแหน่งในการเชื่อม

2) เครื่องมือเชื่อม (Welding Tool) ในการเชื่อมเสียคทานกวนแบบจุคตัวกวน คือเครื่องมือ ในการเชื่อมที่ทำให้เกิดการเสียคทานขึ้นระหว่างบ่าตัวกวนที่หมุนกับชิ้นงานจนทำให้เนื้อโลหะของ ชิ้นงานอยู่ในสภาวะที่เป็นพลาสติก (Plastic Deformation) และถูกตัวกวน (Pin) หมุนกวนเนื้อวัสดุที่ อยู่ในสภาวะพลาสติกให้รวมประสานติดกัน ดังนั้นตัวกวนต้องเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อแรงกด แรงสั่นสะเทือนและอุณหภูมิที่สูงได้โดยไม่เปลี่ยนรูปร่างดังนั้นตัวกวนจึงต้องมีความแข็งมากกว่า วัสดุชิ้นงานทดสอบ ซึ่งในการวิจัยนี้เครื่องมือเชื่อมหรือตัวกวนทำจากเหลีกกล้า SKD11 ซึ่งมีสมบัติที่ แข็งและทนความร้อนได้สูงมีส่วนผสมทางเกมีดังแสดงในตารางที่ 3.5

	เหล็กกล้าเครื่องมือเย็น SKD 11								
С	C Si Mn P Cr Mo V W Ni Other								
1.48	0.3	0.20	0.02	11.0	0.77	0.68	0.066	0.26	-

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11

เครื่องมือเชื่อมหรือตัวกวนที่ใช้ในการทคลองนี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญ แสดงคัง ภาพที่ 3.6

(1) ก้านจับยึด (Body) เป็นส่วนที่ใช้ ในการจับยึดกับหัวจับของเครื่องกัด
(2) บ่า (Shoulder) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่กดให้เกิดการเสียดทานระหว่างบ่าตัวกวนกับ

เนื้อของวัสดุจนทำให้เนื้อวัสดุผสานติดกัน ซึ่งบ่าตัวกวนในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

(3) แกนกวน (Pin) มีหน้าที่กวนเนื้อวัสดุที่เกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะพลาสติกตรง แกนกลางพื้นที่เชื่อม(Stir zone)ให้เกิดความการหลอมผสานติดกันระหว่างวัสดุทดสอบทั้งสอง



ภาพที่ 3.6 ขนาดและรูปร่างของเครื่องมือเชื่อม

 เครื่องกัดสำหรับการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องกัดตั้ง แบบที่ควบกุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (CNC Milling) ยี่ห้อ CHEVALIER รุ่น QP 2026 – L แสดงดัง ภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องกัด CNC Millingที่ใช้สำหรับการเชื่อม

### 3.2 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง

ใด้มีการศึกษาอิทธิพลตัวแปรในงานเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ที่มีผลต่อสมบัติ ทาง โลหะวิทยา สมบัติทางกลของรอยต่อวัสดุต่างชนิดกัน จากผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา เช่น

กิตติพงษ์ กิมพงศ์ [25] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของ รอยต่อเกยอลูมิเนียมเกรด 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ผลการทคลองพบว่ารอยต่อเกยสามารถ เชื่อมติดและมีกวามแข็งแรงสูงสุด 1980 นิวตัน ที่สภาวะตัวแรในการเชื่อมด้วยกวามเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที กวามเร็วในการกดตัวกวน 8 มม./นาที และเวลาในการกดแช่ที่ 3 วินาที ซึ่งการเพิ่มความเร็ว รอบ กวามเร็วในการกดตัวกวนและเวลาในการกดแช่ที่อินเทอร์เฟสของรอยต่อ ทำให้ก่ากวามแข็งแรง ของรอยต่อเกยเพิ่มขึ้น

สุทธิพร คงเพ็ชร์ [11] ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบตัวกวน ระยะเวลาในการกดแช่ และความเร็วในการสอดตัวกวน ที่มีอิทธิพลต่อความด้านทานแรงคึงเถือน ในการเชื่อมเสียดทานกวน แบบจุดของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมผสม 1100 และเหล็กกล้าเกลือบสังกะสี SGACC พบว่า ความเร็วรอบของตัวกวนที่ 4500 รอบ/นาที ระยะเวลาในการกดแช่ 2 วินาที และความเร็วในการกดตัว

กวน 6 มม./นาที เป็นสภาวะตัวแปรที่ให้ก่ากวามต้านทานแรงคึงเฉือนสูงสุด 2323.50 นิวตัน วัชรพงษ์ พิญญะพันธ์ [27] การเชื่อมด้วยการเสียดทานกวนแบบจุดบนรอยต่อเกยระหว่าง อลูมิเนียม AA 5052 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติค430 ผลการทคลองพบว่า การเชื่อมที่ได้ค่าแรง พังทลายสูงที่สุดคือการเชื่อมแบบต่อเกยที่มีค่าแรงพังทลายเป็น 486 นิวตัน ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ ต่อนาที อัตราการป้อนที่ 6 ม.ม.ต่อนาที และการกดแช่ 2 วินาที และการเชื่อมที่ได้ค่าแรงพังทลายต่ำ ที่สุดคือการเชื่อมบนรอยต่อแบบประกบที่มีค่าแรงพังทลายเป็น 80 นิวตันที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ ต่อนาทีที่เวลากดแช่ 2 วินาที และอัตราการป้อนที่ 4 ม.ม.ต่อนาที

ใด้ศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาแล้ว จึงได้ทำการทดลองเชื่อมบนรอยต่อเกยอลูมิเนี่ยมผสม AA 5052 และทองแดงผสม C11000 ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบ/นาที ความเร็วป้อนตัวกวนที่กดลงสู่ อินเทอร์เฟสบนรอยต่อเกย 1 มม./นาที และเวลาในการกดแช่ตัวกวนที่ 1 วินาที ผลการทดลองพบว่า เมื่อเปิดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานออกหลังจากเชื่อมเสร็จพบว่าเมื่อยกชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึด ชิ้นงานทดลองทั้งสองชิ้นไม่สามารถติดกันได้ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ชิ้นงานทคลองที่ไม่สามารถเชื่อมติด ด้วยกวามเร็วรอบ 200 รอบ/นาที กวามเร็วเดินป้อน 1 มม./นาที และเวลากดแช่ 1 วินาที

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด และ ได้ประยุกต์ใช้เครื่องกัดอัต โนมัติที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC Milling) ในการเชื่อม โดยจะ ควบคุมตัวแปรต่างๆตามที่กำหนดในการทดลอง ซึ่งได้แก่ ความเร็วรอบของตัวกวน อัตราความเร็วใน การสอดตัวกวนและระยะเวลาในการกดแช่ตัวกวน ในแต่ละตัวแปรจะมีอยู่ 4 ระดับดังนี้ 1) ความเร็วรอบตัวกวน มี 4 ระดับคือ 2500, 3000, 3500 และ 4000 รอบ/นาที 2) ความเร็วในการสอดตัวกวนมี 4 ระดับคือ 2, 4, 6 และ 8 มม./นาที 3) ระยะเวลาในการกดแช่ตัวกวนมี 4 ระดับคือ 2, 4, 6 และ 8 วินาที

4) ความลึกของการสอดตัวกวนที่กดลงไปโดยวัดระยะจากผิวด้านบนของแผ่นทองแดง ผสมกคลึกลงไปมีระยะเท่ากับ 1 มม.

## 3.3 กระบวนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

 การเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม ชิ้นงานถูกนำมาขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 250 และ 500 เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อยู่บนพื้นผิวของอลูมิเนียมและทองแดงบริเวณพื้นที่รอยต่อเกยที่ผิวต้อง สัมผัสกัน จากนั้นทำการเช็ดด้วยอะซิโตนอีกครั้ง เพื่อทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่เกิดจากการขัดด้วย กระดาษทราย ก่อนทำการเชื่อม แสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม

2) ทำการจับยึดชิ้นงานบนอุปกรณ์จับยึด

(1) วางชิ้นงานทคสอบลงในอุปกรณ์จับยึคที่ยึคแน่นไว้บนแท่นเครื่องกัค ในลักษณะ การต่อเกยโคยให้ แผ่นอลูมิเนียมผสม AA5052 อยู่ด้านล่างและ แผ่นทองแคงผสม C11000 อยู่ด้านบน ดังภาพที่ 3.10





ภาพที่ 3.10 จับยึคชิ้นงานบนอุปกรณ์จับยึค

(2) นำแผ่นกดทับชิ้นงาน มาสามปิดกดทับชิ้นงาน โดยขันยึดด้วยสลักเกลียวให้แน่น ก่อนทำการเชื่อม ดังภาพที่ 3.10

3) การตรวจสอบความเรียบร้อยของชิ้นงาน หลังจากที่ทำการเชื่อมเสร็จ และทำการ ตรวจสอบตัวกวนทุกครั้งหลังการเชื่อมและทำความสะอาดตัวกวนด้วยอะซิโตน ก่อนการทำการเชื่อม ชิ้นงานชิ้นต่อไปทำให้ได้ชิ้นงานเชื่อมที่สมบูรณ์ ดังภาพที่3.11



ภาพที่3.11 ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม

### 3.4 การทดสอบความแข็งแรงดึงเฉือน

การทคสอบความสามารถในการรับแรงดึงเฉือน ทำการนำชิ้นงาน หลังจากเชื่อมแล้วตาม ตัวแปรที่กำหนด มาทำการทคสอบแรงดึงเฉือนด้วยเครื่องทคสอบแรงดึง (Universal testing machine) ยี่ห้อ HUALONG ขนาด 60 ตัน โดยใช้ความเร็วในการดึงเกลื่อนที่ (Displacement speed) 2 มม./นาที และแรงในการดึง (Load speed) 0.509 MPa/s โดยทำการจับยึดชิ้นงานให้พื้นที่การเชื่อมอยู่ในแนว เดียวกับแนวแรงดึงและดึงจนแนวเชื่อมหรือชิ้นงานขาดหรือฉีกออกจากกัน และบันทึกก่าแรงดึงเฉือน สูงสุด ดังภาพที่ 3.12 และ 3.13



ภาพที่ 3.12 การจับยึคชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทคสอบแรงคึงเฉือน



ภาพที่ 3.13 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

## 3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macro Structure) และจุลภาค (Micro Structure) ของรอย เชื่อม

 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม (Macro Structure) รอยต่อถูกนำมาทำ การตัดที่กึ่งกลางแนวเชื่อมและทำการขึ้นรูปเย็นด้วยเรซิ่น ดังแสดงในภาพที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การเตรียมชิ้นตรวจสอบโครงสร้างมหาภาคและ โครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานขึ้นรูปถูกทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 360- 4000 และขัดมันด้วย ผ้า สักกะหลาดกับผงเพชร (Diamond) 1-3 ไมครอน ด้วยเครื่องขัดจานหมุน ดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 เครื่องขัดจานหมุน

ชิ้นงานที่ผ่านการขัดมันถูกถ้างด้วยน้ำและเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ ขั้นตอน ต่อไปทำการกัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายกรดไฮโดรกลอริก (HCL) กรดไนตริก (HNO<sub>3</sub> ) กรด ใฮโครฟลูออริก (HF) และน้ำกลั่น (H<sub>2</sub>O) ใช้เวลาในการเช็คหรือจุ่มแช่นาน 10 วินาที จากนั้นล้างกรด ด้วยน้ำและเอทานอลและเช็คทำความสะอาคด้วยแอลกอฮอล์ เป่าแห้งด้วยลมร้อน จากนั้นนำชิ้นงาน ทดสอบมาส่องดูโครงสร้างมหาภากด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical micro scope) ที่กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า ยี่ห้อ LEICA รุ่น SDM2500M และตรวจสอบความสมบูรณ์ของบริเวณรอยเชื่อม ดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Micro Scope)

2) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม (Micro structure) ชิ้นงานที่ผ่านการเตรียม ชิ้นงาน เพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ถูกนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยทำการ ตรวจสอบการกระจายตัวของเฟสลักษะเกรน โครงสร้างบริเวณโลหะเชื่อม พื้นที่กระทบร้อน และ โลหะเดิม (Base metal) ตามลำดับ

#### 3.6 การทดสอบความแข็ง ( Hardness Test)

การทดสอบความแข็ง สามารถนำชิ้นที่ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้นไปทำการตรวจสอบ ความแข็งได้ การทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM E92-82 โดยใช้เครื่องทดสอบไมโครวิกเกอรส์ ยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น .T-X7-LCD กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของบริเวณเนื้อแนวเชื่อม (Weld Metal) และ บริเวณกระทบร้อน(Heat Affect Zone) และโลหะเดิม (Base Metal) ระยะห่างของรอยกดประมาณ 1 มม. ทั้งสองด้าน ด้านละ 10 จุด โดยใช้แรงกด 10 กรัม (gf) และใช้เวลาในการกดประมาณ 10 วินาที ดังภาพที่ 3.17 แสดงแนวตำแหน่งในการวัดก่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมที่รอยต่อเกยอลูมิเนียมผสม AA5052 และทองแดงผสม C11000 และภาพที่ 3.18 แสดงลักษณะเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิก เกอรส์



ภาพที่ 3.17 ชิ้นงานทคสอบความแข็ง



ภาพที่ 3.18 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอรส์ ยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น T – X7-LCD



# บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาการทดลองกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุดเพื่อหาอิทธิพลของตัวแปรการ เชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกยระหว่าง อลูมิเนียมผสม AA5052 และทองแดงผสม C11000 แล้วนำผลมาวิเคราะห์ซึ่งในการทดลองได้กำหนดตัวแปรไว้ ดังนี้คือ ตัวแปรต้น ได้แก่ ความเร็วรอบ ความเร็วเดินป้อนเชื่อม และเวลาในการกดแช่ ที่มีอิทธิพลต่อ ตัวแปรตาม ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม, ค่าความแข็งบริเวณรอย เชื่อม ที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุด ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

## 4.1 อิทธิพลของความเร็วป้อนที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกย

ตัวแปรการทคลองประกอบค้วยความเร็วเดินป้อน 1-8 มม./นาที ความเร็วรอบตัวกวน 2000 – 2500 รอบต่อนาทีและเวลากคแช่ 1-2 วินาที

แนวเชื่อมจุด	Cu แผ่นบนด้านล่าง	Al แผ่นล่างด้านบน
(fi) Shoulder stir zone	(1) Weld area	(n) Unbonded area
Pin stie zone 2mm	Fracture path . 2mm.	Fracture path 2mm.

ภาพที่ 4.1 รอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 1 มม./นาที ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที และ เวลากดแช่ 1 วินาที (ก) รอยเชื่อมที่แผ่นทองแดง (ข) รอยเชื่อมที่แผ่นทองแดงด้านล่าง (ก) รอยเชื่อมที่แผ่นอลูมิเนียมด้านล่าง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเชื่อมเพื่อหาสภาวะตัวแปรในการเชื่อมที่เหมาะสมโดยได้ทำ การกำหนดตัวแปรในการเชื่อมเบื้องต้น ที่กวามเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อนตัวกวน มม./นาที และเวลากดแช่ที่ 1 วินาที จากการทดลองพบว่า เมื่อเปิดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานออกหลังจาก เชื่อมเสร็จ ปรากฏว่าบริเวณรอยต่อชิ้นงานขยับได้และเมื่อยกชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึด ชิ้นงาน ทดลองทั้งสองชิ้นไม่สามารถติดกันได้แสดงดังภาพที่ 4.1(ก) บริเวณแกนกวน (Pin stir zone) โลหะทองแดงถูกกวนหลุดออกไปเป็นรูเนื่องจากกวามลึกในการกดตัวกวน 1 มม.ซึ่งเท่ากับความหนา ของชิ้นงานทดลอง แต่ไม่พบอลูมิเนียมไหลขึ้นมาที่บริเวณแกนกวนและบ่ากวน (Shouder stir zone) อาจเป็นที่สังเกตอย่างหนึ่งได้ว่า เป็นสภาวะการเชื่อมที่ความเร็วรอบที่ต่ำและความเร็วป้อนในการกด ตัวกวนที่ช้า ทำให้เกิดกวามร้อนจากการเสียดทานและแรงกดน้อยเกินไปทำให้เนื้อโลหะทั้งสองไม่ กวนเข้าหากันบริเวณแกนกวนและบ่ากวน และที่บริเวณขอบบ่าด้านนอกมีกรีบเกิดขึ้นลักษณะที่เป็น เส้นฝอยม้วนคล้ายเสษโลหะที่ถูกตัดเลือนอาจเป็นสาเหตุมาจากความเร็วเดินป้อนที่ช้ามากเกินไปทำ ให้เป็นการตัดเฉือนหรือขูดเนื้อโลหะออก ภาพที่ 4.1(ข) แสดงบริเวณรอยเชื่อมของแผ่นทองแดง ด้านล่าง ไม่พบโลหะเชื่อมที่เกิดจากการกวนรวมกันของเนื้อโลหะทั้งสอง (Bonded) บริเวณรอยเชื่อม (Weld area) และภาพที่(ก) แสดงบริเวณรอยเชื่อมของแผ่นอลูมิเนียมด้านล่าง พบว่าบริเวณรอยเชื่อม อลูมิเนียมมีผิวกล้ำขึ้นจากกระบวนการเชื่อมแต่ไม่เกิดการรวมกันของเนื้อโลหะ (Unbonded) ทำให้ไม่ เกิดการติดกันของชิ้นงานทั้งสองที่เชื่อมด้วยสภาวะตัวแปรดังกล่าวนี้



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่ 2 วินาที ที่ความเร็วเดินป้อน (ก) 2 มม./นาที (ข) 4 มม./นาที (ก) 6 มม./นาที (ง) 8 มม./นาที

ภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินป้อนในการเชื่อม 2-8 มม./นาที ในเวลากดแช่คงที่ 2 วินาที พบว่าลักษณะ ของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ชิ้นงานสามารถเชื่อมติดกันได้ดี แต่ทุกสภาวะของความเร็วเดินป้อนใน การเชื่อมส่งผลให้รอยเชื่อมมีลักษณะที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปภาคตัดแนวขวางของรอยเชื่อม (I) และ ลักษณะของรอยเชื่อมจุด (II) ที่ภาคตัดแนวขวางพบว่าเนื้อของโลหะทองแดงถูกกวนไหลขึ้นไปเป็น ครีบม้วนพับโดยรอบนอกขอบบ่าทำให้บ่ากวนมีขนาดเส้นผ่าสูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอก (D) และ

้ความสูงของขอบบ่า (X) มีระยะแตกต่างกันในแต่ละความเร็วเดินป้อน ดังภาพที่4.2 (ก) เชื่อมด้วย ้ความเร็วเดินป้อน 2 มม./นาที ลักษณะของรอยเชื่อม (I) และ (II) เกิดครีบที่รอบขอบบ่ามีลักษณะที่ กว้างส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าสูนย์กลาง D มีขนาดที่โตเท่ากับ 12.10 มม.ความเร็วเดินป้อนกวนที่ช้าทำ ให้บ่ากวนที่เป็นทองแคงยกตัวขึ้นสูงวัคระยะ x ขอบบ่าทั้งสองข้างเฉลี่ยเท่ากับ 1.73 มม. ภาพที่4.2 (ข) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 4 มม./นาที ลักษณะของรอยเชื่อมจุดที่ (I) และ (II) มีลักษณะการเกิด ้ครีบรอบขอบบ่ากวนที่กว้างใกล้เคียงกับการเชื่อมที่ความเร็วเดินป้อน 2 มม./นาที อาจเป็นเพราะ ้ความเร็วเดินป้อนที่ต่ำใกล้เคียงกันซึ่งวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D ได้เท่ากับ 12.04 มม.และความสูง ้งอบบ่าเฉลี่ย 1.72 มม. ภาพที่4.2 (ค) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที สังเกตจากรอยเชื่อมจุดที่ (I) และ (II) มีครีบเกิดชึ้นที่รอบขอบบ่าแคบลง อาจเป็นเพราะความร้อนที่สูงขึ้นจากการเสียดทานของ ้ความเร็วเดินป้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้โลหะทองแคงอ่อนตัวและเนื้อบริเวนการเชื่อมกวนส้นขึ้นไปเป็น ้ครีบที่ขอบบ่าลคน้อยลงส่งผลให้ขนาคเส้นผ่าศูนย์กลาง D ลุคลง มีขนาคเท่ากับ 11.92 มม.และความ สูงขอบบ่าลคลงเช่นเดียวกันมีค่าเฉลี่ย 1.54 มม. ภาพที่4.2 (ง) เป็นการเชื่อมค้วยความเร็วเดินป้อน สูงสุด 8 มม./นาที่ลักษณะของรอยเชื่อม (I) และ (II) เกิดครีบที่รอบขอบบ่ากวนของรอยเชื่อมมีความ ใกล้เคียงกับการเชื่อมที่ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที ซึ่งอาจเป็นเพราะเหตุผลเดียวกันคือความเร็วเดิน ป้อนเพิ่มขึ้นทำให้ทองแดงอ่อนตัวมากจากความร้อนที่สูงจากการเสียดทานในกระบวนการเชื่อมและ ทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D ลดลงอีกมีค่าเท่ากับ 11.86 มม. และความสูงที่ขอบบ่า 1.42 มม. สรุป ใด้ว่าหากเชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 2-4 มม./นาทีเป็นความเร็วเดินป้อนที่ช้าทำให้เกิดความร้อนจาก การเสียดทานต่ำโลหะทองแดงบริเวณการเชื่อมกวนจึงมีการอ่อนตัวน้อยทำให้บ่าตัวกวนดันเนื้อของ ทองแดงให้ไหลตัวขึ้นเป็นครีบไปที่รอบๆขอบบ่ากวนเป็นจำนวนมากส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลาง D มี งนาดที่กว้างและความสูงขอบบ่า X มีระยะที่สูง ขณะเดียวกันหากเชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อนที่เร็วขึ้น เป็น 6-8 มม./นาที ทำให้เกิดความร้อนสูงจากการเสียดทานในกระบวนการเชื่อมทำให้โลหะทองแดง ้อ่อนตัวเมื่อเกิดแรงกดจากกวามเร็วเดินป้อนและยุบตัวเมื่อตัวกวนถอนตัวขึ้นในกระบวนการเชื่อม ้ส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลาง D และความสูงขอบบ่า X มีขนาคที่ลคลงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างภาคตัดรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที และเวลากดแช่ 2 วินาที(ก) โครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอและอินเทอร์เฟสของรอยต่อที่ความเร็วเดิน ป้อน (ข) 2 มม./นาที(ก) 4 มม./นาที (ง) 6 มม./นาที และ (จ) 8 มม./นาที

ภาพที่4.3 (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างภาคตัดของรอยต่อเกยทองแดงผสม C11000 กับ อลูมิเนียมผสม AA5052 พบว่าคำแหน่งรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดที่กดลงบน รอยต่อ ปรากฏบนแผ่นทองแดงผสม และรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์สามารถเชื่อมติดกันได้ดี บริเวณ อินเทอร์เฟสระหว่างโลหะทั้งสอง ที่ใต้บ่ากวนทั้งสองข้างเกิดเป็นโลหะเชื่อม (Weld matel) ขึ้นจาก กระบวนการเชื่อมซึ่งเรียกว่า ตะขอ(Hook) W. Yuan et al. [28] กล่าวว่าบริเวณพื้นที่ ที่เกิดการรวมตัว ของเนื้อโลหะทั้งสอง (Bonded) คือถักษณะการเกิดตะขอ จากความแตกต่างในการไหลของวัสดุที่ด่า และอัตราการหมุนเครื่องมือที่สูงกว่า ในระหว่างการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด วัสดุที่ผ่านการ เปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างรุนแรงและวงจรกวามร้อนจากการเสียดทาน วัสดุอ่อนที่ถูกส่งมาจาก พลังของแถนถวนและบ่าของเครื่องมือเชื่อม จากนั้นจะถูกปล่อยออกมาและไหลขึ้นไปในโซนของ การกวน และใต้บ่าเกรื่องมือกวน ซึ่งความสูงของตะขอใต้บ่ากวนนี้มีลักษณะและความสูงที่แตกต่าง กัน จะขึ้นอยู่กับตัวแปรในกระบวนการเชื่อม ดังภาพที่ 4.3 (ข) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 2 มม./นาที ลักษณะของตะขอ เกิดขึ้นเล็กน้อยบริเวณใต้บ่ากวนทั้งสองข้าง เนื่องจากความเร็วรอบและเวลาเดิน ป้อนที่ช้าทำให้เกิดโลหะเชื่อมจากพันธะของโลหะ (boned) ใต้บ่ากวนทั้งสองข้างน้อยมีกวามสูงเลลี่ย เท่ากับ 0.083 มิลลิเมตร ภาพที่ 4.3(ค) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 4 มม./นาที พบว่ามีการก่อตัวของ โลหะเชื่อมมากขึ้นจากความเร็วเดินป้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ตะขอมีความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 0.136 มิลลิเมตร ภาพที่ 4.3 (ง) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที เป็นสภาวะของตัวแปรที่ทำให้เกิดโลหะเชื่อมที่ เป็นตะขอใต้บ่ากวนเพิ่มสูงกว่าความเร็วเดินป้อน 2-4 มม./นาทีแต่มีความหยาบของเนื้อโลหะที่เกิด จากพันธะทางโลหะใกล้เคียงกันและทำให้ของตะขอมีความสูงเท่ากับ 0.164 มิลลิเมตร ภาพที่ 4.3(ง) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 8 มม./นาที ลักษณะตะขอมีความสูงเท่ากับ 0.164 มิลลิเมตร ภาพที่ 4.3(ง) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 8 มม./นาที ลักษณะตะขอมีการก่อตัวของโลหะเชื่อมที่ลดน้อยลงจากตัว แปรในการเชื่อมที่ความเร็วรอบตัวกวนและเวลากดแช่ที่ต่ำแต่ความเร็วเดินป้อนสูงหรือแรงกดตัวกวน ในการเชื่อมลงสู่อินเทอร์เฟสที่สูง อาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้การเกิดการรวมกันของเนื้อโลหะทั้งสอง ที่เป็นตะขอต่ำมีความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 0.099 มิลลิเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าตัวแปรในการเชื่อมที่ความเร็วดิน ป้อนต่างๆมีความสัมพันธ์ต่อการรวมตัวกันของเนื้อโลหะที่เกิดจากการกวนบริเวณใด้บ่ากวนซึ่งส่งผล ให้ ตะขอมีลักษณะและความสูงที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคึงเฉือน ความสูงของตะขอ และความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่กงที่ 2 วินาที

ภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงเฉือนกับความสูงของตะขอและ ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่กงที่ 2 วินาที พบว่าหากทำการเชื่อมที่ความเร็วเดินป้อน 2 มม./นาที จะมีลักษณะการเกิดตะขอที่ต่ำ กาดว่า อาจเกิดจากกวามร้อนจากการเสียดทานที่บริเวณอินเทอร์เฟสไม่เพียงพอ ทำให้เกิดกระบวนการเชื่อม กวนที่ไม่สมบูรณ์ จึงส่งผลให้กวามแข็งแรงดึงเฉือนมีก่าต่ำ ขณะเดียวกันเมื่อกวามเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้น กวามแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อมีก่าสูงขึ้นและมีก่าสูงสุด 583.52 นิวตัน ที่กวามเร็วเดินป้อน 6 มม./ นาที และเมื่อกวามเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้นเป็น 8 มม./นาทีปรากฏว่ากวามแข็งแรงดึงเฉือนลดต่ำลง และ วัดกวามสูงของตะขอใต้บ่ากวนทั้งสองข้าง ดังแสดงในภาพที่4.3 พบว่ากวามสูงตะขอใต้บ่ากวนเพิ่ม สูงขึ้น เมื่อกวามเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้นและส่งผลทำให้ก่ากวามแข็งแรงดึงเฉือนเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากผล การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า กวามสูงของตะขอใต้บ่ากวน มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงดึงเฉือนของ รอยต่อเกย ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.5 รูปแบบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบแรงคึงเถือน

ความเร็วรอบ	ความเร็วเดินป้อน (mm./min)						
(rpm)	2	4	6	8			
2500	Ι	Ι	Ι	Ι			

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบที่เชื่อมด้วยเวลากคแช่ 2 วินาที

ภาพที่ 4.5 แสดงรูปแบบลักษณะการพังทลายของรอยต่อเกยที่ทดสอบแรงคึงเฉือน พบว่ามี รูปแบบลักษณะการพังทลายอยู่ 3 ลักษณะคือ I.การพังทลายที่ผิวสัมผัส (Interface Fracture) II.การ พังทลายที่โลหะเชื่อม (Weld metal fracture) และ III.การพังทลายที่โลหะอลูมิเนียม (Base metal fracture) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะรูปแบบการพังทลายของชิ้นงานทดสอบดัง ตารางที่ 4.1 เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที ที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบต่อนาที และ เวลากดแช่ 2 วินาที ที่ทุกความเร็วเดินป้อน ของชิ้นงานทดสอบแรงดึงเฉือน พบว่าเป็นลักษณะ รูปแบบการพังทลายที่ผิวสัมผัสทั้งหมด ดังภาพที่ 4.5 (I)



ภาพที่ 4.6 รูปแบบลักษณะการพังทลายที่ผิวสัมผัส ของความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที เวลากคแช่ 2 วินาที

ภาพที่ 4.6 แสดงตัวอย่างลักษณะการพังทลายที่ผิวสัมผัส L ของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็ว รอบ 2500 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 2 วินาที เป็นลักษณะการพังทลายที่พื้นผิวสัมผัสบริเวณรอยเชื่อม จุดของรอยต่อที่บ่งบอกถึงความไม่แข็งแรงซิ่งเป็นลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่มีความ หรือซึมน้อยทำให้การยึดติดไม่แข็งแรงซึ่งเป็นลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่มีความ แข็งแรงดึงเฉือนต่ำ ภาพที่4.6 (ก) ที่รอยเชื่อมจุดพบว่ามีอลูมิเนียมบริเวณแกนกวน (Pin stir zone) และ บริเวณขอบบ่า (Shoulder stir zone) ด้านใน ที่รอบนอกของบ่าเชื่อมจุดเกิดครีบขึ้นมีลักษณะแบนเรียบ กว้างแตกเป็นช่วงๆ ภาพที่4.6 (ข) ที่แผ่นบนด้านล่างทองแดง C11000 บริเวณแกนกวนsอยเชื่อมจุด ถูกดึงออกมาขาดเป็นรูกลม (Fracture path) ตามตัวกวน และที่พื้นผิวพังทลาย (Weld area) บริเวณ อินเตอร์เฟส (Interface fracture surface) มีรูปร่างลักษณะวงกลมภายในผิวสัมผัสเกิดลาย (Rubbing) ซึ่ง P.C.Lin et al.[29] ได้กล่าวว่าบริเวณผิวที่สัมผัส (Contract) เป็นลายเกิดจากกระบวนการเชื่อมจุด และภาพที่4.6 (ก) ที่แผ่นล่างด้านบนอลูมิเนียมผสม AA5052 พื้นผิวพังทลาย (Weld area) บริเวณ ผิวสัมผัส (Interface fracture) มีรูปร่างลักษณะวงรีภายในมีผิวลายหยาบอาจเกิดจากการกวนของเนื้อ โลหะและความร้อนจากการเสียดทานที่ทำให้เกิดการกวนรวมกัน (bonded) ของเนื้อโลหะทองแดง และอลูมิเนียมที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงค่อความแข็งแรงดึงเลือนที่ลดลงของรอยเชื่อมจุด การพังทลายลักษณะนี้จากการศึกษาพบว่าจะเกิดกับชิ้นงานที่ทำการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดด้วย ความเร็วรอบที่ต่ำ



ภาพที่ 4.7 โครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน ป้อน6 มม./นาที และเวลากดแช่ 2 วินาที

ภาพที่ 4.7 แสดงลักษณะ โครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยต่อเกย ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม./ที และเวลากดแช่ 2 วินาที ชิ้นงานรอยต่อเกยมีความ แข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดคือ 583.52 นิวตัน ภาพที่ 4.7(ก) แสดงลักษณะ โครงสร้างมหภาคของรอยต่อเกย พบว่า รอยเชื่อมจุดมีความสมบูรณ์แผ่นโลหะทองแดงอยู่ด้านบนแผ่นโลหะอลูมิเนียมอยู่ด้านล่างใน ลักษณะการต่อเกยโลหะทั้งสองสามารถเชื่อมติดกันได้ดี แล้วตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค แสดง ดังภาพที่ 4.7 (ข) แสดงตำแหน่งอินเทอร์เฟสใต้แกนกวน (I :Interface under pin stir zone) พบว่าใน กระบวนการเชื่อมทำให้โลหะทองแดงอ่อนตัวถูกกดอัดแน่นกับอลูมิเนียมด้วยแกนกวนทำให้เกิด

อินเทอร์เฟส (Bonded interface)ใต้แกนกวนระหว่างทองแดงกับอลูมิเนียมมีลักษณะเป็นสารประกอบ กึ่งโลหะ (Intermetallic compound) ซึ่งS. Bozzi et al [29] ได้กล่าวว่า สารประกอบกึ่งโลหะ (IMC) จะ เกิดขึ้นได้ที่อินเตอร์เฟสและปริมาณมากน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปรในการเชื่อมและ โลหะอลุมิเนียมใต้แกน กวนจะเปลี่ยนรูปเป็นแบบการกดอัดขึ้นรูป (Deformed Al) ความกว้างเฉลี่ยของอินเทอร์เฟส (Interface) เท่ากับ 9.49 ใมโครเมตร ความกว้างอินเทอร์เฟสใต้แกนกวนเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงการยึด ้ติดกันได้คีของโลหะทั้งสองที่อยู่ระหว่างอินเทอร์เฟสเป็นส่วนหนึ่งที่เพิ่มความแข็งแรงคึงให้กับรอย เชื่อมงุด ภาพที่4.7 (ค) แสดงลักษณะอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวน (II : Interface under shoulder stir zone) เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกล (Thermo-Mechanical Affect Zone TMAZ) ใน กระบวนการเชื่อมทำให้เกิดการกวนรวมกันของเนื้อโลหะ (Bonded) ระหว่างทองแดงกับอลุมิเนียม เป็นอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวน (Bonded Interface) มีลักษณะที่หยาบกว่าโลหะฐานอลูมิเนียม มีความ ้กว้างเฉลี่ย 14.16 ไมโครเมตรซึ่งขนาคความกว้างของอินเทอร์เฟสจะขึ้นอย่กับตัวแปรในการเชื่อมและ ้ส่งผลต่อความแข็งแรงคึงเฉือน [29] ภาพที่4.7 (ง) แสคงลักษณะการก่อตัวของตะขอ (III : Interface of the hook) ตะขอก่อตัวขึ้นที่อินเทอร์เฟสใต้บ่ากวนระหว่าง โลหะอลุมิเนียมและทองแคงบริเวณพื้นที่ กระทบร้อน(HAZ : Heat Affect Zone) ของรอยเชื่อมจุดมีลักษณะเป็นสารประกอบกึ่งโลหะที่ก่อตัว ขึ้นมีความสูงเฉลี่ย 164 ใมโครเมตรและลักษณะเป็นตะขอ โคยที่ขนาดและความสูงของตะขอจะ ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อ [29] ขณะที่การยึดติดกันของวัสดุทั้งสองชนิดบริเวณที่ไม่เกิดรอย เชื่อม (BM : Base Metial) คังภาพที่4.7 (จ) พบว่ามีช่องว่าง (Gap) ที่ไม่เกิดการเชื่อมเป็นแนวยาว ( IV Unbonded interface void ) มีความกว้างเฉลี่ย 11.36 ใมโครเมตรเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับความร้อนและ แรงเสียคทานในกระบวนการเชื่อมจึงทำให้บริเวณนี้ไม่เกิดการเชื่อมติดของโลหะทั้งสองที่รอยต่อ

4.2 อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีผลต่อความแข็งแรงคึงเฉือนของรอยต่อเกย



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่ 2 วินาที ที่ความเร็วเดินป้อน (ก) 2 มม./นาที (ง) 4 มม./นาที (ค) 6 มม./นาที (ง) 8 มม./นาที

ภาพที่ 4.8 ลักษณะของรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 3000 รอบต่อนาที และเวลากดแช่ 2 วินาที พบว่ารอยต่อเกยสามารถเชื่อมติดกันได้ดีในทุกสภาวะของ ้ความเร็วเดินป้อน แสดงดังภาพที่ 4.8(ก) ที่ทำการเชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 2 มม./นาที ลักษณะของ รอยเชื่อม (I) และ (II) เกิดครีบที่ม้วนรอบขอบบ่าและส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าสูนย์กลาง D มีขนาดที่โต เท่ากับ 12.07 มม. และความสูงขอบบ่าเฉลี่ย 1.90 มม. รอยเชื่อมบริเวณแกนกวน (SZ) พบ ้โลหะทองแดงถูกกวนจนอ่อนตัวไปยึดติดกับอลูมิเนียมและผิวหน้าทองแดงที่แกนกวนมีอลูมิเนียม แพร่ขึ้นมาซึ่งบ่งบอกถึงการยึดติดกันได้ดีเนื่องจากเนื้อของโลหะมีการซึมเข้าหากัน ภาพที่4.8(ข) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 4 มม./นาที รอยเชื่อมจุด (I) ที่กวามเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้นทำให้อินเทอร์เฟส บริเวณผิวสัมผัสของรอยเชื่อมมีลักษณะ โค้งจากการอ่อนตัวของเนื้อ โลหะที่เกิคจากความร้อนเสียค ทานในกระบวนการเชื่อมทำให้เนื้อบริเวนการเชื่อมกวนอ่อนตัวและล้นขึ้นไปเป็นครีบที่ขอบบ่าลค น้อยลงส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D ลดลง มีขนาคเท่ากับ 11.91 มม.และความสูงขอบบ่าลดลง เช่นเดียวกันมีค่าเฉลี่ย 1.813 มม. หากเทียบกับการเชื่อมที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบต่อนาที พบว่าที่ความเร็วป้อน 2 มม./นาที ดังภาพที่ 4.2 รอยเชื่อมมีลักษณะคล้ายกันแต่ที่ความเร็วเดินป้อน 4 มม./นาที ภาพที่ (I) บริเวณแกนกวนพบว่าโลหะทองแคงถูกกวนหลุดไปเหลือเพียงอลูมิเนียมทำให้ไม่ มีอินเทอร์เฟสบริเวณนี้อาจเป็นส่วนหนึ่งที่รอยต่อเกยมีความแข็งแรงที่ลดลงส่วนที่ขนาด D และ ${f X}$ ของความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที่จะลดลงเล็กน้อย ภาพที่4.8 (ค) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 6 มม./ นาที ที่ภาพ (I) พบโลหะทองแคงยึคติดกับอลูมิเนียมที่แกนกวนทำให้รอยเชื่อมมีอินเทอร์เฟสในการ รับแรงคึงเฉือนเพิ่มขึ้น ที่ภาพ (I) และ (II) เกิดกรีบมีลักษณะที่ม้วนรอบขอบบ่าส่งผลให้ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง D มีขนาดเท่ากับ 11.81 มม.ส่วนบ่ากวนยกตัวขึ้นสูงระยะ X มีค่าเท่ากับ 1.78 มม. ภาพที่4.8 (ง) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อนสูงสุด 8 มม./นาที จากความเร็วเดินป้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ ทองแคงอ่อนตัวและถูกกวนหลุดออกไปจากบริเวณแกนกวน ที่ภาพ (I) อาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง และทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D มีขนาดเท่ากับ 11.75 มม. และ ความสูงที่ขอบบ่า 1.70 มม.เมื่อเทียบกับการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ดังภาพที่ 4.2 รอย เชื่อมที่ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที ภาพ (I) บริเวณแกนกวนพบว่ามีโลหะทองแดงยึดติดกับ อลูมิเนียมลักษณะที่คล้ายกันซึ่งเป็นรอยต่อที่ให้ความแข็งแรงดึงสูง ส่วนที่ความเร็วเดินป้อน 8 มม./ ้นาที่บริเวณแกนกวนพบว่าโลหะทองแคงถูกกวนหลุดออกไปมีลักษณะเหมือนกันอาจเป็นส่วนหนึ่งที่ ทำให้ความแข็งแรงดึงของรอยต่อต่ำลง



ความเร็วเดินป้อน (mm./min)

ภาพที่ 4.9ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าสูนย์กลางที่ขอบบ่าค้านนอกของรอยเชื่อม กับความเร็วเดิน ป้อน 2-8 มม./นาที ที่เชื่อมค้วยความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที และเวลากดแช่คงที่ 2 วินาที



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขอบบ่าของรอยเชื่อม กับความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่คงที่ 2 วินาที

ภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมกับความเร็วเดินป้อน กดตัวกวนลงสู่บริเวณอินเทอร์เฟส 2-8 มม./นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที และเวลากดแช่คงที่ 2 วินาที นำไปทดสอบวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอก (D) ของรอย เชื่อม แสดงดังภาพ 4.2 และรูปโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อความเร็วเดินป้อน เพิ่มสูงขึ้นทุกความเร็วรอบของตัวกวน ขณะที่เริ่มเชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 2 มม./นาที ทุกความเร็ว เขื่มสูงขึ้นทุกความเร็วรอบของตัวกวน ขณะที่เริ่มเชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 2 มม./นาที ทุกความเร็ว รอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอกโตที่สุด เมื่อเพิ่มความเร็วเดินป้อน เป็นที่ 4-8 มม./นาที ตามลำดับ พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอกมีแนวโน้มลดด่ำลงทุกความเร็วรอบ ขณะที่ ขนาดความสูงที่ขอบบ่าด้านนอก (ระยะX) ของรอยเชื่อม แสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่าเมื่อความเร็วเดิน ป้อนเพิ่มขึ้นระยะความสูงที่ขอบบ่าด้านนอกมีแนวโน้มลดด่ำลงทุกความเร็วรอบซึ่งมีความเร็วเดิน อนเพิ่มขึ้นระยะความสูงที่ขอบบ่าด้านนอกมีแนวโน้มลดด่ำลงทุกความเร็วรอบซึ่งมีความสอดกล้อง กับการลดลงของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอกรอยเชื่อม ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะความ ร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นจากการเสียดทานของความเร็วเดินป้อนที่กดลงสู่รอยต่อเพิ่มขึ้นทำให้โลหะทองแดง เกิดการอ่อนตัวและเนื้อบริเวนการเชื่อมกวนล้นขึ้นใปเป็นครีบที่ขอบบ่าลดน้อยลงส่งผลให้ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางและขนาดความสูงที่ขอบบ่าด้านนอกและของรอยเชื่อมลดลงอย่างต่อเนื่อง [25]



ภาพที่ 4.11 โครงสร้างภาคตัครอยต่อเกยที่เชื่อมค้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที และเวลากคแช่ 2 วินาที(ก) โครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอและอินเทอร์เฟสของรอยต่อที่ความเร็วเดิน ป้อน (ข) 2 มม./นาที(ก) 4 มม./นาที (ง) 6 มม./นาที และ (จ) 8 มม./นาที

ภาพที่ 4.11 (ก) แสคงลักษณะ โครงสร้างภาคตัดของรอยต่อเกยทองแดงผสม C11000 อยู่ แผ่นด้านบนกับอลูมิเนียมผสม AA5052 อยู่แผ่นด้านล่างที่ระยะต่อเกย 30 มิลลิเมตร พบว่ารอยเชื่อม ปรากฏบนแผ่นทองแดงผสมโดยที่บริเวณอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวนมีลักษณะของการกวนรวมกันของ เนื้อโลหะ (bonded) จากกระบวนการเชื่อมเสียดทานที่เรียกว่า ตะขอ ดังภาพที่ 4.11 (ก) แสดงตำแหน่ง การเกิดตะขอบริเวณใต้บ่ากวนทั้งสองข้างที่โครงสร้างภากตัดของรอยต่อเกย ซึ่งผลการทดลองที่ได้ ้จากการส่องถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 5X ดังภาพที่ 4.11 (ข) เชื่อมที่ความเร็ว เดินป้อน 2 มม./นาที ตะขอใต้บ่ากวน มีลักษณะที่สมบูรณ์แต่มีความหยาบกว่าโลหะฐานอลูมิเนียม และทองแคง แต่ตัวแปรการเชื่อมนี้ทำให้เกิดการกวนรวมตัวกันของโลหะทั้งสองน้อย ความสูงเฉลี่ย ้ของตะขอ 0.312 มิลลิเมตร ภาพที่ 4.11 (ข) เชื่อมที่ความเร็วเดินป้อน 4 มม./นาที พบว่ามีการก่อตัว ้งองโลหะเชื่อมที่เป็นตะงอเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากความเร็วเดินป้อน 2 มม./นาทีแต่ มีความหยาบและ ้ลักษณะที่คล้ายกันมีความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 0.324 มิลลิเมตร และภาพที่ 4.11 (ง) เมื่อเพิ่มความเร็วเดิน ป้อนเป็น 6 มม./นาที ปรากฏว่าความสูงของตะขอเพิ่มขึ้นสูงสุด เท่ากับ 0.528 มม. แต่พบว่าจาก สภาวะตัวแปรที่เพิ่มส่งผลให้การเกิดการกวนรวมตัวกันของโลหะที่เป็นตะขอมากขึ้นแต่ยังไม่ สมบูรณ์เนื่องจากพบช่องว่างที่เป็นโพรงขนาดใหญ่เกิดขึ้นที่ขอบด้านความสูงของตะขอ แสดงดังภาพ ที่4.11 (ง) จากความบกพร่องที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง และ ภาพที่4.11 (จ) ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 8 มม./นาที ตะขอมีลักษณะที่ลดต่ำลงมีความสูงเฉลี่ย เท่ากับ 0.333 มม.และเกิดเป็นโพรงช่องว่างที่ปลายด้านหนึ่งของตะขอ อาจเป็นเพราะตัวแปรใน กระบวนการเชื่อมที่สูงมากเกินไป หากเปรียบเทียบลักษณะการก่อตัวของตะขอ ที่เชื่อมด้วยความเร็ว เดินป้อน 2 มม./นาที ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที่ดังภาพที่4.3 (ข) พบว่าตะขอมีการก่อตัวของ ตะขอที่น้อยกว่าที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาทีในทุกความเร็วเดินป้อน อาจเป็นเพราะ ้ความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการกวนรวมกันของเนื้อโลหะที่สมบูรณ์กว่า และเมื่อความเร็วเดิน ป้อนเพิ่มขึ้นเป็น 4- 6 มม./นาที ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ลักษณะการก่อตัวของตะขอเพิ่มขึ้น ปริมาณที่ไม่มากจากความเร็วเดินป้อน 2 มม./นาที เทียบกับความเร็วรอบ3000 รอบต่อนาที มีลักษณะ การก่อตัวของตะขอที่เพิ่มขึ้นที่ความเร็วเดินป้อน 4-6 มม./นาทีเหมือนกันแต่ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที่มีลักษณะการก่อตัวของตะขอที่ปริมาณและความสูงมากกว่าทุกความเร็วเดินป้อน และ ตะขอจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ความเร็วเดินป้อน 6 มม/นาที เหมือนกันแต่ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ้จะมีปริมาณและความสูงตะขอที่มากกว่าแต่พบลักษณะเป็นโพรงที่เป็นช่องว่างเกิดขึ้นที่ตะขอ ซึ่งอาจ เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลคลงในความสูงตะขอที่เท่าๆกัน และตะขอจะมีขนาค และความสูงที่ลคลงเมื่อความเร็วเคินป้อนเพิ่มขึ้นเป็น 8 มม./นาที อาจเป็นเพราะสภาวะตัวแปรที่ไม่ ้สอคกล้องกันในการเชื่อมที่ความเร็วรอบต่ำแต่ความเร็วเดินป้อนที่สูง ทำให้การเกิดการกวนรวมตัว กันของโลหะทั้งสองบริเวณอินเทอร์เฟสที่ไม่สมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่พบงานวิจัยที่ตีพิมพ์ใน การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของโลหะแผ่นบางอลูมิเนียมผสม AA5052 กับทองแดงผสม C11000 พบเพียงงานวิจัยของการเชื่อมวัสดุแผ่นบางชนิดอื่นๆเช่น อลูมิเนียมกับอลูมิเนียม อลูมิเนียมกับ เหล็กกล้าการ์บอน อลูมิเนียมกับเหล็กกล้าเกลือบสังกะสี อลูมิเนียมกับโลหะผสม และอลูมิเนียมกับ สแตนเลส เป็นต้น จึงไม่สามารถนำงานวิจัยที่ตีพิมพ์มาอ้างอิงลักษณะความสัมพันธ์ของการเกิดตะขอ บริเวณอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวนระหว่างโลหะทองแดงและอลูมิเนียม ที่กวามเร็วเดินป้อนต่างๆได้ จึง อภิปรายผลลักษณะกวามสัมพันธ์ของการเกิดตะขอ ที่กวามเร็วเดินป้อนต่างๆจากผลการทดลอง ดังกล่าว



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างภาคตัดรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที และเวลากดแช่ 2 วินาที (ก) โครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอและอินเทอร์เฟสของรอยต่อที่ความเร็ว เดินป้อน (ข) 2 มม./นาที(ก) 4 มม./นาที (ง) 6 มม./นาที และ (จ) 8 มม./นาที

ภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะขอกับตัวแปรในการเชื่อมที่ ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 2 วินาที พบว่าที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที จะสังเกตเห็นว่าเกิดการกวนรวมกันของเนื้อโลหะที่ เป็นตะขอใต้บ่ากวนน้อย ทำให้ตะขอมีความสูงไม่มาก ทั้งนี้อาจเกิดจากตัวแปรการเชื่อมที่ต่ำทำให้ ความร้อนจากการเสียดทานน้อย ที่ทำจะให้เกิดการกวนรวมตัวกันของเนื้อโลหะที่เป็นตะขอ หาก เชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที พบว่าตะขอ มีการก่อตัวเพิ่มสูงขึ้น จากที่เชื่อมด้วยความเร็ว รอบ 2500 รอบ/นาที สังเกตจากภาพที่ 4.12 กราฟความสูงของตะขอที่เพิ่มขึ้นทุกความเร็วเดินป้อน และตะขอมีการก่อตัวสูงสุดที่ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที ยกเว้นที่ความรีวเดินป้อน 8 มม./นาที เนื่องจากเป็นความเร็วป้อนที่สูงเกินไปอาจเป็นสาเหตุให้เนื้อของโลหะรวมตัวกันที่ไม่ดี อาจหลอม ละลายแพร่ขึ้นไปที่ผิวบ่าด้านบน การก่อตัวของตะขอจึงค่ำ หากเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อ นาทีโครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอ แสดงดังภาคผนวก ข. พบว่ามีลักษณะการก่อตัวที่สูงขึ้น เมื่อความเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้นและตะขอมีการก่อตัวสูงที่สุดในทุกความเร็วรอบ เท่ากับ 0.601 มิลลิเมตรที่ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที และตะขอลดค่ำลงที่ 0.332 มิลลิเมตร เมื่อความเร็วเดินป้อน เพิ่มขึ้นเป็น 8 มม./นาที และที่ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที แสดงโครงสร้างมหภาคการก่อตัวของ ตะขอที่ภาคผนวก ข. พบว่าลักษณะการก่อตัวของตะขอมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร็วเดินป้อน 2-4 มม./นาที ซึ่งสูงสุดเท่ากับ 0.497 มิลลิเมตรที่ความเร็วเดินป้อน 4 มม/นาที และมีแนวโน้มต่ำลงที่ ความเร็วเดินป้อน 6-8 มม./นาที ซึ่งความเร็วเดินป้อนที่ 8 มม./นาที ตะขอลดต่ำลงทุกความเร็วรอบ แสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงเฉือน ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และ ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 2 วินาที

ภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงเฉือนกับสภาวะตัวแปรในการ เชื่อมที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาทีความเร็วรอบ2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 2 วินาที

พบว่าความแข็งแรงดึงเฉือนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ในทุกความเร็วเดินป้อน ขณะที่ เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500-3500 รอบต่อนาทีความเร็วเดินป้อนในการเชื่อมเริ่มต้นที่ 2 มม,/นาที พบว่าความแข็งแรงคึงเฉือนของรอยต่อมีค่าต่ำ ทุกความเร็วรอบ แต่เมื่อความเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้นเป็น 4 มม./นาที พบว่าที่ความเร็วรอบ 2500-3500 รอบต่อนาที ความแข็งแรงดึงเฉือนมีค่าใกล้เคียงกันแต่ หากเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับความสูงตะขอ ในภาพที่ 4.12 จะเห็นว่าที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ ต่อนาที ความสูงของตะขอมีค่าที่ต่ำกว่าที่ความเร็วรอบ 3000-3500 รอบต่อนาที ค่อนข้างมากขณะที่ ความแข็งแรงดึงเฉือนมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 4.13 หากพิจารณาลักษณะความสูงของตะขอ ดัง ภาคผนวก ข.1.1-1.2 ที่ความเร็วรอบ 3000-3500 รอบต่อนาที พบว่าตะขอมีความสูงกว่าที่ความเร็ว รอบ 2500 รอบต่อนาที แต่พบข้อบกพร่องเกิดขึ้นที่ตะขอ มีลักษณะเป็นโพรงที่เป็นช่องว่างขนาดใหญ่ เกิดขึ้นที่ตะขอและบริเวณฐานเป็นแนวยาว ซึ่งข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้กวาม แข็งแรงดึงเฉือนลดลงใกล้เคียงกับที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีและที่ความเร็วเดินป้อน 6 มม./ ้นาที ความแข็งแรงดึงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในทุกความเร็วรอบและเมื่อความเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้น เป็นที่ 8 มม./นาที พบว่าค่าความแข็งแรงคึงเฉือนมีแนวโน้มลดต่ำลงทุกความเร็วรอบ และหากเชื่อมที่ ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาทีซึ่งเป็นการเชื่อมที่ความเร็วรอบสูง ก่าความแข็งแรงดึงเฉือนมี แนวโน้มสูงที่กวามเร็วเดินป้อน 2-4 มม./นาทีแต่เมื่อกวามเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้นเป็น 6 และ8 ตามลำดับ พบว่ากวามแข็งแรงดึงเฉือนลดลงอย่างต่อเนื่อง สภาวะการเชื่อมที่ให้ก่ากวามแข็งแรงดึงสูงสุด ประมาณ 782.38 นิวตัน คือกวามเร็วรอบ3500รอบ/นาที กวามเร็วเดินป้อนตัวกวน 6 มม/นาทีเวลาใน การกคแช่2 วินาที สรุปใด้ว่าความเร็วรอบในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึงเฉือนมีค่า ้สูงขึ้น แต่ถ้าความเร็วรอบที่สูงมากเกินไปเช่น 4000 รอบต่อนาทีหากเชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อนที่ต่ำ 2-4 มม./นาที่จะให้ค่าความแข็งแรงคึงเฉือนที่สูง

ความเร็วรอบ	ความเร็วเดินป้อน (mm./min)					
(rpm)	2	4	6	8		
3000	Ι	Ι	Ι	Ι		
3500	Ι	Ι	II	Ι		
4000	Ι	II	Ι	Ι		

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 2 วินาที

III, การพังทลายที่ โลหะอลูมิเนียม

II.การพังทลายที่โลหะเชื่อม

I.การพังทลายที่ผิวสัมผัส

ตารางที่ 4.2 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./ นาที ที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500-4000 รอบต่อนาที และเวลากดแช่ 2 วินาที เมื่อเปรียบเทียบ ความเร็วเดินป้อนในการเชื่อมต่ำหรือสูงเกินไปที่ 2 และ 8 มม./นาทีทุกความเร็วรอบ พบว่า เป็น ลักษณะการพังทลายที่ผิวสัมผัสทั้งหมดดังแสดงดังภาพที่ 4.5 (I) ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบ ต่อนาที ทุกความเร็วเดินป้อน ของชิ้นงานทดสอบแรงดึงเฉือน พบว่าการพังทลายของชิ้นงานทดสอบ แรงดึงเฉือนเป็นรูปแบบการพังทลายที่ผิวสัมผัสทั้งหมด ที่เชื่อมที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาทีและที่ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาทีความเร็วเดินป้อน 4 มม./นาที พบว่าการพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงดึงเฉือนเป็นรูปแบบการพังทลายที่โลหะเชื่อม แสดงดัง ภาพที่4.5 (II)

แนวเชื่อมจุด	Cu แผ่นบนด้านล่าง	Al แผ่นล่างด้านบน
(n) Shoulder stir zone Pin stir zone 2mm.	(1) Weld area Weld metal Fracture path	(P) Weld area Crack Fracture path 2mm.
ทิศทางแรงดึงเฉือน		

ภาพที่ 4.14 รูปแบบลักษณะการพังทลายที่โลหะเชื่อม ของความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาทีความเร็วเคิน ป้อน 6 มม./นาที และเวลากดแช่ 2 วินาที

ภาพที่ 4.14 แสดงลักษณะการพังทลายที่โลหะเชื่อ II ของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที และเวลากดแช่ 2 วินาที วินาที ดังภาพที่ 4.14 (ก) พบว่าบริเวณเชื่อมจุดเกิดรอยไหม้ขึ้นที่กรีบรอบนอกของบ่าเชื่อมจุด กรีบมีลักษณะสั้นกว่าชิ้นทดสอบ ที่มีความด้านทานแรงดึงเฉือนต่ำ กรีบจะกว้างแบนเรียบเกิดขึ้นเล็กน้อย และที่ภาพ 4.14 (ข) ที่แผ่นบน ด้านล่างทองแดง C11000 บริเวณเชื่อมจุดไม่เกิดการเสียหายและพื้นผิวพังทลายบริเวณอินเตอร์เฟส เป็นรูปวงกลม (Fracture path) และที่ผิวสัมผัสมีรูปคล้ายก้นหอย (spiral) และภาพที่4.14 (ก) ที่แผ่น ล่างด้านบนอลูมิเนียมผสม AA5052 พื้นผิวพังทลายบริเวณอินเตอร์เฟสเป็นรูปวงกลมภายในมีรอย แตกร้าว (Crack) ขวางรูปก้นหอยขณะที่บริเวณผิวรอบชั้นนอกมีรอยร้าวเป็นเส้นบริเวณรอยเชื่อมจุด

## ที่ถูกดึงออกมา (Fracture part)



ภาพที่ 4.15 โครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน ป้อน6 มม./นาที และเวลากดแช่ 2 วินาที

ภาพที่ 4.15 แสดงโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบ ต่อนาทีความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที ในเวลากดแช่ 2 วินาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดที่ 782.38 นิวตัน ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่แสดงถึงการยึดติดกันของทองแดงและ อลูมิเนียมที่รอยต่อเกย ดังภาพที่ 4.15 (ก) แสดงโครงสร้างทางมหภาค ของตำแหน่งที่ทำการ ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งผลการทดลองที่ได้มาจากการส่องถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้ แสงที่กำลังขยาย 20X แสดงดังภาพที่ 4.15 (ข) แสดงดำแหน่งอินเทอร์เฟสใต้แกนกวน (I :Interface under pin stir zone) ตัวแปรในการเชื่อมทำให้โลหะทองแดงบริเวณแกนกวนอ่อนตัวไปยึดติดแน่นกับ

้อลูมิเนียมความร้อนและแรงกดจากตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานทำให้เกิดอินเทอร์เฟสระหว่าง อลูมิเนียมและทองแดงใต้แกนกวนมีความกว้างเฉลี่ย 28.93 ใมโครเมตรมีลักษณะเป็นสารประกอบกึ่ง โลหะ (IMC) และอลูมิเนียมใต้แกนกวนจะถูกกคอัคจนเปลี่ยนรูปเป็นแบบ Deformed A1 ภาพที่ 4.15 (ค) แสดงลักษณะอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวน (II: Interface under shoulder stir zone) เป็นบริเวณรอย เชื่อมที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกล (Thermo-Mechanical Affect Zone : TMAZ)ใน ้กระบวนการเชื่อม มีลักษณะเป็นแนวยาวลาคเอียงเป็นมม 20.6 องศา มีความกว้างเฉลี่ยเท่ากับ 19.37 ใมโครเมตร ภาพที่ 4.15 (ง) แสดงลักษณะการกือตัวของตะขอ (III : Interface of the hook) เป็น อินเทอร์เฟสที่ก่อตัวสูงขึ้นจากเนื้อโลหะของอลูมิเนียมและทองแคงถูกกวนรวมตัวกัน บริเวณพื้นที่ กระทบร้อน ( HAZ Heat Affect Zone) ของรอยเชื่อมจุด ลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมคล้ายตะขอมีมุม 62.93 องศา เป็นโลหะเชื่อม(Weld metal) ที่เป็นสารประกอบกึ่งโลหะ ตะขอมีความสูงเฉลี่ย 601 ใมโครเมตร ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ W. Yuan et al. [28] ภาพที่4.15 (จ) บริเวณที่ไม่เกิดการเชื่อม (Unbonded interface void: IV) เป็นบริเวณที่ความร้อนและแรงกคจากการเสียคทานน้อยไม่เพียง พอที่จะทำให้เนื้อโลหะระหว่างอลุมิเนียมและทองแดงกวนรวมตัวติดกัน จึงทำให้เกิดช่องว่าง (Gap) เป็นแนวยาวกว้าง 20.48 ไม โครเมตร เมื่อเทียบกับ โครงสร้างทาง โลหะวิทยา ของรอยต่อที่เชื่อมด้วย ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที และเวลากดแช่ 2 วินาทีที่ให้ค่าความ แข็งแรงดึงเฉือนเท่ากับ 583.52 นิวตัน ดังภาพที่ 4.7 มีบริเวณอินเทอร์เฟสใต้แกนกวน (I :Interface under pin stir zone) ความกว้างเฉลี่ย 9.49ไมโครเมตร อินเทอร์เฟสใต้บ่ากวน (II : Interface under shoulder stir zone) มีขนาดความกว้างเฉลี่ยเท่ากับ 14.16 ไมโครเมตรและอินเทอร์เฟสที่เป็นตะขอ (III : Interface of the hook) มีความสูงเฉลี่ย 164 ใม โครเมตร จะพบว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที แสดงคังภาพที่ 4,15 มีความกว้างอินเทอร์เฟสใต้แกนกวน บ่ากวนและที่ก่อตัวเป็น ตะขอ จะมีขนาดที่มากกว่า จึงส่งผลให้รอยต่อมีความแข็งแรงที่สูงกว่าคือ 782.38 นิวตัน ดังนั้นจึงสรุป ได้ว่าความกว้างของอินเทอร์เฟสและความสูงของตะขอ ที่เพิ่มขึ้นมาจากตัวแปรในการเชื่อมที่สูงขึ้น และส่งผลให้รอยต่อมีความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งมีลักษณะคล้ำยกับ S. Bozzi et al [30]

4.3 อิทธิพลของเวลากดแช่ที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกย



ภาพที่ 4.16 โครงสร้างมหภาคที่เชื่อมค้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีและเวลากคแช่ 4 วินาที ที่ความเร็วเดินป้อน (ก) 2 มม./นาที (ข) 4 มม./นาที (ค) 6 มม./นาที และ (ง) 8 มม./นาที

ภาพที่ 4.16 แสดงลักษณะของรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด ที่ความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินป้อนในการเชื่อม 2-8 มม./นาที ในเวลากดแช่คงที่ 4 วินาที พบว่าทก สภาวะของความเร็วเดินป้อนรอยเชื่อมจุดมีความสมบูรณ์ แต่ลักษณะของรอยเชื่อมจุดมีความแตกต่าง กัน ดังภาพที่ 4.16 (ก) ภาพภาคตัดแนวขวางของรอยเชื่อม (I) บริเวณแกนกวน (SZ,Stir zone) พบว่า ้โลหะทองแคงถูกกวนหลุดออกไปเหลือเพียงอลูมิเนียม อาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ความแข็งแรงของ รอยต่อลดลง ที่รอยเชื่อมจุด (I) และ (II) เกิดกรีบที่ม้วนรอบขอบบ่ามีลักษณะที่กว้างส่งผลให้ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง D มีขนาดที่โตเท่ากับ 12.19 มม.ซึ่งมีขนาดที่โตกว่าเวลากดแช่ 2 วินาทีและบ่ากวนที่ เป็นทองแคงยกตัวขึ้นสูงวัคระยะ X ขอบบ่าทั้งสองข้างเฉลี่ยเท่ากับ 1.73 มม ภาพที่4.16 (ข) เชื่อมด้วย ความเร็วเดินป้อน 4 มิลลิเมตร/นาที รูปภาคตั้ดแนวขวางของรอยเชื่อม (I) บริเวณแกนกวนพบว่าเนื้อ ของโลหะทองแคงถูกกวนจนอ่อนตัวต่ำลงติดแน่นกับอลูมิเนียม ทำให้เกิดอินเทอร์เฟสใต้แกนกวน อาจเป็นส่วนหนึ่งที่รอยต่อมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D พบว่ามีขนาดลดลงวัดได้ เท่ากับ 11.81 มม.และความสูงขอบบ่าเฉลี่ย 1.69 มม ภาพที่4.16 (ค) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที ที่ภาพตัดขวาง (I) บริเวณแกนกวน (SZ) พบว่าเนื้อของโลหะทองแดงถูกกวนหลุดออกไป เหลือเพียงโลหะอลูมิเนียมเท่านั้นบริเวณแกนกวน ทำให้บริเวณนี้มีความหนา 1ใน 2 ของความหนา โลหะฐานอาจเป็นสาเหตุให้ความแข็งแรงรอยต่อลคลงวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D วัดได้เท่ากับ 11.45 มม.และความสูงขอบบ่าเฉลี่ย 1.60 มม พบว่ามีขนาคลคลงจากความเร็วเคินป้อนที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 4.17.(ง) เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 8 มม./นาทีลักษณะของรอยเชื่อม (I) และ (II) พบว่าบริเวณแกน กวนทองแคงถูกกวนหลุดออกไปเหลือเพียงโลหะอลูมิเนียมซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการเชื่อมที่ความเร็ว เดินป้อน 2 และ 6 มิลลิเมตร/นาที ความเร็วเดินป้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้โลหะทองแดงอ่อนตัววัดขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง D วัดได้เท่ากับ 11.18 มม.และ ความสูงขอบบ่า X เฉลี่ย 1.54 มม จะเห็นว่าขนาด D



(ข) ขนาคเส้นผ่าสูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอก D ของรอยเชื่อม ที่เวลากคแช่ 6 วินาที


(ก) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอก D ของรอยเชื่อม ที่เวลากดแช่ 8 วินาที

ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงขอบบ่าของรอยเชื่อม กับความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาทีและ เวลากดแช่คงที่ (ก) 4 วินาที (ข) 6 วินาที (ก) 8 วินาที

ภาพที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าสูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอก D ของรอยเชื่อม กับความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่ คงที่ 4-8 วินาที ภาพโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม แสดงดังภาคผนวก ก. ภาพที่ (ก) - (ก) เชื่อมด้วย เวลากดแช่ 4 6 และ8 วินาทีขนาดเส้นผ่าสูนย์กลางที่ขอบบ่าด้านนอก D ของรอยเชื่อมมีแนวโน้มต่ำลง เมื่อความเร็วรอบในการเชื่อมเพิ่มขึ้น ซึ่งทุกความเร็วเดินป้อน และทุกความเร็วรอบเมื่อความเร็วเดิน ป้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้นที่ 4 6 และ8 มม./นาที ขนาดเส้นผ่าสูนย์กลางขอบบ่าด้านนอกD จะลดลง อย่างต่อเนื่องและเล็กสุดที่ความเร็วเดินป้อน 8 มม./นาที ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าความร้อนที่ สูงขึ้นจากตัวแปรในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้โลหะทองแดงแผ่นรอยต่อเกยด้านบนอ่อนตัว และทำให้ ใหลขึ้นเป็นครีบที่ขอบบ่าน้อยลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดกล้องกับความเร็วเดินป้อนที่เพิ่มขึ้นเหมือนกัน ทุกเวลากดแช่ในการเชื่อม 4-8 วินาที



ภาพที่ 4.18 โครงสร้างภาคตัครอยต่อเกยที่เชื่อมค้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที และเวลากคแช่ 4 วินาที (ก) โครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอและอินเทอร์เฟสของรอยต่อที่ความเร็วเดิน ป้อน (ข) 2 มม./นาที(ก) 4 มม./นาที (ง) 6 มม./นาที และ (จ) 8 มม./นาที

ภาพที่ 4.18 (ก) แสดงลักษณะ โครงสร้างภาคตัดของรอยต่อเกยทองแดงผสม C11000 อยู่ แผ่นด้ำนบนกับอลูมิเนียมผสม AA5052 อยู่แผ่นด้ำนล่างที่ระยะต่อเกย 30 มิลลิเมตร พบว่ารอยเชื่อม ปรากฏบนแผ่นทองแดงผสม โดยที่บริเวณอินเทอร์เฟส ใต้บ่ากวนมีลักษณะของการกวนรวมกันของ เนื้อโลหะ (bonded) อลูมิเนียมและทองแดง จากกระบวนการเชื่อมเรียกว่า ตะขอ (Hook) ผลการ ทดลองที่ได้จากการส่องถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 5X แสดงดังภาพที่ 4.18 (ข) ที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 2 มม./นาทีโครงสร้างมหภาคของตะขอ ใต้บ่ากวนมีลักษณะเป็น สามเหลี่ยมที่ปลายขอดโด้งมนที่บริเวณฐานมีลักษณะเป็นโพรงที่เป็นช่องว่าง อาจเป็นข้อบกพร่องจาก กระบวนการเชื่อมที่อาจส่งผลต่อกวามแข็งแรงดึงเฉือนลดลง ตะขอที่เกิดจากเนื้อโลหะทองแดงและ อลูมิเนี่ยมถูกกวนรวมเป็นเนื้อเดียวกัน จะมีความหยาบมากกว่าโลหะฐานวัดความสูงเฉลี่ยได้เท่ากับ 0.254 มิลลิเมตร ภาพที่4.18 (ค) เชื่อมที่ความเร็วเดินป้อน 4 มม./นาที พบว่าตะขอ ลักษณะเป็น สามเหลี่ยมมีด้านหนึ่งโด้งเว้าส่วนปลายแหลมคล้ายตะขอ แต่เกิดโพรงเป็นช่องว่างที่บริเวณปลายฐาน วัดกวามสูงของตะขอได้เท่ากับ 0.342 มิลลิเมตร ภาพที่4.18 (ง) เชื่อมที่กวามเร็วเดินป้อนเป็น 6 มิลลิเมตร/นาที พบว่า ตะขอมีลักษณะสมบูรณ์เป็นรูปสามเหลี่ยมกล้ายตะขอ มีกวามสูงที่เพิ่มขึ้น สูงสุดวัดเฉลี่ยได้เท่ากับ 0.628 มิลลิเมตร และภาพที่4.18 (ง) เป็นการเชื่อมที่กวามเร็วเดินป้อนสูงสุด 8 มม./นาที พบว่าลักษณะกวามสูงของตะขอเป็นสามเหลี่ยมปลายยอดโก้งมนกล้ายกับกวามเร็วเดิน ป้อน 2 มิลลิเมตร/นาที วัดกวามสูงเฉลี่ยของตะขอ ได้เท่ากับ 0.285 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับ โกรงสร้างมหภากลักษณะการก่อตัวของตะขอ ในข้อที่ 4.1 ภาพที่4.3 พบว่าเป็นการเชื่อมที่กวามเร็ว รอบ 2500 รอบต่อนาที และเวลากดแช่ 2 วินาที มีลักษณะของการด่อตัวของตะขอที่น้อยกว่ากวามเร็ว รอบ 3500 รอบ/นาทีทุกกวามเร็วป้อน2-8 มม/นาทีอาจเป็นเพราะว่าที่กวามเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เป็นสภาวะตัวแปรในการเชื่อมที่ทำให้เกิดกวามร้อนส่งผลให้การกวนรวมกันของเนื้อโลหะที่สมบูรณ์ กว่ากวามเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะขอ ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และความเร็ว รอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 4 วินาที

ภาพที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะขอ ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./ นาที และความเร็วรอบ 2500 - 4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 4 วินาที พบว่าเกือบทุกความเร็วรอบ เมื่อความเร็วเดินป้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้นความสูงตะขอมีแนวโน้มที่สูงขึ้นและสูงสุดที่ความเร็วเดิน ป้อน 6 มม./นาทีและความสูงของตะขอมีแนวโน้มที่ต่ำลงหากเชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 2 และ8 มม./นาที สภาวะการเชื่อมที่ ตะขอมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.623 มิถลิเมตร คือเชื่อมที่ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบต่อนาทีและเวลากดแช่ 4 วินาที



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคึงเฉือน ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และ ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 4 วินาที

ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงเลือน ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 4 วินาที พบว่าในทุกความเร็วรอบค่าความ ด้านทานแรงดึงเลือนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร็วเดินป้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้น และที่เวลากดแช่ 4 วินาที หากเชื่อมด้วยความเร็วเดินป้อน 4 มิลลิเมตร/นาทีจะให้ค่าความด้านทานแรงดึงเลือนสูงที่ ความเร็วรอบตัวกวน 2500 และ 3500 รอบ/นาที และความต้านทานแรงดึงเลือนมีค่าสูงสุดที่ความเร็ว เดินป้อน 6 มิลลิเมตร/นาทีในเกือบทุกความเร็วรอบตัวกวน แต่ที่ความเร็วเดินป้อน 8 มิลลิเมตร/นาที พบว่าความด้านทานแรงดึงเลือนมีค่าลดต่ำลงในทุกความเร็วรอบของตัวกวน และสภาวะตัวแปรการ เชื่อมที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาทีความเร็วเดินป้อน 6 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 4 วินาที่ ให้ก่า ความด้านทานแรงดึงเลือนสูงสุดเท่ากับ 863.50 นิวตัน

ความเร็วรอบ	ความเร็วเดินป้อน (mm./min)				
(rpm)	2	4	6	8	
2500	Ι	II	II	Ι	
3000	Ι	II	III	Ι	
3500	Ι	II	III	II	
4000	Ι	П	II	Ι	

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 4 วินาที

II.การพังทลายที่โลหะเชื่อม III, การพังทลายที่โลหะอลูมิเนียม

I.การพังทลายที่ผิวสัมผัส II.การพั



ภาพที่ 4.21 รูปแบบลักษณะการพังทลายที่โลหะอลูมิเนียม ของความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาทีความเร็ว เดินป้อน 6 มม./นาที และเวลากดแช่ 4 วินาที

ภาพที่ 4.21 แสดงลักษณะการพังทลายที่โลหะอลูมิเนียม III ของชิ้นงานที่เชื่อมด้วย กวามเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที และเวลากดแช่ 4 วินาที เป็นลักษณะ การพังทลายบริเวณรอยเชื่อมจุดซึ่งมีการยึดติดของชิ้นงานที่บริเวณอินเทอร์เฟสรอบรอยเชื่อมจุดซึ่ง การฉีกขาดแบบนี้ส่วนมากจะเป็นชิ้นงานที่ให้ก่าความด้านทานแรงดึงเฉือนสูง ที่ภาพ 4.21 (ก) รอย เชื่อมจุดพบว่ามีทองแดงและอลูมิเนียม บริเวณแกนกวน (Pin stir zone) และบริเวณบ่ากวน (Shoulder stir zone) พบอลูมิเนียมแพร่ขึ้นมาที่บ่ากวนทองแดงที่รอยเชื่อมจุดเกิดรอยไหม้ที่กรีบขึ้นรอบนอกของ บ่าเชื่อมจุดครีบมีลักษณะกว้างและเฉียงรอบเชื่อมจุด ขณะที่ภาพ 4.21 (ข) แผ่นบนด้านล่างทองแดง ผสมC11000 เกิดการฉีดขาดเป็นรูบนอลูมิเนียมลักษณะการพังทลายบริเวณโลหะเชื่อมที่ถูกเชื่อมอย่าง สมบูรณ์และฉีกขาดยึดติดอย่างถาวรกับพื้นผิวของทองแดง และที่ภาพ 4.21 (ก) แผ่นล่างด้านบน อลูมิเนียมผสม AA5052 พื้นผิวพังทลายที่โลหะเชื่อมบริเวณอินเตอร์เฟสเป็นรูปวงรี มีการพังทลายฉีก ขาดออกจากบริเวณเชื่อมจุดขณะที่บริเวณผิวรอบชั้นนอก (Outer rough surface) ภายในพื้นผิวมีระยะ กว้างและมีรอยร้าวเป็นเส้น อย่างไรก็ตามการฉีกขาดเหล่านี้ยืนยันว่ารอยต่อของการเชื่อมด้วยการ เสียดทานแบบจุดที่สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม จะมีกวามแข็งแรงมาก และส่งผลให้เกิดการฉีกขาดที่ วัสดุหลักได้ รอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นสอดกล้องกับ การเชื่อมรอยต่อระหว่างทองแดงกับอลูมิเนียมผสมที่ มีแผ่นสอดระหว่างแผ่นวัสดุ ด้วย RSW Mishra RS [31] ซึ่งรอยต่อที่แข็งแรงต่ำจะเกิดการฉีกขาดรอบ แนวเชื่อมขณะที่รอยต่อที่มีกวามแข็งแรงสูงจะเกิดการฉีกขาดผ่านวัสดุอลูมิเนียม



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะขอ ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และความเร็ว รอบ2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 6 วินาที

ภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะขอ ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./ นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 6 วินาที พบว่าเมื่อเวลากดแช่ในการ เชื่อมเพิ่มขึ้นพบว่าเกือบทุกความเร็วรอบความสูงตะขอมีแนวโน้มสูงขึ้นและเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ความเร็ว เดินป้อน 6 มม./นาที แต่หากเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 และ 4000 รอบต่อนาที ความสูงตะขอจะมี ความสูงสุดที่ความเร็วเดินป้อน 4 มม./นาที สภาวะตัวแปรที่เชื่อมแล้วทำให้เกิดการก่อตัวของตะขอ บริเวณอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวนที่สมบูรณ์ ส่งผลให้ตะขอมีความสูงมากที่สุด 0.49 มิลลิเมตรคือตัวแปร



การเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที และเวลากดแช่ 6 วินาที

ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงเฉือน ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และ ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 6 วินาที

ภาพที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงเฉือน ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./ นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 6 วินาที พบว่าหากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมด้วยสภาวะตัวแปรที่เวลากดแช่ 4 วินาที ดังรูปที่ 4.20 พบว่าเวลากดแช่ที่เพิ่มขึ้นเป็น 6 วินาที ดังภาพที่ 4.23 ส่งผลกระทบให้ก่าความด้านทานแรงดึงเฉือนลดต่ำลงในทุกความเร็วรอบ และสภาวะ ตัวแปรในการเชื่อมที่ความเร็วเดินป้อน 4 และ6 มม./นาทีจะให้ก่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่สูงใน ทุกความเร็วรอบ แต่ความต้านทานแรงดึงเฉือนจะมีก่าสูงสุดที่ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที หากเชื่อม ด้วยความเร็วรอบ ตัวกวนที่ 3000 – 3500 รอบ/นาที และที่ความเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้นเป็น 8 มิลลิเมตร/ นาที พบว่าความด้านทานแรงดึงเฉือนมีก่าลดต่ำลงในทุกความเร็วรอบของตัวกวนที่ทำการเชื่อม และ สภาวะตัวแปรในการเชื่อมด้วยความเร็ว รอบ 3500 รอบ/นาทีที่ความเร็วเดินป้อน 6 มิลลิเมตร/ นาที พบว่าความต้านทานแรงดึงเฉือนมีก่าลดต่ำลงในทุกความเร็วรอบของตัวกวนที่ทำการเชื่อม และ สภาวะตัวแปรในการเชื่อมด้วยความเร็ว รอบ 3500 รอบ/นาทีที่ความเร็วเดินป้อน 6 มิลลิเมตร/ นาที 200 นิวทัน

ความเร็วรอบ	ความเร็วเดินป้อน (mm./min)				
(rpm)	2	4	6	8	
2500	Ι	Ι	Ι	Ι	
3000	Ι	II	Ι	Ι	
3500	Ι	II	III	Ι	
4000	Ι	Ι	Ι	Ι	

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 6 วินาที

II.การพังทลายที่โลหะเชื่อม III, การพังทลายที่โลหะอลูมิเนียม

I.การพังทลายที่ผิวสัมผัส



ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะขอ ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และความเร็ว รอบ 2500 - 4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 8 วินาที

ภาพที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะขอ ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./ นาที และความเร็วรอบ 2500 - 4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 8 วินาที พบว่าเมื่อความเร็วเดินป้อน เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ตะขอ มีความสูงเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที เกือบทุก ความเร็วรอบ หากเชื่อมที่ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที ตะขอจะก่อตัวสูงสุดที่ความเร็วเดินป้อนที่ ต่ำกือ 4 มม./นาที และที่ความเร็วเดินป้อน 2 และ 8 มม./นาที จะเป็นสภาวะที่ทำให้การก่อตัวของ ตะขอที่น้อย ที่ทุกความเร็วรอบ และสภาวะที่ตัวแปรที่ทำให้ตะขอก่อตัวสูงสุดเท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร



ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม,/นาที ที่เวลากดแช่ 8 วินาที

ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงคึงเฉือน ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และ ความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 8 วินาที

ภาพที่ 4.25 แสดงกวามสัมพันธ์ระหว่างกวามแข็งแรงดึงเจือน ที่กวามเร็วเดินป้อน 2-8 มม./ นาที และกวามเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที ที่เวลากดแช่ 8 วินาที พบว่าวินาที เมื่อเปรียบเทียบกับ สภาวะตัวแปรการเชื่อมที่เวลากดแช่ 6 วินาที ดังภาพที่ 4.23 พบว่ากวามด้านทานแรงดึงเจือนมีก่า ต่ำลงในทุกกวามเร็วเดินป้อนที่ทุกกวามเร็วรอบตัวกวนดังภาพที่ 4.25 นั่นแสดงว่าเวลากดแช่ที่นาน เกินไปกือ 8 วินาที เป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ก่ากวามด้านทานแรงดึงเจือนต่ำ ซึ่งสังเกตจากสภาวะตัว แปรในการเชื่อมที่สูงกือกวามเร็วรอบตัวกวน 4000 รอบ/นาทีที่กวามเร็วเดินป้อนในการเชื่อม 6-8 มิลลิเมตร/นาทีจะพบว่ากวามด้านทานแรงดึงเจือนมีก่าลดลงใกล้เกียงกันเมื่อเทียบกับการเชื่อมที่ กวามเร็วเดินป้อน 2-4 มิลลิเมตร/นาทีกวามต้านทานแรงดึงเจือนจะมีก่าสูงสุดที่กวามเร็วเดินป้อน 6-8 มิลลิเมตร/นาทีจะพบว่ากามเร็วเดินป้อน 8 มิลลิเมตร/นาที กวามด้านทานแรงดึงเจือนจะมีก่าสูงสุดที่กวามเร็วเดินป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และที่กวามเร็วเดินป้อน 8 มิลลิเมตร/นาที กวามด้านทานแรงดึงเจือนจะมีก่าสูงสุดที่กวามเร็วเดินป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และที่กวามเร็วเดินป้อน 8 มิลลิเมตร/นาที กวามด้านทานแรงดึงเจือนจะมีก่าสูงสุดที่กวามเร็วเดินป้อน 6 มิลลิเมตร/นาที และที่กวามเร็วเดินป้อน 8 มิลลิเมตร/นาที กวามด้านทานแรงดึงเจือนจูงสุด 690.80 นิวดันกือกวามเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาทีกวามเร็วเดินป้อนในการเชื่อมที่ 6 มิลลิเมตร/นาทีและ เวลาในการกดแช่ 8 วินาที

ความเรื่วรอบ	ความเร็วเดินป้อน (mm./min)				
(rpm)	2	4	6	8	
2500	Ι	Ι	Ι	Ι	
3000	Ι	Ι	Ι	Ι	
3500	Ι	Ι	Ι	Ι	
4000	Ι	Ι	Ι	Ι	

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 8 วินาที

I.การพังทลายที่ผิวสัมผัส II.การพังทลายที่โลหะเชื่อม III, การพังทลายที่โลหะอลูมิเนียม

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วรอย 2500-4000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาทีและเวลากดแช่ 8 วินาที พบว่าทุกความเร็ว รอบชิ้นงานทคสอบแรงดึงเฉือนมีลักษณะการพังทลายเป็นแบบการพังทลายที่ผิวสัมผัสทุกชิ้นงาน ทคสอบซึ่งการพังทลายของชิ้นงานที่มีความแข็งแรงต่ำ ที่เป็นแบบนี้อาจเป็นเพราะทุกความเร็วรอบที่ ทำการเชื่อมมีระยะในการกดแช่ที่นานเกินไปคือ 8 วินาที

สรุป จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงเฉือนกับความสูงของตะขอ (Hook) ที่ความเร็วเดินป้อน 2-8 มม./นาที และความเร็วรอบ 2500-4000 รอบต่อนาที และวลากดแช่ที่ 2-8 วินาที พบว่า สภาวะตัวแปรในการเชื่อมที่ส่งผลให้ตะขอใต้บ่ากวนมีการก่อตัวของตะขอที่สูงสุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับสภาวะตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดของรอยต่อเกย นั่น แสดงว่าความสูงของตะขอมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดของรอยต่อเกย ซึ่งจากการศึกษา ทดลองพบว่าสภาวะตัวแปรในการเชื่อมที่ให้ก่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดที่ 863.50 นิวตันคือ ความเร็วรอบตัวกวนที่ 3500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที ที่เวลากดแช่ 4 วินาที ลักษณะ การพังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงดึงเฉือนเป็นแบบ ลักษณะการพังทลายที่โลหะอลูมิเนียม( III) และสภาวะตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกยต่ำที่ 313.48 นิวตันคือเชื่อมด้วย ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อน8 มม./นาทีและเวลากดแช่ 6 วินาที มีลักษณะการ พังทลายของชิ้นงานทดสอบแรงดึงเฉือนเป็นแบบ ลักษณะการพังทลายที่ผิวสัมผัส (1)

#### 4.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของรอยต่อเกย

ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมที่มีผลต่อค่าความด้านทานแรงคึงเฉือนของรอยต่อ เกยอลูมิเนียมผสมAA5052 กับ ทองแคงผสม C11000 ซึ่งตัวแปรในการเชื่อมเสียคทานกวนแบบจุคที่ สำคัญคือ ความเร็วรอบตัวกวนที่ 2500,3000,และ 4000 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อนในการเชื่อม 2,4,6 และ8 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 2,4,6 และ 8 วินาที ซึ่งทำการศึกษาความเร็วรอบตัวกวน, ความเร็วเดินป้อนและเวลากดแช่ในการเชื่อม พบว่าสภาวะตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด บนรอยต่อเกยอลูมิเนียมผสมAA5052 กับ ทองแดงผสมC11000 ที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน มากที่สุดคือ 863.50 นิวตัน เมื่อทำการเชื่อมด้วยสภาวะตัวแปรที่ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อนในการเชื่อม 6 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 4 วินาที ส่วนรอยเชื่อมจุดบนรอยต่อ เกยที่มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนต่ำสุดเท่ากับ 313.48 นิวตัน เมื่อทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบตัว กวน 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อนในการเชื่อม 8 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 6 วินาที โดย ทำการศึกษาวิเคราะห์สภาวะของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นแรงดึงเฉือนสูงสุดและต่ำสุดของ รอยต่อเกยด้วยการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมจุด



ภาพที่ 4.26 โครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่เชื่อมค้วยความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน ป้อน6 มม./นาที และเวลากคแช่ 4 วินาที ภาพที่ 4.26 แสดงโครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/ นาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที และเวลากดแช่ 4 วินาที เป็นชิ้นงานรอยต่อเกยที่ให้ค่าความ แข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ที่แสดงการยึดติดกันของทองแดงและ อลูมิเนียม พบว่า ภาพที่ 4.26 (ก) โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมจุดแสดงตำแหน่งต่างๆที่ทำการ ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค แสดงดังภาพที่ 4.26 (ข) แสดงตำแหน่งอินเทอร์เฟสใต้แกนกวน (I :Interface under pin stir zone) พบว่าเกิดอินเทอร์เฟสขึ้นระหว่างโลหะทองแดงและอลูมิเนียมอย่าง สมบูรณ์ มีความกว้างเฉลี่ย 35 ไมค่อน ภาพที่ 4.26 (ค) บริเวณอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวน (II: Interface under shoulder stir zone) เป็นพื้นที่ในการเชื่อมที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกล (Thermo mechanical affect zone:TMAZ) จึงทำให้เกิดอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวนจากพันธะทางโลหะที่สมบูรณ์ ระหว่างทองแดงกับอลูมิเนียมมีความกว้างเฉลี่ย 124 ไมก่อน ภาพที่4.26 (ง) เป็นพื้นที่ได้บ่ากวน บริเวณกระทบร้อนในกระบวนการเชื่อม (Heat affect zone:HAZ) พบว่าเกิดการก่อตัวที่อินเทอร์เฟส บริเวณใต้บ่ากวนมีลักษณะคล้ายตะขอ เป็นมุมแหลมประมาณ 62 องสา มีความสูงเฉลี่ยของ ตะขอ 623 ไมค่อน ภาพที่ 4.26 (จ) บริเวณที่ไม่เกิดการเชื่อมจะพบช่องว่าง (Gap) ระหว่างทองแดงกับ อลูมิเนียมมีความกว้างเฉลี่ย 5-7 ไมค่อน



ภาพที่ 4.27 โครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่เชื่อมค้วยความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดิน ป้อน 8 มม./นาที และเวลากดแช่ 6 วินาที ภาพที่ 4.27 แสดงโครงสร้างทางโลหะวิทยา ที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบตัวกวน 2500 รอบ/ นาที ความเร็วเดินป้อน 8 มม./นาที และเวลากดแช่ 6 วินาที เป็นชิ้นงานรอยต่อเกยที่ให้ค่าความ แข็งแรงดึงเถือนต่ำสุด ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ที่แสดงการยึดติดกันของทองแดงและ อลูมิเนียม พบว่า ภาพที่ 4.27 (ก) โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมจุดแสดงตำแหน่งต่างๆที่ทำการ ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค แสดงดังภาพที่ 4.27 (ข) แสดงตำแหน่งอินเทอร์เฟสใต้แกนกวน (I :Interface under pin stir zone) ไม่พบว่าเกิดอินเทอร์เฟสขึ้นระหว่างโลหะทองแดงและอลูมิเนียม เพราะบริเวณดำแหน่งแกนกวน (Stir zone:SZ) โลหะทองแดงถูกกวนหลุดออกไปหมดเหลือเพียง อลูมิเนียมเท่านั้นที่บริเวณแกนกวน ทำให้ไม่สามารถเกิดพันธะทางโลหะที่เป็นอินเทอร์เฟส ก้าพที่ 4.27 (ก) บริเวณอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวน (II: Interface under shoulder stir zone) เป็นพื้นที่ในการเชื่อม ที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนทางกล (Thermo mechanical affect zone:TMAZ) จึงทำให้เกิด อินเทอร์เฟสใต้บ่ากวนจากพันธะทางโลหะระหว่างทองแดงกับอลูมิเนียม มีความกว้างเฉลี่ย 5.70 ไมโครเมตร ภาพที่4.27(ง) เป็นพื้นที่ใต้บ่ากวนบริเวณกระทบร้อนในกระบวนการเชื่อม (Heat affect zone:HAZ) พบว่าเกิดการก่อตัวที่อินเทอร์เฟสบริเวณใต้บ่ากวนที่เป็นตะขอขึ้น มีความสูงเฉลี่ย 120 ใมโคเมตร ภาพที่ 4.27(จ) บริเวณที่ไม่เกิดการเชื่อมจะพบช่องว่าง (Gap) ระหว่างทองแดงกับ อลูมิเนียมมีความกว้างเลลี่ย 5.42 ไมโครเมตร

4.4.1 วิเคราะห์ปริมาณและการกระจายตัวของธาตุที่รอยเชื่อมด้วยเทคนิค Electron Probe Micro

Analysis (EPMA)





ภาพที่ 4.28 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิก EPMA-Mapping บริเวณตะขอ (Hook) ที่ ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 6 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 4 วินาที

ภาพที่ 4.28 การตรวจสอบการวิเคราะห์กระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิก EPMA-Mapping ดัง ภาพที่4.28(ก) บริเวณพื้นที่ตะขอ (Hook) ในการตรวจสอบการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.28(ข) แสดงการกระจายตัวของอลูมิเนียม (Aluminum) บริเวณที่ลูกศรซึ้จะเป็น บริเวณที่อลูมิเนียมกระจายอยู่หนาแน่น ภาพที่ 4.28 (ค) แสดงการกระจายตัวของทองแดง (Copper) บริเวณที่ลูกศรซึ้จะเป็นบริเวณที่พบทองแดงกระจายอยู่หนาแน่น ภาพที่ 4.28 (ง) แสดงการกระจายตัว ของแมกนีเซียม (Megnasium) บริเวณที่ลูกศรซึ้จะเป็นบริเวณที่พบแมกนีเซียมกระจายตัวอยู่ ซึ่งเป็น ธาตุที่กระจายตัวอยู่น้อยมาก



รูปที่ 4.29 ปริมาณธาตุ (%) บริเวณตะขอ (Hook) ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม/นาทีและเวลากดแช่ 4 วินาที

ภาพที่ 4.29 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเกมี ด้วยการวิเกราะห์การกระจายพลัง (Energy dispersive spectrometry : EDS) พบว่าธาตุหลักในบริเวณตะขอ ที่ทำการตรวจสอบ มีจำนวน 3 ธาตุ ใด้แก่ 1.อลูมิเนียม (AI) พบว่ามีจำนวน 58.90% 2.ทองแดง (Cu) มีอยู่จำนวน 40.64% และ3. แมกนีเซียม (Mg) มีอยู่จำนวน 0.46% ซึ่งธาตุเหลานี้มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยต่อและจาก ภาพที่ 4.29 พบว่าบริเวณตะขอมีธาตุที่เป็นทองแดงกระจายตัวอย่างหนาแน่นกว่าธาตุที่เป็นอลูมิเนียม ซึ่งเป็นรอยต่อที่มีความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด



ภาพที่ 4.30 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping บริเวณตะขอ (Hook) ที่ ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 8 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 6 วินาที ภาพที่ 4.30 การตรวจสอบการวิเคราะห์กระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ที่ เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 8 มม/นาทีและเวลากดแช่ 6 วินาที เป็น รอยต่อที่มีความแข็งแรงคึงเฉือนต่ำสุด ดังภาพที่ 4.30 (ก) บริเวณพื้นที่ตะขอ (Hook) ในการตรวจสอบ การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุต่างๆ ดังภาพที่ 4.30(ข) แสดงการกระจายตัวของอลูมิเนียม (Aluminum)บริเวณที่ลูกศรซึ้จะเป็นบริเวณที่อลูมิเนียมกระจายอยู่หนาแน่น ภาพที่ 4.30 (ก) แสดงการ กระจายตัวของทองแดง (Copper) บริเวณที่ลูกศรซึ้จะเป็นบริเวณที่พบทองแดงกระจายอยู่หนาแน่น



ภาพที่ 4.31 ปริมาณธาตุ(%)บริเวณตะขอ (Hook) ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 8 มม/นาทีและเวลากดแช่ 6 วินาที

ภาพที่ 4.31 แสดงปริมาณธาตุ (%) บริเวณตะขอ ที่กวามเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ความเร็ว เดินป้อน 8 มม/นาที และเวลากดแช่ 6 วินาที ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเกมี ด้วยการวิเกราะห์การ กระจายพลัง (Energy dispersive spectrometry : EDS) พบว่าธาตุหลักในบริเวณตะขอ ที่ทำการ ตรวจสอบ มีจำนวน 2 ธาตุ ได้แก่ 1.อลูมิเนียม (AI) พบว่ามีจำนวน 65.90% และ2.ทองแดง (Cu) มีอยู่ จำนวน 34.10% ซึ่งธาตุเหลานี้จะผสมอยู่บริเวณอินเทอร์เฟสที่เป็นตะขอใต้บ่ากวนซึ่งเกิดจากพันธะ ทางโลหะระหว่างอลูมิเนียมและทองแดงในกระบวนการเชื่อมจุด มีอิทธิพลในการเพิ่มความแข็งแรง ให้กับรอยต่อเกย



ภาพที่ 4.32 เปรียบเทียบปริมาณความหนาแน่นของปริมาณธาตุ (%) บริเวณตะขอ

ภาพที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณของธาตุที่เกิดจากการกวนรวมกันของเนื้อโลหะ (Bonded) ที่อินเทอร์เฟสระหว่างทองแดงกับอลูมิเนียมที่ก่อตัวเป็นตะขอใต้บ่ากวนอยู่ในรูปของ สารประกอบกึ่งโลหะ (IMC) ทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเกมี ด้วยการวิเกราะห์การกระจายพลัง (EDS) พบว่ามีธาตุหลักที่ผสมอยู่ 2 ชนิด คือธาตุที่เป็นทองแดงกับอลูมิเนียมบริเวณอินเทอร์เฟสที่เป็น ตะขอ พบว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็ว รอบ 3500 รอบต่อนาที กวามเร็วเดินป้อน 6 มม./นาที ที่เวลา กดแช่ 4 วินาทีให้ก่าแรงดึงเฉือนสูงสุด 863.50 นิวตัน เมื่อเทียบกับรอยต่อที่ให้แรงดึงเลือนต่ำสุดคือ เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ความเร็วเดินป้อน 8 มม./นาทีที่เวลากดแช่ 6 วินาที พบว่า รอยต่อที่ให้ก่าแรงดึงเฉือนสูงสุดมีปริมาณธาตุที่เป็นอลูมิเนียมผสมอยู่น้อยขณะที่ธาตุที่เป็นทองแดง จะผสมอยู่มากกว่า รอยเชื่อมที่ให้แรงดึงเฉือนด่ำ ซึ่งธาตุต่างๆที่พบบริเวณอินเทอร์เฟสจะอยู่ในรูป ของสารประกอบกิ่งโลหะ (IMC) ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเกย [29



ภาพที่ 4.33 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping บริเวณอินเทอร์เฟสที่ ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 6 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 4 วินาที

ภาพที่ 4.33 การตรวจสอบการวิเคราะห์กระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping ที่ เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม/นาทีและเวลากดแช่ 4 วินาที เป็น รอยต่อที่มีความแข็งแรงคึงเฉือนสูงสุด ดังภาพที่4.33 (ก) บริเวณพื้นที่อินเทอร์เฟส (Interface) ในการ ตรวจสอบการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุต่างๆ ดังภาพที่ 4.33 (ข) แสดงการกระจายตัวของ อลูมิเนียม (Aluminum) บริเวณที่ถูกศรชี้จะเป็นบริเวณที่อลูมิเนียมกระจายอยู่หนาแน่น ภาพที่ 4.33 (ก) แสดงการกระจายตัวของทองแดง (Copper) บริเวณที่ถูกศรชี้จะเป็นบริเวณที่พบทองแดงกระจายอยู่ หนาแน่น และภาพที่ 4.33 (ง) แสดงการกระจายตัวของแมกนีเซียม (Megnasium) บริเวณที่ถูกศรชี้จะ เป็นบริเวณที่พบแมกนีเซียมกระจายตัวอยู่ ซึ่งเป็นธาตุที่กระจายตัวอยู่น้อยมาก บริเวณอินเทอร์เฟสใต้ บ่ากวน



ภาพที่ 4.34 ปริมาณธาตุ (%) บริเวณอินเทอร์เฟส (Interface) ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ความเร็ว เดินป้อน 6 มม/นาทีและเวลากดแช่ 4 วินาที

ภาพที่ 4.34 แสดงปริมาณชาตุ (%) บริเวณอินเทอร์เฟส (Interface) ที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 6 มม/นาทีและเวลากดแช่ 4 วินาที เป็นอินเทอร์เฟสที่ให้ค่าแรงดึงเฉือน สูงสุด ซึ่งผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลัง (Energy dispersive spectrometry , EDS) พบว่ามีชาตุหลักบริเวณอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวนที่ทำการตรวจสอบมีจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ 1.อลูมิเนียม (Al) พบว่ามีความหนาแน่น 58.99 % 2.ทองแดง (Cu) มีความหนาแน่น กระจายอยู่ในอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวนจำนวน 40.33 % และแมกนีเซียม (Mg) พบว่ามีการกระจายอยู่ใน อินเทอร์เฟสที่น้อยมากจำนวน 0.69% เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณชาตุบริเวณตะขอใต้บ่ากวน พบว่ามี ชาตุผสมอยู่จำนวน 3 ชนิดได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และแมกนีเซียม มีปริมาณความหนาแน่นกระจาย อยู่ที่อินเทอร์เฟสที่เป็นตะขอและอินเทอร์เฟสได้บ่ากวนมีปริมาณของชาตุทั้ง 3 ชนิด ปริมาณที่ ใกล้เกียงกันมาก แสดงดังภาพที่ 4.29 และภาพที่ 4.34



ภาพที่ 4.35 วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping บริเวณอินเทอร์เฟสที่ ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 8 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากดแช่ 6 วินาที

ภาพที่ 4.35 แสดงการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA-Mapping บริเวณอินเทอร์เฟส ใต้บ่ากวน ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที ความเร็วเดินป้อน 8 มิลลิเมตร/นาทีและเวลากคแช่ 6 วินาที เป็นอินเทอร์เฟสของรอยต่อที่ให้ค่าแรงดึงเฉือนต่ำสุด แสดงดังภาพที่4.35(ก) บริเวณพื้นที่ อินเทอร์เฟส(Interface) ในการตรวจสอบการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ภาพที่ 4.35(ข) พบว่ามี การกระจายตัวของอลูมิเนียม (Aluminum) บริเวณที่ลูกศรชี้กระจายอยู่อย่างหนาแน่นมีปริมาณของ อลูมิเนียม 68.73% ด้วยการนำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี จากการวิเคราะห์การกระจายพลัง (EDS) แสดงดังภาพที่4.36 การกระจายตัวของธาตุที่เป็นทองแดง แสดงดังภาพที่4.35(ค) พบลักษณะ การกระจายของธาตุทองแดงบริเวณที่ลูกศรชี้ปริมาณหนาแน่น จากภาพที่ 4.36 พบว่ามีปริมาณของ ธาตุที่เป็นทองแดง 30.34 % บริเวณอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวนและภาพที่4.35 (ง) พบว่ามีธาตุแมกนีเซีย มักระจายอยู่บริเวณอินเทอร์เฟสค่อนข้างน้อยมาก บริเวณที่ลูกศรชี้จะมีแมกนีเซียมกระจายตัวอยู่ ด้วย การตรวจสอบการวิเคราะห์ EDS พบธาตุที่เป็นแมกนีเซียมมีปริมาณ 0.92% ที่อินเทอร์เฟสใต้บ่ากวน



ภาพที่ 4.36 เปรียบเทียบปริมาณความหนาแน่นของปริมาณธาตุ (%) บริเวณอินเทอร์เฟส

ภาพที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณของธาตุที่เกิดจากพันธะทางโลหะ (Bonded) ระหว่างโลหะทองแดงกับอลูมิเนียมบริเวณใด้บ่ากวนที่อยู่ในรูปของสารประกอบกึ่งโลหะ (IMC) หากเชื่อมด้วยสภาวะตัวแปรที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นรอยเชื่อมที่ให้ค่าแรงดึงเลือน ต่ำสุด พบว่าธาตุที่เป็นทองแดงมีปริมาณที่ผสมอยู่น้อยกว่าธาตุที่เป็นอลูมิเนียม แต่เมื่อเทียบกับสภาวะ ตัวแปรที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงเลือนสูงสุด พบว่าอินเทอร์เฟสจะมีธาตุที่เป็นทองแดงผสมอยู่มากกว่าแต่ขณะเดียวกันธาตุที่เป็นอลูมิเนียมกลับมี ปริมาณที่น้อยกว่าที่เชื่อมด้วยสภาวะตัวแปร 2500 รอบต่อนาที ดังนั้นรอยเชื่อมที่มีธาตุทองแดงผสม อยู่มากกว่าธาตุที่เป็นอลูมิเนียมบริเวณอินเทอร์เฟสอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้รอยเชื่อมนั้นมีความ แข็งแรงสูง เนื่องมีสารประกอบกึ่งโลหะที่อินเทอร์เฟสของโลหะอลูมิเนียมและทองแดงลูกกวน รวมตัวกันอยู่อย่างหนาแน่น โดยนำไปทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงเลือนสูงสุดพบว่ารอยเชื่อมที่ มีปริมาณของธาตุที่เป็นทองแดงผสมอยู่มากกว่าธาตุที่เป็นอลูมิเนียม จะให้ก่าความแข็งแรงดึงเลือน สูงสุด 863.50 นิวตัน เป็นรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาทีกวามเร็วเดินป้อน 6 มม./ นาทีที่เวลากดแช่ 4 วินาทีกือรอยด่อทีมีกวามแข็งแรงดึงเลือนสูงสุด



ภาพที่ 4.37 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนต่ำสุด

ภาพที่ 4.37 แสดงการพังทลายของรอยเชื่อมที่มีก่าความแข็งแรงคึงเฉือนต่ำสุด ภาพ(ก) รอย เชื่อมที่แผ่นทองแดงด้านล่าง และ ภาพ(ข) รอยเชื่อมที่แผ่นอลูมิเนียมด้านบนทิศทางแรงคึงตามลูกศร ในตำแหน่งที่.I และ II พบว่าลักษณะการฉีกขาดเกิดขึ้นที่ผิวหน้ารอยเชื่อม หรือเกิดการพังทลายผ่าน บริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างทองแดงและอลูมิเนียม พบว่ารอยฉีกขาดทั้งสองตำแหน่งของการ ตรวจสอบมีลักษณะที่เหมือนกัน คือเป็นหลุมตื้นๆ ขนาดเล็กไม่เกิดการยึดตัวของรอยฉีกขาดของเนื้อ วัสดุ แสดงว่าการพังทลายหลังทดสอบแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีลักษณะการแตกหักของเนื้อวัสดุ แบบเปราะ ซึ่งเป็นผลทำให้รอยเชื่อมมีก่ากวามแข็งแรงดึงที่ต่ำ [32]



ภาพที่ 4.38 ภาพถ่าย SEM การพังทลายของรอยเชื่อมที่มีค่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด

ภาพที่ 4.38 แสดงลักษณะการพังทลายของรอยต่อที่มีก่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุด โดย เชื่อมที่กวามเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที กวามเร็วเดินป้อนตัวกวน 6 มม./นาที และเวลาในการกดแช่ 4 วินาที ภาพที่ 4.38(ก) แสดงรอยเชื่อมที่แผ่นทองแดงด้านล่าง และ ภาพที่ 4.38(ข) แสดงรอยเชื่อมที่ แผ่นอลูมิเนียมด้านบน มีทิสทางแรงดึงตามลูกสรในตำแหน่งที่.1 และ II บนผิวรอยเชื่อม พบว่า ลักษณะของรอยฉีกขาดหรือการพังทลายเป็นที่ โลหะอลูมิเนียมจะถูกดึงฉีกขาดหลุดติดไปกับด้าน แผ่น โลหะทองแดง ดังภาพที่ 4.38(ก) และมีทิสทางการฉีกขาดตามแนวดึงของการทดสอบแรงดึง เฉือน ภาพขยายของพื้นผิวการแตกหักบริเวณ I และ II ที่เกิดการยึดติดของโลหะทั้งสอง รอยพังทลาย มีลักษณะ โดยรวมเป็นหลุมขนาดใหญ่ลึกและตื้นสลับกันเป็นรอยหลุมยาวขนาดต่างๆ ในทิสทางตาม แรงดึงเฉือน ซึ่งบ่งชี้ว่าลักษณะการพังทลายเป็นรูปแบบการแตกหักแบบเหนียว รอยแตกหักที่เป็น หลุมยาวเหล่านี้บ่งบอกถึงการยึดเกาะของโลหะทั้งสองที่มีคุณภาพสูงในตำแหน่งนี้ [33,34] ซึ่งเป็น การพังทลายของรอยเชื่อมที่ให้ก่าดวามแข็งแรงเฉือนที่สูงสุด



ภาพที่ 4.39 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมจุด (ก) Stir Zone (SZ), (ข) Thermo-Mechanical Affect Zone (TMAZ), (ก) Heat Affect Zone (HAZ), (ง) Bead Metal (BM)

ผลการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ให้ก่าความแข็งแรงดึงเฉือนสูงสุดที่ความเร็ว รอบ 3500 รอบ/นาทีเวลาในการกดแช่ 4 วินาที อัตราป้อนในการกดตัวกวน 6 มม/นาที โดยทำการ ทดสอบความแข็งบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานออกไปด้านละ 9 จุด ระยะห่างของรอยกด 1 มม ตาม มาตรฐาน ASTM-E 92-82 ดังภาพที่ 4.39 พบว่า ก่าความแข็งของบริเวณโลหะรอยเชื่อมจุดทั้งสอง ชนิดที่ระยะการทดสอบ -6 ถึง 6 ที่แสดงดังจุด (ค) HAZ, (ข) TMAZ และ (ก) SZ มีก่าความแข็งต่ำกว่า บริเวณโลหะเดิมดังจุด (ง) BM ทั้งสองด้าน ขณะที่ก่าความแข็งของทองแดง C11000 มีก่าความแข็งต่ำกว่า บริเวณโลหะเดิมดังจุด (ง) BM ทั้งสองด้าน ขณะที่ก่าความแข็งของทองแดง C11000 มีก่าความแข็งสูง กว่าอลูมิเนียมผสม AA5052 เกือบทุกระยะการทดสอบ แต่มีต่ำกว่าบริเวณ TMAZ ใกล้ขอบของตัว กวนทั้งสองด้าน จากการทดลองสรุป ได้ว่าบริเวณรอยเชื่อมที่ได้รับความร้อนจากการเชื่อมกวนแบบ จุดโลหะทั้งสองชนิดมีกวามแข็งที่ลดลงกว่าบริเวณโลหะเดิมที่ไม่ได้รับความร้อนจากการเสียดทาน อาจจะเป็นเพราะว่าโลหะทั้งสองชนิดมีสมบัติในการถ่ายเทความร้อนที่เร็วจึงทำให้ความร้อนไม่มีผล ต่อความแข็งของโลหะที่เป็นชิ้นงานทั้งสองชนิด

# บทที่ 5

## สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองนี้ ซึ่งได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงเลือนของรอยต่อเกยการเชื่อมเสียด ทานกวนแบบจุดระหว่าง ทองแดงผสม C11000 และอลูมิเนียมผสม AA5052 โดยมีการศึกษาตัวแปร การเชื่อม ที่ประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัวกวน ความเร็วในการเดินป้อนตัวกวนและระยะเวลาใน การกดแช่ โดยชิ้นงานที่เป็น ทองแดงผสม C11000 มีขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร กว้าง 30 มิลลิเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร และอลูมิเนียมผสม AA5052 มีขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร กว้าง 30 มิลลิเมตร และ ความหนา 1 มิลลิเมตร แต่อลูมิเนียมผสม AA5052 มีขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร กว้าง 30 มิลลิเมตร และ ความหนา 1 มิลลิเมตร เพื่อหาสภาวะตัวแปรในการเชื่อมที่เหมาะสม และให้ได้ สมบัติทางกลที่ดีที่สุด นอกจากนั้นได้ทำการวัดขนาดความกว้างและความสูงของบริเวณที่เกิดการ เชื่อมยึด(Interface) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นที่ที่เกิดการเชื่อมยึดและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ระหว่างโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของรอยต่อ โดยผลที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปได้ ดังนี้

5.1 สรุปผลการทคลอง

5.1.1 ตัวแปรการเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือน ของรอยต่อเกยระหว่าง ทองแดงผสม C11000 และอลูมิเนียม ผสม AA5052 ระยะความลึกในการสอดตัวกวน 1 มิลลิเมตรคือ ความเร็วรอบตัวกวน 3500 รอบ/นาที ระยะเวลาในการกดแช่ 4 วินาที และ ความเร็วเดินป้อนตัวกวน 6 มม./นาที โดยให้ค่าแรงดึงเฉือนสูงสุด 863.50 นิวตัน

5.1.2 การตรวจสอบ โครงสร้างทางมหภาค พบเกิดการก่อตัวของตะขอ (Hook) บริเวณ อินเทอร์เฟสใต้บ่าของรอยเชื่อม ที่เกิดการกวนรวมของเนื้อโลหะ (Bonded) ระหว่างทองแดงและ อลูมิเนียมพบว่าเมื่อความเร็วรอบและความเร็วเดินป้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการก่อตัวของตะขอที่เพิ่ม สูงขึ้น 623 ใมโครเมตรคือ สภาวะที่ให้ก่าแรงคึงเฉือนสูงสุด

5.1.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อม ทำการการตรวจสอบส่วนผสมทาง เกมี ด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลัง (Energy dispersive spectrometry : EDS) บริเวณอินเทอร์เฟสที่ เป็น ตะขอและอินเทอร์เฟสใต้บ่ากวน พบว่ามีปริมาณของทองแดงที่กระจายตัวรวมกับอลูมิเนียมที่ อินเทอร์เฟสมีปริมาณที่มากกว่ารอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดึงเฉือนต่ำ นั่นแสดว่าปริมาณของ ทองแดงที่บริเวณอินเทอร์เฟสถ้ามีอยู่จำนวนมากจะส่งผลต่อกวามแข็งแรงดึงเฉือนที่สูงขึ้นของรอยต่อ 5.1.4 รูปแบบลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทคสอบที่แรงคึงเฉือนสูงสุด จะเป็นการ พังทลายที่โลหะอลูมิเนียม (Base Metal Fracture) มีรูปแบบลักษณะแตกหักหรือพังทลายแบบเหนียว และชิ้นงานทคสอบที่แรงคึงเฉือนต่ำสุด ลักษณะการพังทลายจะเป็นแบบการพังทลายที่ผิวสัมผัส (Interface Fracture)

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเตรียมชิ้นงาน

5.2.1.1การเตรียมชิ้นงานทดสอบซึ่งเป็นส่วนสำคัญ จะต้องเตรียมชิ้นงานให้ได้ ขนาดตามมาตรฐาน จะต้องทำการตกแต่งครีบที่เกิดจากการตัดให้หมด เพราะถ้ากำจัดกรีบไม่หมด จะส่งผลกระทบต่อการเชื่อมยึดของรอยต่อ และในการเตรียมชิ้นทดสอบจะต้องไม่ไห้ชิ้นทดสอบ เกิดการบิดเบี้ยว ซึ่งหากชิ้นทดสอบเกิดการบิดเบี้ยวก็จะส่งผลกระทบต่อการเชื่อมยึดของรอยต่อ เช่นกัน

5.2.1.2 ก่อนทำการเชื่อมควรทำความสะอาคของชิ้นทคสอบให้สะอาคปราศจากสิ่ง สกปรกต่าง ๆในขณะประกอบชิ้นทคสอบกับอุปกรณ์จับยึดจะต้องตรวจสอบชิ้นทคสอบไม่ให้เกิด การหลวมคลอน



### รายการอ้างอิง

- Li Xia-wei, ZHANG Da-tong, QIU Cheng and ZHANG Wen., Microstructure and mechanical Properties of dissimilar pure copper and 1350 aluminum alloy butt joints by friction stir welding. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 22,(2012). 1298-1306.
- [2] Saijad Gholami SHIRI, Mohsen NAZARZADEH, Mahmood SHARIFITABAR and Mehdi Shafiee AFARANI., Gas tungsten arc welding of CP-copper to 304 stainless steel using different filler materials. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 22, 2012. pp.2937-2942.
- [3] ธวัช หมีเฟือง และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์.2551.อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเสียดทานแบบจุดต่อสมบัติ ของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม 5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม430. การประชุมวิชาการ ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, สงขลา, 22-24 ตุลาคม 2551. หน้า 834-839
- [4] H. Bisadi, A. Tavakori, M. Tour Sangsaraki, and K. Tour Sangsaraki., The influences of rotational and mechanical properties of friction stir welding Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints. Materials and Design. 43,(2013).80-88.
- [5] P. Xue, D.R. Ni, D. Wang, B.L. Xiao and Z.Y. Ma., Effect friction stir welding perameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints. Materials Science and Engineering A. 528, 2011, pp.4683-4689.
- [6] Y.F. Sun and H. Fujii., Microstructure and mechanical properties of dissimilar spot friction stir welded Zr<sub>55</sub>Cu<sub>30</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub> bulk metallic glass to pure copper. Intermetallics. 33, 2012. pp.113-119.
- [7] Y.C. Chen, A. Gholinia and P.B. Prangnell., Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding A novel approach for rapid welding aluminium alloy steel automotive sheet. Material Chemistry and Plysics. 134, 2012. pp. 459-463.
- [8] Chi-Sung JEON, Sung-Tea HONG, Yong-Jai KWON, Hoon-Hwe CHO and Heung Nam HAN., Meterial properties of friction stir spot welding joints of dissimilar aluminum alloys. Nonferrous Met. Soc. 22,(2012.) .605-613.
- [9] Pierluigi Fanelli, Francesco Vivio and Vincenzo Vullo., Experimental and numerical characterization of Friction Stir Spot Weld joints. Engineering Fracture Mechanics. 81, (2012).17-25.

- [10] V.-X. Tran, J. Pan and T. Pan., Fatigue behavior of spot friction welds in lap-shear and cross tension specimens of dissimilar aluminum sheets. International Journal of Fatigue. 32, 2010. pp.1022-1041.
- [11] สุทธิพร คงเพีชร์, กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และ สุรัตน์ ตรัยวนพงษ์. 2555.ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดต่อ ความด้านทานแรงดึงเฉือน ของการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ระหว่างอลูมิเนียมผสม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACC. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, เพชรบุรี, 17-19 ตุลาคม 2555. หน้า 1624-1630.
- [12] Sladjan Lazarevic, Scott F. Miller, Jingjing Li and Blair E. Carlson., Experimental analysis of friction stir forming for dissimilar material joining application. Journal of Manufacturing Processes. ,2013.pp. xxx-xxx.
- [13] Y.F. Sun, H. Fujii, N. Takaki and Y. Okitsu., Microstructure and mechanical properties of mild steel joints prepared by a flat friction stir spot welding technique. Materials and Design. 37, 2012. pp. 384-392
- [14] S.H. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X. Cao and P. Wanjara., Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium to aluminum joints with adhesive. Materials Science and Engineering A. 562, 2013. pp.53-60.
- [15] รศ.แม้น อมรสิทธิ์, รศ.ดร.สมชัย อักรทิวา,อ.ธรรมนูญ อุคมมั่น, วัสดุวิศวกรรม (Foundations of Materials Science and Engineering4/E). พิมพ์กรั้งที่ 4. กรุงเทพฯ:สานักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, 2008. หน้า 226.
- [16] อลูมิเนียม. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:

<u>http://www.aluminiumlearning.com/. (28 พฤศจิกายน 2556).</u>

- [17] ศิริพร คาวพิเศษ, วัสดุวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่7. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553. หน้า 241-283
- [18] มาตรฐานทองแดง. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก.
  http://www.keytometals.com/old/page.aspx?ID=CopperStandards&LN=TH.
  (28 พฤศจิกายน 2556).
- [19] Q. Yanga, S. Mironovb, Y.S. Satob, K. Okamotoc., Material flow during friction stir spot welding. Materials Science and Engineering A. 527, 2010. pp. 4389–4398
- [20] มานพ ตันตระบัณฑิตย์, งานทคสอบวัสดุวิศวกรรม(ฉบับปรับปรุง). พิมพ์ครั้งที่15. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2546. หน้า 48-60.

- [21] Japanese Industrial Standard 1995., Method of Tension Shear Test for Spot welding Joint. Japanese Standard Association, Japan, JIS Z 3136-1978. pp.637-639.
- [22] ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain). [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
  http://sp1supachai.files.wordpress.com/2011/07/stress1.pdf. (10 มกราคม 2557).
- [23] เสกสรร อัสวะวิสิทธิ์ชัย, การวิเคราะห์ความเสียหายทางโลหะการ. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.หน้า 79-115.
- [24] ASTM International., "Standard Practice for Microetching Metals and Alloys E 407-99," Annual Book of ASTM Standard, Volume 03.01, 1996. pp. 1-21.
- [25] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. การเชื่อมเสียดทานแบบจุดของรอยต่อเกยอลูมิเนียมผสมเกรด 1100 และ เหล็กกล้าไร้สนิม 304. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสยาม, ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 เล่มที่ 15, หน้า 56-61.
- [26] T. Saeid, A. Abdollah-zadeh and B. Sazgari., Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction sir welding. Journal of Alloys and Compounds. 490, 2010. pp. 652-655.
- [27] วัชรพงษ์ พิญญะพันธ์, ศิริพล หลานดินทองดี, และ ประดุง บุญประกอบ. 2551. "การเชื่อมด้วย การเสียดทานแบบจุดบนรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA5052 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ ริติก 430." ปริญญานิพนธ์ ภากวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ กณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทกโนโลยีราชมงกลธัญบุรี.
- [28] W. Yuan, RS. Mishra, S. Webb, Y.L. Chen, B. Carson, D.R. Herling and G.J. Grant., Effect of tool design and process parameter on properties of Al alloy 6061 friction stir spot welding. Materials Processing Technology . 211,(2011).972-977.
- [29] P.-C. Lin., J. Pan., T. Pan. 2008. Failure mode and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool. International Journal of Fatigue 30: 74-78
- [30] S. Bozzi., A.L. Helbert-Etter., T. Baudin., B. Criqui., and J.G. Kerbiguet.1995.,Intermetalic compounds in Al 6061/IF-steel friction stir spot welding. Meaterial since and Engineering A527.(2010). pp.4505-4509
- [31] Mishra RS and Ma ZY., Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminumcopper lap joints made by resistance spot welding. Mater Sci Eng R. 50,(2005).1-78

- [32] Hyung-Seop Shin, and Yoon-Chul Jung. 2010. Characteristics of friction stir spot wilding of Zr-vasedbulk metallic glass sheets. Journal of Alloys and Compounds 5045 (2010) 5279-5282.
- [33] Zhaohua Zhang, Xinqi Yang, Jialong Zhang, Guang Zhou, XiaodongXu, and BinlianZou., Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. Materials and Design 32 (2011) 4461-4470.
- [34] Y. Tozakia, Y. Uematsub, K. Tokaji., A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance. Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 844–851.







### ก.1 ลักษณะโครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อม

ก.1.1 โครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที เวลากคแช่ 2 วินาที



ก.1.2 โครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 2 วินาที



ก.1.3 โครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 2 วินาที



ก.1.4 โครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 2 วินาที



ก.1.5 โครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 4 วินาที



ก.1.6 โครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อมที่ความเรื่ารอบ 3000 รอบต่อนาที เวลากคแช่ 4 วินาที



ก.1.7 โครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 4 วินาที



ก.1.8 โครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 4 วินาที



ก.1.9 โครงสร้างมหาภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที เวลากคแช่ 6 วินาที



ก.1.10 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมค้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เวลากคแช่ 6 วินาที



ก.1.11 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เวลากคแช่ 6 วินาที



ก.1.12 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที เวลากคแช่ 6 วินาที



- (n) 2500/2/8 (1) 2500/4/8 I I SZ 2mm 2mm .............. (3) 2500/8/8 (ค) 2500/6/8 Π I Ι II SZ 2mm 2mm
- ก.1.13 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 8 วินาที

ก.1.14 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 8 วินาที



ก.1.15 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 8 วินาที



ก.1.16 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที เวลากดแช่ 8 วินาที




## ข.1 ลักษณะโครงสร้างมหภาคการก่อตัวของตะขอ (Hook)



ข.1.1 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที เวลากดแช 2 วินาที

ข.1.2 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที เวลากคแช 2 วินาที



ข.1.3 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลากดแช 2 วินาที



ข.1.4 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เวลากคแช 2 วินาที



ข.1.5 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที เวลากดแช 4 วินาที



ข.1.6 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที เวลากคแช 4 วินาที



ข.1.7 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลากดแช 4 วินาที



ข.1.8 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เวลากดแช 4 วินาที







ข.1.10 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที เวลากคแช 6 วินาที





## ข.1.11 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลากดแช 6 วินาที

ข.1.12 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เวลากดแช 6 วินาที





## ข.1.13 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 2500 รอบ/นาที เวลากดแช 8 วินาที

ข.1.14 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที เวลากดแช 8 วินาที





## ข.1.15 ลักษณะ โครงสร้างมหภากของตะขอที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลากดแช 8 วินาที

ข.1.16 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของตะขอที่ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที เวลากดแช 8 วินาที





	ความเร็	วรอบ 2500	รอบ/นาที่ย	อัตราป้อน 2 :	ุ่มลลเมตร/นาท	
		17	อลากดแช่(วิน	เาที)		
	ชิ้นที่	2	4	6	8	
	1	431.75	682.95	565.20	431.75	
	2	455.30	706.50	628.00	471.00	
	3	486.70	682.95	596.60	416.05	
	รวม	1373.75	2072.40	1789.80	1318.80	
	ค่าแรงเฉลี่ย	457.92	690.80	596.60	439.60	
	(นิวตัน)					
(Max-average)	+	28.78	15.70	31.40	31.40	
(average-Man)	64-51	26.17	7.85	31.40	23.55	
(Max-average) (average-Man)	+	26.17	7.85	31.40	23.55	
			daab			



				F AJ DI DI DI DAJ VI A/ PA		
		28	เวลากดแข	ช่(วินาที)		
	ชิ้นที่	2	4	6	8	
		588.75	785.00	643.70	486.70	
	2	596.60	745.75	628.00	533.80	
	3	549.50	761.45	596.60	565.20	
					5	
	รวม	1734.85	2292.20	1868.30	1585.70	
	ค่าแรงเฉลี่ย	578.28	764.07	622.77	528.57	
	(นิวตัน)	eller				
(Max-average)	+	18.32	20.93	20.93	36.63	
(average-Man)	-	28.78	18.32	26.17	41.87	
			0000			

	ความเ	รัวรอบ 250	0 รอบ/ นาทิ	0 รอบ/นาทอตราปอน 6		
	ชิ้นที่	2	4	6	8	
	1	647.63	785.00	612.30	533.80	
	2	533.80	667.25	596.60	549.50	
	3	569.13	706.50	596.60	588.75	
			A			
	รวม	1750.55	2158.75	1805.50	1672.05	
	ค่าแรงเฉลีย	583.52	719.58	601.83	557.35	
	(นิวตัน)					
(Max-average)	+	64.11	65.42	10.47	31.40	
(average-Man)	-	49.72	52.33	5.23	23.55	



	ความเรี	วรอบ 3000	รอบ/นาทิ เ	อัตราป้อน 2	มิลลิเมตร/นา
		13	เลากดแช่(วิน	เาที)	
	ชิ้นที่	2	4	6	8
	1	565.20	706.50	471.00	408.20
	2	533.80	675.10	408.20	376.80
	3	588.75	730.05	455.30	329.70
	รวม	1687.75	2111.65	1334.50	1114.70
	<mark>ค่าแรงเฉ</mark> ลี่ย	562.58	703.88	444.83	371.57
	(นิวตัน)				
(Max-average)	+	26.17	26.17	26.17	36.63
(average-Man)		28.78	28.78	36.63	41.87
		2	222		
		4			

# ความเร็วรอบ 30000 รอบ/ นาที อัตราป้อน 4

	ความเ	รีวรอบ 300	00 รอบ/ นาร	ำ อัคราป้อน	4 มิลลิเมตร/นาที
		28	เวลากดแข	ช่(วินาที)	
	ชิ้นที่	2	4	6	8
	1993/	612.30	706.50	628.00	439.60
	2	590.32	745.75	573.05	463.15
	23	628.00	694.73	608.38	376.80
	รวม	1830.62	2146.98	1809.43	1279.55
	ค่าแรงเฉลี่ย	610.21	715.66	603.14	426.52
	(นิวตัน)	2			
(Max-average)	+	17.79	30.09	24.86	13.08
(average-Man)	-	19.89	20.93	30.09	49.72

	ความเ	ริวรอบ 300	0 รอบ/ นาที	รอบ/นาทีอัตราป้อน 6		
			เวลากดแช	ช่(วินาที)		
	ชิ้นที่	2	4	6	8	
	1	628.00	745.75	667.25	533.80	
	2	667.25	769.30	690.80	588.75	
	3	690.80	824.25	628.00	565.20	
			$\bigcirc$			
	รวม	1986.05	2339.30	1986.05	1687.75	
	deven e dev	662.02	770 77	662.02	EC2 E0	
	ศาแรงเฉลย (นิวตัน)	002.02	119.11	002.02	502.50	
(Max-average)	+	28.78	44.48	28.78	26.17	
(average-Man)	(3 <del>1</del> )	34.02	34.02	34.02	28.78	



	ความเ	ความเรวรอบ 30000 รอบ/ นาท อัตราปอน 8 มลลเมตร							
	683	100							
	ชิ้นที่	2	4	6	8				
	1	596.60	392.50	353.25	354.82				
	2	549.50	423.90	368.95	412.13				
	3	580.90	376.80	314.00	329.70				
	รวม	1727.00	1193.20	1036.20	1096.65				
	ค่าแรงเฉลี่ย	575.67	397.73	345.40	365.55				
	(นิวตัน)	<i><b>S</b></i>	ปิลขีรไ						
(Max-average)	+	20.93	26.17	23.55	46.58				
(average-Man)	-	26.17	20.93	31.40	35.85				

	ความเ	ริวรอบ 350	0 รอบ/ นาที	อัตราป้อน 2	2 มิลลิเมตร/น	าที
			เวลากดแข	ช <mark>่(วินาที)</mark>		
	ชิ้นที่	2	4	6	8	
	1	565.20	533.80	549.50	412.13	
	2	541.65	565.20	510.25	457.66	
	3	525.95	510.25	533.80	380.73	
	รวม	1632.80	1609.25	1593.55	1250.51	
	ค่าแรงเฉลี่ย	544.27	536.42	531.18	416.84	
	(นิวตัน)					
(Max-average)	+	20.93	28.78	18.32	40.82	
	-	18.32	26.17	20.93	36.11	



	ความเ	ริวรอบ 350	0 รอบ/ นาที	์ มลลเมตร/นาท	
			เวลากดแข	ช่(วินาที)	
	ชิ้นที่	2	4	6	8
	1	777.15	824.25	824.25	667.25
	2	808.55	863.50	808.55	698.65
	3	761.45	902.75	824.25	706.50
	รวม	2347.15	2590.50	2457.05	2072.40
	<mark>ค่าแรงเฉลี่ย</mark>	782.38	863.50	819.02	690.80
	(นิวตัน)				
(Max-average)	+	26.17	39.25	5.23	15.70
(average-Man)		20.93	39.25	10.47	23.55



	ความเ	ร็วรอบ 400	0 รอบ/ นาที	อัตราป้อน 2	2 มิลลิเมตร/น	เาที
			เวลากดแข	่(วินาที)		
	ชิ้นที่	2	4	6	8	
	1	684.52	667.25	588.75	588.75	
	2	628.00	706.50	647.63	628.00	
	3	663.33	745.75	628.00	612.30	
	รวม	1975.85	2119.50	1864.38	1829.05	
	ค่าแรงเฉลีย	658.62	706.50	621.46	609.68	
	(นิวตัน)					
(Max-average)	+	25.91	39.25	26.17	18.32	
(average-Man)		30.61	39.25	32.71	20.93	



	ความเ	ร็วรอบ 400	0 รอบ/ นาที	อัตราป้อน 6 มิลลิเมตร/นาร์		
			เวลากดแข	่(วินาที)		
	ชิ้นที่	2	4	6	8	
	1	706.50	761.45	667.25	486.70	
	2	706.50	667.25	612.30	455.30	
	3	667.25	726.13	628.00	459.23	
	รวม	2080.25	2154.83	1907.55	1401.23	
	ค่าแรงเฉลี่ย	693.42	718.28	635.85	467.08	
	(นิวตัน)					
(Max-average)	+	13.08	43.18	31.40	19.63	
(average-Man)	-	26.17	51.03	23.55	11.78	



				10	
			เวลากดแข	่}(วินาที)	
	ชิ้นที่	<b>2</b>	4	6	8
	2018/4	416.05	471.00	588.75	431.75
	2	471.00	439.60	565.20	486.70
	3	439.60	439.60	549.50	455.30
	รวม	1326.65	1350.20	1703.45	1373.75
	ค่าแรงเฉลี่ย (มิวตับ)	442.22	450.07	567.82	457.92
(Max-average)	(มพเม) +	28.78	20.93	20.93	28.78
(average-Man)	-	26.17	10.47	18.32	26.17



ดร.สุรศักดิ์ บุญแต่ง รองศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ โอสถสภา ดร.พิทยากร ลิ่มทอง รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิสุนทร 1 รองศาสตราจารย์ ดร.อกิศักดิ์ โพธิ์ อ.ดร.วิสุทธิ์ วีรสาร รองศาสตราจารย์ ดร.งามชื่น รัตนดิลก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.งามชื่น รัตนดิลก

#### ผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาวิศวกรรมศาสตร์

#### ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

รองศาสตราจารย์ประเทือง อุษาบริสุทธิ์

รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล

รองศาสตราจารย์วิชา หมั่นทำการ อ.ดร.วันรัฐ อับดุลลากาซิม

อ.คร.วัชรพล ชยประเสริฐ

อ.ดร.อาทิตย์ พวงสมบุติ

อ.นงลักษณ์ สมันตรัฐ

อ.ศุภชัย กุลมุติวัฒน์

อ.สีรินาฏ น้อยพิทักษ์

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

รองศาสตราจารย์ปานมนัส ศีริสมบูรณ์

รองศาลตราจารย์ลาทีป รัตนภาลกร

ผู้ช่วยศาลตราจารย์ ดร.วรดิษฐ์ ตรูทัศนวินท์

อ.คร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค

อ.ดร.กระวี ตรีอำนรรค

อ.ดร.เกรียงไกร แซมลีม่วง

อ.ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร

อ.ดร.นักรบ นาคประสม

อ.ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช

อ.ดร.นฤมล บุญกระจ่าง

## ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

รศ.ดร.บัญชา ขวัญยืน

รศ.ดร.วราวุธ วุฒิวณิชย์ ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ โพลิตลกุลชัย อ.ดร.สมชาย ดอนเจดีย์ อ.ดร.วิระกานต์ ศิริวิชญ์ไมตรี อ.ดร.วิษุวัฒก์ แต้ลมบัติ ผศ.ดร.พงศธร โลภาพันธุ์ อ.ยุทธนา ตาละลักษมณ์

๑.ดร.ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์
๑.ดร.สถาพร เตมีพัฒนพงษา

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

อ.ดร.วิชญ์ ครีวงษา ผู้ช่วยศาลตราจารย์ ดร.อารียา ฤทธิมา อ.ดร.พรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี้ยม อ.ดร.วัชระ เลือดี ดร.ลานิตย์ดา เดียวต่อย

ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

ผู้ช่วยศาลตราจารย์ ดร.มนต์พิพย์ ช้ำชอง ผู้ช่วยศาลตราจารย์ ดร.เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์ รองศาลตราจารย์ ดร.รังลินี โลธรวิทย์ อ.ดร.กอบศักดิ์ กาญจนาพงศ์กุล

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

อ.ดร.หยาดฝน ทะนงการกิจ

อ.ดร.นกุมล จินดาพรรณ

#### ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

อ.ดร.ณัฐดนัย ตัณฑ์วิรุฬห์

อ.ดร.หทัยเทพ วงศ์ลุวรรณ

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

ผู้ช่วยศาลตราจารย์ ดร.ทศนพ กำเนิดทอง

ดร.ประสาน สถิตเรื่องศักดิ์

#### ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

อ.ดร.นันทวัฒน์ ขมหวาน
อ.ดร.ปนัดดา กลิกิจวิวัฒน์

อ.ดร.สมชาย ประยงค์พันธ์

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาดล คงสมบูรณ์

อ.ดร.กิตติ ทรัพย์ประสม อ.ดร.ทวิช พูลเงิน

อ.ดร.นที่ สุริยานนท์

#### สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

ผู้ช่วยศาลตราจารย์ ดร. รู้ติพงษ์ สถีรเมธิกุล ผู้ช่วยศาลตราจารย์ ดร.อมรฤทธิ์ พุทธิพิพัฒน์ขจร

อ.ดร. กายรัฐ เจริญราษฎร์

อ.ดร.ปาริฉัตร เสริมวุฒิสาร

อ.ดร.ศิวดล เลถียรพัฒนากูล

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

ผู้ช่วยศาลตราจารย์ ดร. พรรณฤมล เต็มดี อ. ดร. กลางใจ สิทธิกาวร

อ. ดร. รวิศว์ บานขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ชัยศรีเจริญ

อ.ดร. โลกณ ผู้มีจรรยา

#### ผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์

#### ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

รองศาสตราจารย์บรรจบ ภิรมย์คำ รองศาสตราจารย์ประสงค์ ตันพิชัย

รองศาลตราจารย์ลบลันติ์ มหานิยม

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท สูมิตร สุวรรณ

ผู้ช่วยศาลตราจารย์ลันติ ศรีสวนแตง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อกิชาติ ใจอารีย์

ผู้ช่วยศาลตราจารย์ลุริน ชุมสาย ณ อยุธยา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศีริชัย ศรีพรหม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วินัย พูลศรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มยุรี ถนอมสุข

การประชุมวิชาการแห่งชาติ แห่กวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเยลกำแห่งแล่น ครั้งที่ 10

## ผลกระทบของความเร็วรอบ และเวลากดแข้ที่ส่งผลต่อค่าความต้านแรงดึงเฉือนของการเชื่อม เสียดทานกวนแบบจุดรอยต่อเกยอลูมิเนียมผสม AA 5052 กับทองแดงผสม C11000 Effect of Rotating Speeds and Holding Time on Tensile Shear Strength the Effect of Friction Stir Spot Lap Joint AA 5052 Aluminum Alloy with C11000 Copper Alloy

ประลิษฐ์ สังข์ศัง<sup>1</sup> สุริยา ประสบทอง<sup>3</sup> กิดสิพงซ์ กิมะพงซ์ <sup>1</sup> Prodit songein<sup>11</sup> Suriya Rissomthong<sup>3</sup> Kittipong Kimapong<sup>3</sup>

## บทคัดอ่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์ในการประยุกล์การเรื่อมเลือดทานกวนแบบจุดในการเรื่อมรออส่อเกยระหว่าง อลูมิเนื่อมแสม AA5052 และทองแลงผสม C11000 ขนาดของแผ่นงานคือ อาว 100 มม.กว้าง 30 มม. และหนา 1.0 มม. ระยะการส่อเกอ 30 มม. และกำหนดให้แผ่นทองแลงส่อเกยบนแผ่นอลูมิเนียม ด้วแปรการเรื่อม ประกอบด้วยความเร็วรอบด้วกวน 2500-4000 ppm. อัสราการป้อนด้วกวน 6 mm/min และระยะเวลากดแข่ 2-8 sec ขึ้นงานที่ได้ถูกนำไปทำการตรวจสอบสมบัติทางกล และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคผลการทดลองโดยสรุปมี ดังนี้ การเรื่อมเสียดทานกวนแบบจุดสามารถทำการเรื่อมรอยต่อเกอระหว่าง อลูมิเนียมผสม AA5052 และ ทองแดงผสม C11000 ได้อย่างได้ผล การเพิ่มความเร็วรอบและเวลากดแข่ ทำให้ความแข็งแรงเฉือบรองออต่อ ลดลง ด้วแปรการเรื่อมที่ทำให้ความแข็งแรงเลือนสูงสุด 864 N คือความเร็วรอบด้วกวน 3500 rpm อัตราการ ป้อนด้วกวน 6 mm/min และเวลากดแข่ 4 sec ความแข็งของโลหะมีค่าด่ำกว่าโลหะหลัก

#### Abstract.

The article aims to apply a friction stir spot welding for produce the lap joint between AA5052 aluminum alloy and C11000 copper alloy. The dimension of the materials was100 mm in length, 30 mm in width and 1.0 mm in thickness. The lap distance of the joint was 30 mm and define as the copper alloy coupon was over the aluminum alloy coupon. The welding parameter was the rotating speed of 2500-4000 rpm, the pin inserting rate of 6 mm/min and the holding time of 2-8sec. The mechanical properties test and the microstructure investigation were performed to evaluate the lap joint quality. The summarized results are as follows. The friction stir spot welding could produce effectively the lap joint between AA5052 and C11000 copper. Increase of the rotating speed and holding time affected directly to decrease the tensile shear strength of 864 N was the rotating speed of 3500 rpm, the pin feed rate 6 mm/min and the holding time of 4sec. The experimental results also showed that the hardness of the weld metal was lower than that of the base materials

Keywords: Retion stir spot welding, rotating speed, pin inserting rate, holding time

#### Ermoil: Proditiongsid@hotmoil.com

- <sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Pathumthani 12110 <sup>1</sup>ตกตรีชาวิศวกรรมการแล้ด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมนคลรัญบุรี ปฏุษตรนี 12100 <sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Industrial Education, Rajamungala University Suvanaphumi, Supanburi, 72130
- <sup>\*</sup>สาขาวิควกรรมอุดสาหการ คณะครูคาสตร์อุดสาหกรรม มหาวิทยาลับเทคโนโดยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สุทรรณภูรี 72130

#### การประชุมวิชาการแห่งชาติ แหกวิทยาลัยเกษตรดาสตร์ วิทยาเยตกำแหงแล่น ครั้งที่ 10

#### ค่าน่า

รอยต่อของวัสดที่ต่างชนิดกันถูกน่ามาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมต่างๆเนื่องจากข้อ ได้เปรียบทางด้านเทคนิคและประโยชน์จากสมบัติเจพาะของวัสดูเหล่านั้น (LI Xia-wei.et al ,2012) ออูมีเนียม และ ทองแลง เป็นโลนะทั่วไปที่มักใช้ในอุดสาหกรรมด่างๆเช่น อุดสาหกรรมไฟฟิาและอิเล็กทรอนิกล์อุดสาหกรรมทางเคมี และนิวเคลียร์, อุดสาหกรรมการบินและอวกาศ และอุดสาหกรรมยานอนด์ เป็นต้น (Sajjad Gholami SHIRI.et al ,2012) แต่อย่างไรก็ตาม โลหะทองแลงและออมิเนียม มีความอากลำบากในการต่อยี้ลเข้าด้วยกันด้วยวิธีการหลอม ้ ละลาย เช่น การเชื่อมแก็ส การเชื่อมอาร์ก การเชื่อมความด้านทานแบบจุด การประสาน (Brazing) และการบัดก็จึ เพราะออูมิเนื่อมและทองแดง มีความสามารถในการแพร่กระจายความร้อนที่สูงและแตกต่างจากโลหะอื่นๆ ซึ่ง โดยทั่วไปของวัสดุโลหะการเชื่อมแบบหลอมละลาย ปัณหาที่หลีกเลี้ยงไม่ได้คือสมบัติทางกลที่อาจด้อยลงและการ แตกร้าวจากการเชื่อมหลอมละลาย ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในการเชื่อมวัสดุที่ต่างชนิดกันจึงนำไปสู่เทคนิคของ การเขียมขึ้งเป็นการพัฒนาวิธีการเขียมต่อวัสดขึ้นใหม่ด้วยเทคนิคกระบวนการเขียมวัสดที่อยู่ในสภาวะของแข้งที่ไม่มี การหลอมละลายด้วยกระบวนการเขื่อมเสียดทานกวน (Friction Stir Welding: FSW) ซึ่งสามารถต่อวัสดุต่างชนิดกัน ได้ การเรื่อมด้วยกระบวนการ FSW ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อเรื่อมต่ออลูมิเนียมแสม ในปัจจุบันเทคนิคของกระบวนการ เชื่อมแบบ FSW ได้รับการพัฒนาอย่างมากและสามารถเชื่อมส่อกับวัสดุโลหะอื่นๆอีกมากมายที่มีจุดหลอมละลายสูง เช่น ทองแลง ออมิเนียม ไทเทเนียม เหล็ก เป็นสัน (HBisadi.et al .2013; A.Abdollah-Zadeh.et al.2008) เมื่อเทียบ กับวิธีการหลอมละลายอื่นๆ กระบวนการ FSW สามกรถเชื่อมโลหะได้ด่ำกว่าจดหลอมละลาย แต่กระบวนการ FSW มีช้อจำกัดในการเขื่อมวัสดูแผ่นบาง จึงได้มีการพัฒนาการเชื่อมวัสดูแผ่นบางขึ้นมาด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทาน กวนแบบจุด( Friction Stir Spot Welding : FSSW) โดยให้รับการพัฒนาบนหลักการพื้นฐานของการเชื่อมเสียดทาน กวน(FSW) ซึ่งในกรณีของ FSSW นี้กระบวนการเชื่อมคือ เครื่องมีอจะหมุนกวนลงไปอยู่ในชิ้นงานที่ต่อเกอกันอยู่ ในช่วงระยะเวลาหนึ่งของเวลาแล้วถอยกลับของสังกวน

พี่ผ่านมาขึ้ให้เห็นว่าได้มีการเขื่อมวัสดุส่างขนิดสำหรับรอยต่อของอลูมิเนียม และพองแลง หรือกับวัสดุ โลหะแผ่นบางอื่น (Y. F. Sun, H. Fuji,2013) ประสบความสำเร็จในกระบวนการเชื่อม FSSW รอยต่อเกยของโลหะ ผสม Zr., Cu., Al., Ni, (Buk metallic glasses : BMG) แบ่นหนา 2 มีคลิเมตรกับทองแลงบริสุทธิ์ พบว่าลักษณะ โครงสร้างทางจุดภาคบางส่วนมีลักษณะคล้ายพันเลื้อยเกิดขึ้นที่ขอบของแหน BMG และพบนิวเคลียสขนาดนาโนที กระจัดกระจายอยู่ในด้าน BMG ตามอินเตอร์เฟสร้าม Cu./ BMG ที่ด้านบนของทองแลงไกล้กับรูแกนเขื่อม (Key Hole) ขึ้นส่วน BMG แทรกในเนื้อของทองแลง และเมื่อนำไปพลสอบแรงสิ่งเลือนแสดงได้เห็นว่ารอยต่อของทองแลง กับ BMG สามารถล้านแรงสิ่งสูงสุด 2300 นิวลัน ลักษณะการพังหลายเกิดการจึกขาด บริเวณการกวน (Y.C.Chen at al. 2012) ได้สึกษาโครงสร้างทางจุดภาคบริเวณอินแตอร์เฟสและสารประกอบของโลหะในการเขื่อมเสียดทานกวน แบบจุด และมีการเขื่อมวัดสุขนิดอื่นด้วยกระบวนการ FSSW ได้แก่ อลูมิเนียมกับอลุมิเนียม (Chi-Sung.et al.2012; V.-X.et al.2010) เหล็กกล้ากับอลูมิเนียม(รวัขและศักร์น้อยม (S.H.Chowdhury at al.2013)

ด้งรายงานที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงมีกรอบแนวคิดในการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของรอยต่อเกยอลูมิเนียม ผสมAA5052 และทองแลงผสม C11000 โดยมีส่วแปรในการเชื่อม คือ ความเร็วรอบของตัวกาน อัตราความเร็วใน การป้อนกวน และระยะเวลาในการกลแข่ ที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยา

## 79 อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ไข้ในการทดลอง คือ อลูมิเนียมผสม AA 5052 และทองแดง C11000 แผ่นรีดหนา 1 มม. โดยมี ส่วนผสมทางเคมีแสดงในดารางที่ 1 ขึ้นทดลองมีขนาดอาว 100 มม. กว้าง 30 มม. ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยแผ่น ทองแดงวางต่อเกยอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม 30 มม. (Hyung et al., 2010) แผ่นวัสดุทั้งสองถูกอีดด้วยอุปกรณ์จับอีด (Foture) บนแท่นของเครื่องกัดแบบอัตโนมัติ และเครื่องมือเชื่อม(Tool)ทำจากเหล็กกล้า SKD 11 มีมิติดังในรูปที่ 1 เครื่องมือเชื่อม(Tool)เป็นตัวกวน (Pin) รูปทรงกระบอก หมุนด้วยความเร็วรอบ 2500-4000 รอบ/นาที ถูกป้อนกลเข้า ไปในแนวเชื่อมผ่านแผ่นหองแดง จนกระทั่งปลายตัวกวนสัมผัสกับผิวด้านบนของออูมิเนื่อม โดยใช้อัตราการป้อนกล ตัวกวนมีค่าเท่ากับ 6 มม./นาที และระอะเวลาในการกดแข่ของตัวกวนบริเวณรอยเชื่อมต่อเกย 2-8 วันาที แล้วทำการ ถอนตัวกวนขึ้นจากรอยเชื่อมต่อเกย โดยใช้เครื่องกัดตั้งแบบอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์(CNC Miling)ในการ เชื่อมเสือดทานกวนแบบจุด และนำรออเชื่อมมาตรวจสอบสมบัติทางกลของรอยต่อเกย โดยการทดสอบแรงดึ่งเลือน ทดสอบความแข้งแนวเชื่อม และตรวจสอบโครงตร้างทางโลหะวิทยา



ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสลุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากดแข่ (Holding Time) และความเร็วรอบของตัวกวน (Rotating Speeds) ขึ้นงานที่ได้จาการเขื่อมโดอใช้ความเร็วในการป้อนกดตัวกวนลงสู่บริเวณอินเพอร์เฟสของรออต่อเกอที่ 6 มม..นาที่ นำไปทดสอบค่าความด้านทานแรงดึงเจือน พบว่าค่าความด้านทานแรงเจือนของรออต่อเกอมีค่าแนวโน้ม ลดลง เมื่อเวลาในการกดแข่เห็มสูงขึ้นทุกความเร็วรอบของตัวกวน ขณะที่เวลาในการกดแข่เริ่มด้นที่ 2 วินาที ทุก

1000

ความเร็วรอบมีค่าความล้านทานแรงดึงเรือนสูง เมื่อเพิ่มเวลาในการกดแข่เป็นที่ 4 วินาที จะให้ค่าความล้านทานแรง สึ่งเรือนสูงสุดทุกความเร็วรอบและเมื่อเพิ่มเวลาในการกดแข่เพิ่มขึ้นเป็นที่ 6 และ 8 วินาที ตามลำดับ พบว่า ค่าความ ด้านทานแรงดึงเรือนมีแนวโน้มลดต่ำลงทุกความเร็วรอบ สภาวะการเขื่อมที่ให้ค่าความล้านทานแรงดึงสูงสุด ประมาณ 863.5 นิวดัน คือความเร็วรอบ3500รอบนาที อัตราการป้อนตัวกวน 6 มมนาทีเวลาในการกดแข่ 4 วินาที



ฐปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบดัวกวน เวลาในการกดแข่ ที่ความเร็วการกดตัวกวน 6 มม/นาที

	ความเร็วรอบในการเชื่อม (rpm)				
เวลากดแช่ (s)	2500	S 3000 g	3500	4000	
2		S I I E E	Ţ	I	
4				π	
6	I	I		ш	
8 207		I	N ACB	I	
I การพังหลายที่ผิวสัมผัส		II การพรทลายทไลนะเขอม		III การพังหลายโลหะขอมิเนียม	

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบลักษณะรูปแบบการพังหลายของรอยเชื่อม

ออ่างไรก็สามเมื่อพิจารณาเปรียบลักษณะรูปแบบการพังหลายดังสารางที่ 2 กำหนดไว้ได้ 3 ลักษณะ คือ I การ พังหลายที่ผิวลัมผัล III การพังหลายที่โลหะเพื่อม III การพังหลายโลหะออูมิเนียม เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการ กดแข่ต่ำหรือสูงเกินไปที่ 2 และ 8 วินาที ทุกความเร็วรอบ พบว่า เป็นลักษณะการพังหลายที่ผิวลัมผัสทั้งหมดดัง แสดงดังรูปที่ I และที่เวลาในการกดแข่เริ่มด้น 4 และ 6 วินาที ที่ความเร็วรอบด่ำ 2500 และ 3000 รอบ/นาที เป็น รูปแบบการพังหลายผิวลัมผัส ขณะที่ความเร็วรอบสูง 3500 และ 4000 รอบ/นาที พบว่ารูปแบบการพังหลาย เกิดขึ้นที่โลหะเขียมและโลหะออูมิเนียมดังรูป II และ III





(ค) ลักษณะลักษณะการทั่งหลายที่โสหะออูมิเนียมที่ความเร็วรอบ 3500 รอบเนาที่ เวลากดแข่ 4 วินาที รูปที่ 3 การพังหลายของชิ้นงานทดสอบแรงดึ่งเสือน

รูปที่ 3 (ก) แสดงด้วยยางพื้นมีวการพัทคลายที่มีวลัมมัส 1 ของขึ้นงานที่ความเร็วรอบ 2500 รอบนาที เวลากดแข่ 2 วินาที เป็นการพังทลายของขึ้นทดลอบมีความด้านทานแรงดึงเรือนด่ำ โดยรูปที่ 3 (ก) เขื่อมรุด พบว่า เกิดครีบขึ้นรอบนอกของบ่าเขื่อมรุดถูกดึงออกมา (Pulled out Nugget) เป็นรูกคมตามด้วกวนที่พื้นมิว พังทลายบริเวณอินเตอร์หได (Interfacial Fracture Surface) มีรูปร่างดักษณะวงกดมภายในมิวดัมมัดเกิดลาย (Rubbing) ซึ่ง P.C. Lin (P.C.Lin et al.2008) ได้กล่าวว่าบริเวณมิวที่ด้นหล (Contract) เป็นลายเกิดจาก กระบวนการเขื่อมรุด ขณะที่รูป 3 (ก) ที่แผ่นลางด้วยบที่อยู่มีเนื่อมผดม AAS052 พื้นมีวพังทลายบริเวณ อินเตอร์เฟลมีรูปร่างดักษณะวงรี่ภายในมีลาย เมื่อเปรียบเทียบกับขึ้นทดดอบที่มีความด้านทานแรงดึงเรือเปรี่น จำนที่ ดังรูปที่ 3 (ข) พบว่าบริเวณเขื่อมรุดเกิดรอยใหม้ที่ครับขึ้นรอบนอกของบ่าเชื่อมจุดครับมีลักษณะสั้นกว่าขึ้น ทดดอบมีความด้านทานแรงดึงเรือนจุดเกิดรอยใหม่ที่ครับขึ้นรอบนอกของบ่าเชื่อมจุดครับมีลักษณะสั้นกว่าขึ้น ทดดอบมีความด้านทานแรงดึงเรือนจุดเกิดรอยใหม่ที่ครับขึ้นรอบนอกของบ่าเชื่อมจุดครับมีลักษณะสั้นกว่าขึ้น ทดดอบมีความด้านทานแรงดึงเรือนจุดเกิดรอยใหม่ที่ครับขึ้นรอบนอกของบ่าเชื่อมจุดครับมีลักษณะสั้นกว่าขึ้น ทดงอบมีความด้านทานแรงดึงเรือนจุดเกิดรอยใหม่ที่ครับขึ้นรอบนอกของบ่าเชื่อมจุดครับมีลักษณะสั้นกว่าขึ้น หลวยมดง C11000 บริเวณเชื่อมจุดไม่เกิดการเรียนขอและพื้นมีจานงทอกบริเวณอินเตอร์เฟลเป็นรูปวงกลมและที่ มีวลัมผัสมีรูปคล้ายกันขอย (spira) และรูป 3 (ข) ที่แผ่นล่างด้านบนอลูมีเนียมผสม AAS052 พื้นผิวหังทอม บริเวณอินเตอร์เฟลเป็นรูปวงกลมภายในมีรอยแตกร้าว (Crack) ขวางรูปกันหอยขณะที่บริเวณมีวรอบขึ้นแอก (Outer rough อนก่านอย ( ภายในพื้นมีวมีระยะกว้างขึ้นและมีรอยร้าวเป็นเงิน และที่ขึ้นคดสอบที่มีค่าความ

#### การประชุมวิชาการแขวงาลิ แห่าวิทยาลัยเกษตรคาสตร์ วิทยาเหตร้านหวนสม ครั้งที่ +0

ด้านทานแรงสิ่งเลือนสูงสุดแสดงด้วยย่างพื้นผิวการพังทลายที่โลหะอลูมิเนื่อม III ของขึ้นงานที่ความเร็วรอบ 3500 รอบนาที เวลากดแข่ 4 วินาที ดังรูป 3 (ค) ที่จุดเชื่อมเกิดรอยไหน้ที่คริบขึ้นรอบนอกของบ่าเชื่อมจุดครีบมี ลักษณะกว้างและเฉียงรอบเชื่อมจุดขณะที่รูป 3 (ค) แผ่นบนด้านล่างทองแดง C11000 บริเวณเชื่อมจุดที่พื้นผิว พังทลาอบริเวณอินเตอร์เฟลเป็นรูปวงกลมและมีเนื้อวัสดุเชื่อมของอลูมิเนียมติดอยู่ภายในและที่แผ่นล่างด้านบน อลูมิเนียมผสม AA5052 ดังรูปที่ 3 (ค) ที่พื้นผิวหังหลายบริเวณอินเตอร์เฟลเป็นรูปวงรีงกายในมีเนื้อวัสดุอลูมิเนียม ผสม AA5052 มีการพังทลายจีกขาดออกจากบริเวณเชื่อมจุดขณะที่บริเวณผิวรอบขั้นนอก (Outer rough surface) ภายในพื้นผิวมีระอะกว้างและมีรอยร้าวเป็นเส้น อย่างให้ก็ตามการจีกขาดเหล่านี้ยืนยันว่ารอยต่อของ การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุดที่สภาวะการเชื่อนที่เหมาะสม จะมีความแข็งแระมาก และส่งผลให้เกิดการจีก ขาดที่วัสดุหลักให้ รอยจีกขาดที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับ การเชื่อมรอยต่อระหว่างทองแดงกับอลูมิเนียมผสมที่มีแผ่น สอดระหว่างแน่นวัสดุ ด้วย REW (Mishra RS,2005) ซึ่งรอยต่อที่แข็งแลงล่าจะเกิดการจีกขาดรอบแนวเชื่อม ขณะที่รอยต่อที่มีความแข้งแรงสูงจะเกิดการจีกขาดผ่านวัสดุออุมิเนียม

### ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

รูปที่ 4 ผลการทดสอบโครงสร้างทางโดหะวิหยาของการเชื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่อเกยของทองแลง C11000 กับอลูมิเนียมผสม AA5052 ทำการตรวจสอบขึ้นงานที่ได้คาการความส้านทานแรงสิ่งเรือนสูงสุดที่ ความเร็วรอบ 3500 รอบานาที เวลาในการกดแข่ 4 วินาที ตรวจสอบดำแหน่งการกวน (Stir Zone: SZ) ดังรูป (ข) ที่กำลังขอาอ 200 เท่า พบว่าบริเวณอินเทอร์เฟส (Interface) รอยเขือมมีความสมบูรณ์และมีลักษณะรูปร่างชิก แขกสลับฟันปลาและมีคาเฉลือความกว้างบริเวณอินเทอร์เฟสประมาณ 0.190 um และบริเวณที่ได้รับอิทธิพล จากความร้อนทางกล (Thermo-Mechanical Affect Zone TMAZ) แสดงดังรูป (ค) ที่กำลังขอาอ 200 เท่า พบว่า เกรนของอลูมิเนียมผสม AA-5052 ใกล้บริเวณอินเทอร์เฟสมีรูปร่างเรียวราวและบริเวณชินเตอร์เฟสรอยเขือมมี ความสมบูรณ์มีความกว้างเจลือ 0.183 um ขณะที่บริเวณที่นี่เท็กระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) แสดงดัง รูป (ง) พบว่ามีของว่างระหว่างขึ้นทดลอบมีความกว้างของของว่างเฉลีย 0.031 um และมีมุมสามเหลี่ยมรูร่าง คล้ายสะขอ (Hook) ประมาณ 68.2 องค่า ขึ้นมีลักษณะคล้ายกับ Babarinarayan et al (Babarinarayan et al., 2009) และเกรนมีความละเอียดแต่ไม่เป็นระเบ็อบ และบริเวณสำนหน่งกระวัดที่จุด (จ) ที่กำลังขอาอ 200 เท่า ดัง รูป (จ) พบว่ามรองว่างระหว่างขึ้นหลงอบมีความกว้างของของว่างเฉลีย 0.031 um และมีมุมสามเหลี่ยมรูร่าง คล้ายสะขอ (Hook) ประมาณ 68.2 องค่า ขึ้นได้กษณะคล้ายกับ Babarinarayan et al (Babarinarayan et al., 2009) และเกรนมีความละเอียดแต่ไม่เป็นระเบ็อบ และบริเวณสำนหน่งกระอยเรือมส์กาง 6.0 องค่า



การประชุมใจาการแขวจาลี แพรวิทยาลัยเกษตรครสตร์ ใพยาเยตร์กแพรแล่น ครั้งที่ 10

รูปที่ 4 โครงสร้างทางโลหะวิทยา ความเร็วรอบ 3500 รอบนาที่ อัตราป้อน 6 มม.นาที เวลาในการกดแข่ 4 วินาที



รูปที่ 5 คำความแข็งของของเขี้อมวุล (ก) Stir Zone (SZ), (ข) Thermo-Mechanical Affect Zone (TMAZ), (A) Heat Affect Zone (HAZ), (J) Bead Metal (BM)

ความแข็งของรอยเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

รูปที่ 5 ผลการทดสอบคำความแข้งที่ให้คำความแข้งแรงสิ่งเรือนสูงสุดที่ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที เวลาในการกดแข่ 4 วินาที อัตราป้อนในการกดตัวกวน 6 มม/นาที โดยทดสอบความแข็งบริเวณกึ่งกลางขึ้นงาน ออกไปล้านละ 9 จุด ตามมาตรฐาน ASTM-E 92-82 (ASTM-International ,2003) พบว่า คำความแข็งของ บริเวณโลทะรอยเชื่อมจุดทั้งสองขนิดที่ระยะการทดสอบ -6 ถึง 6 ที่แสดงดังจุด (ค) HAZ, (ข) TMAZ และ (ก) SZ มีค่าความแข็งล่ากว่าบริเวณโลหะเดิมดังจุด (ง) BM ทั้งสองล้าน ขณะที่คำความแข็งของทองแดง C11000 มีค่า ความแข็งสูงกว่าอลูมิเนียมผสม AA5052 เกือบทุกระยะการทดสอบ แต่มีต่ำกว่าบริเวณ TMAZ ใกล้ขอบของตัว กวนทั้งสองล้าน

#### การประชุมวิชาการแขวจาลี มหาวิทยาลัยเกษตรคาสตร์ วิทยาเยตกำแหงแสน ครั้งที่ 10

#### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบ และเวลากดแข่ที่ส่งผลต่อค่าความด้านแรงดึง เจือนของการเขื่อมเสียดทานแบบจุดรอยต่อเกยอลูมิเนียมผสม AA 5052 กับทองแดงผสม C11000 โดยมีผลการ ทดดองสรุปมีดังนี้

1.ความเร็วรอบของตัวกวนและเวลาในการกดแข่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความด้านแรงดึงเจือนดดลง

2.สภาวะการเชื่อมที่ให้ค่าความล้านทานแรงลึ่งสูงสุดประมาณ 864 นิวดัน ที่ ความเร็วรอบ 3500 รอบ/นาที อัลราป้อนดัวกวน 6 มม./นาที เวลาในการกดแข่ 4วินาที และค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมด่ำกว่า โลหะเดิม

3.กระบวนการเขียมด้วยแรงเสียดทานแบบจุดสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการต่อวัสดุออูมิเนียมผสม 5052 กับทองแดงผสม C11000 ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยขึ้นงานมีการอีดติดกันสมบูรณ์

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา แผนกข่างกลโรงงาน และมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สุพรรณบุรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ให้ความอนุเคราะห์ส้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- รวัข หมีเพื่อง และ กิดดิพงษ์ กิมะพงศ์, 2551. อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเสียดหานแบบจุดต่อสมบัติของ รอยต่อเกอระหว่างอลูมิเนียม 5052 และเหล็กกล้าใร้สนิม430.การประชุมวิชาการข่ายงาน วิศวกรรมอุดสาหการ สงขลา: 834-839.
- สุทธิพร คงเพ็บร์, กิดสิพงษ์ กิมะพงศ์ และ สุรัสน์ สรัยวนพงษ์, 2555, บัจจัอที่เหมาะสมที่สุดต่อความต้านทาน แรงดึงเรือน ของการเชื่อมเสียดทานแบบจุด ระหว่างออูมิเนียมตสม AA1100 และเหล็กกล้า เคลือบสังกะสี SGACC, การประชุมวิชาการข้ายงานวิศวกรรมอุดสาหการ เพชรบุรี: 1624-1630.
- Abdollah-Zadeh, T. Saeid, and B. Sazari. 2006. Microstructural and mechanical properties of friction Stir welding aluminum and copper lap joints. Journal of Alloys and Compounds 460: 535-538. ASTM – International , section 3.2 editorially update in june 2003
- Badarinarayan, H., Hunt, F., Okamoto, K., Hirasawa, S., 2007. Study of plunge emotion during friction stir spot welding temperature and flow pattern. The Minerals, Metals & Materials Society Annual Meeting: 1454-1463.
- Chi-Sung JEON, Sung-Tea HONG, Yong-Jai KWON, Hoon-Hwe CHO and Heung Nam HAN. 2012. Meterial properties of friction stir spot welding joints of discimilar aluminum alloys. Nonferrous Met. Soc. 22: 605-613.
- H. Bisadi, A. Tavakori, M. Tour Sangsaraki, and K. Tour Sangsaraki. 2013. The influences of rotational
- and mechanical properties of friction stir welding Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints. Materials and Design 43: 80-88.
- Hyung-Seop Shin, Yoon-Chul Jung. 2010. Characteristics of dissimilar friction stir spot welding of bulk metallic glass to lightweight crystalline metals. Intermetallics 18: 2004-2004.
- Li Xia-wei, ZHANG Da-tong, QIU Cheng and ZHANG Wen. 2012. Microstructure and mechanical Properties of dissimilar pure copper and 1350 aluminum alloy butt joints by friction stir welding. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 22: 1298-1306.

#### การประชุมวิชาการแห่งชาติ แหกวิทยาลัยเกษตรคาสตร์ วิทยาเมตกำแหงแลน ครั้งที่ 10.

- Mishra, R.S. and Ma, ZY. 2005. Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by resistance spot welding. Mater Science Eng. R 50:1-78.
- P.-C. Lin., J. Pan., T. Pan. 2008. Failure mode and fatigue life estimations of spot friction welds in lapshear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool. International Journal of Fatigue 30: 74-78.
- Pierluigi Fanelli, Francesco Vivio and Vincenzo Vullo. 2012. Experimental and numerical characterization of Friction Stir Spot Weld joints. Engineering Fracture Mechanics 81: 17-25.
- Saijad Gholami SHIRI, Mohsen NAZARZADEH, Mahmood SHARIFITABAR and Mehdi Shafiee AFARANI. 2012. Gas tungsten arc welding of CP-copper to 304 stainless steel using different filler materials. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 22: 2937-2942.
- S.H. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X. Cao and P. Wanjara. 2013. Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded discrimitar magnesium to aluminum joints with adhesive. Materials Science and Engineering A 562: 53-60
- T. Saeid, A. Abdollah-zadeh and B. Sazgari. 2010. Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction sir welding. Journal of Alloys and Compounds 490: 652-655.
- V.-X. Tran, J. Pan and T. Pan. 2010. Fatigue behavior of spot friction welds in lap-shear and cross tension specimens of dissimilar aluminum sheets. International Journal of Fatigue 32: 1022-1041.
- Y.C. Chen, A. Gholinia and P.B. Prangnell. 2012. Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding A novel approach for rapid welding aluminium alloy steel automotive sheet. Material Chemistry and Physics 134: 459-463.
- Yahya Bozkurt, Mustafa Kemal Bilici. 2013. Application of Taguchi approach to optimize of FSSW parameter on joint properties of dissimilar AA2024-T3 and AA 5754-H22 aluminum alloys. Material and Design 51: 513-521
- Y.F. Sun and H. Fuji. 2013. Microstructure and mechanical properties of dissimilar spot friction stir welded Zr<sub>ss</sub>Cu<sub>ss</sub>Al<sub>ss</sub>N<sub>b</sub>, bulk metallic glass to pure copper. Intermetallics 33: 113-119.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายประดิษฐ์ สังข์ศิริ
วัน เดือน ปีเกิด	29 พฤาภาคม 2509
ประวัติการศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขา ช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคอ่างทอง พ.ศ.2528 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชา เทคนิกการผลิต วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน พ.ศ.2535 ประกาศนียบัตรวิชาชีพครูเทคนิคชั้นสูง(ปทส.) สาขาวิชา เครื่องมือกล วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน 2538 ปริญญาตรีครุศาสตร์อุตสาหกรรม(คอบ.) สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน 2545
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2538 - 2540	อาจารย์สอน แผนกวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา
พ.ศ. 2540 - 2554	อาจารย์สอน แผนกวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคจุฬาภรณ์(ลาดขวาง) จังหวัดฉะเชิงเทรา
พ.ศ. 2554 - ปัจจุบัน	ครู วิทยฐานะชำนาญการพิเศษ(คศ.3) แผนกช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา