

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน

สุรสิงห์ อารยางกูร



ฝ่ายหอสมุด มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ได้รับกัณัฒนาการจาก

งานบริหารบัณฑิตศึกษา

กองบริการการศึกษา ม.อุบลฯ (9 ธค.52)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

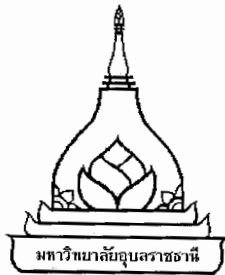


**THE STUDY ON MICRO-STRUCTURE OF LOW CARBON STEEL RODS
WELDED BY FRICTION WELDING**

SURASING ARAYANGKUN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER ENGINEERING
MEJOR IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RAJATHANEE UNIVERSITY
YEAR 2008**

COPYRIGHT OF UBON RAJATHANEE UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน

ผู้วิจัย นายสุรสิงห์ อารยางกูร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรชา บุคคาดี)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต)
..... คณบดี
(รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร โภคา)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2551

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความรู้ ในเชิงวิชาการอันเป็นแนวทางในการทำวิจัยและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ปลูกฝังให้ผู้วิจัยมีความ มานะพยายามและรักการทำวิจัย สนับสนุน ให้โอกาส ให้กำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ผู้วิจัยมา โดยตลอด รวมถึงการให้ความเอาใจใส่ดูแลและช่วยตรวจสอบการดำเนินงานการทำวิทยานิพนธ์ อย่างสม่ำเสมอ ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างในความกรุณาและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรชชา บุคคาดี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต ที่กรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และได้ให้คำแนะนำ รวมถึงเสนอ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร และเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยให้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรียา โขคสวัสดิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขอังกมาลี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ การสนับสนุนเครื่องมือ และคำแนะนำต่องานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาโท-เอก ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ พี่ชาย-น้องชาย-ภรรยา-บุตรชาย และบุตรหญิง ที่เป็นกำลังใจอันสำคัญ ยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งการสนับสนุนในทุกๆ ด้านเพื่อให้งานศึกษานี้สำเร็จด้วยดี

สุดท้ายนี้คุณความดีและประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ คุณพ่อสุรสิทธิ์ อารยางกูร บิดาผู้ล่วงลับ ซึ่งคอยเป็นกำลังใจให้ลูกชายคนนี้เสมอมา



(นายสุรสิงห์ อารยางกูร)

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน
 โดย : สุรสิงห์ อารยางกูร
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์
 ศัพท์สำคัญ : การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน ในขั้นตอนการศึกษาได้ทำการสร้างและพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานขึ้นมาใหม่ โดยกำหนดให้มีคุณสมบัติในการทำงานได้ตามเงื่อนไขการทดลองคือ สามารถควบคุมแรงดันในการทำงานของเครื่องในช่วงการทำงานต่าง ๆ ได้ สามารถควบคุมเวลาในการทำงานในช่วงเวลาการทำงานต่าง ๆ ได้ สามารถควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกลัดไฮดรอลิกส์ได้ สามารถควบคุมความเร็วในการหมุนของชิ้นงานเชื่อมได้ และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการเชื่อมจนกระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการ เงื่อนไขต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่สร้างและพัฒนาขึ้นมาสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดได้เป็นอย่างดี

หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการสร้างเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานในข้างต้น ได้ทำการกำหนดวัสดุการทดลอง โดยใช้เหล็กเพลลาขาวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. และจากการนำเหล็กที่จะใช้ในการทดลองไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์คาร์บอนพบว่า เป็นเหล็กชนิด AISI 1015 และผลการทดสอบค่าความแข็งแรงกับค่าความแข็ง ผลที่ได้จากการเฉลี่ยคือ 780 MPa, 202 HV ตามลำดับ

ที่มาของการกำหนดเงื่อนไขในการทดลองได้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และข้อจำกัดบางประการของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่สร้างขึ้นมา โดยเงื่อนไขของตัวแปรในการทดลองเบื้องต้น ดังนี้ ช่วงเวลาในการเสียดทาน 5 ช่วง คือ 7, 9, 11, 13 และ 15 Sec. ช่วงแรงดันในการเสียดทาน 7 ช่วง คือ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 Bar ในส่วนของเงื่อนไขตัวแปรอื่นๆ กำหนดให้เป็นค่าคงที่คือ เวลาในการอัด 3 Sec. แรงดันในการอัด 60 Bar และความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงานเชื่อม 1,200 rpm ผลการทดลองในเบื้องต้นพบว่า เวลาในการเสียดทานที่ 9 Sec. และแรงดันในการเสียดทานที่ 10 Bar ให้ผลการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ 913 MPa ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงกว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเดิมถึง 17.09 % แต่จากผลการทดสอบค่าความ

แข็งของรอยเชื่อมกลับพบว่าค่าความแข็งที่รอยเชื่อมมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งของชิ้นงานเดิม จึงนำชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าว มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ผลจากการวิเคราะห์พบว่าสาเหตุที่ทำให้รอยเชื่อมมีค่าความแข็งสูงขึ้นนั้น เกิดจากการให้แรงดันในการอัดที่สูงในช่วงการเชื่อมต่อกัน ส่งผลให้เกรนที่รอยเชื่อมมีขนาดเล็กกว่าเกรนของชิ้นงานเดิม โดยเกรนที่รอยเชื่อมมี G number 13.87 และเกรนของชิ้นงานเดิมมี G number 10.05 – 10.88 ผลจากการที่เกรนที่รอยเชื่อมมีขนาดเล็กทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม ในส่วนของค่าความแข็งที่รอยเชื่อมลดลงนั้น จากวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Image Analyser พบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีเฟสของ Pearlite ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ที่ 175 – 370 BHN น้อยกว่าส่วนที่อยู่ห่างออกไปจากรอยเชื่อม การที่รอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานมีเฟสของ Ferrite ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ที่ 70 – 150 BHN มากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม จะส่งผลให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานมีค่าความแข็งลดลง และเมื่อระยะห่างออกไปอิทธิพลของผลกระทบจากการเชื่อมค่อย ๆ หดไป ทำค่าความแข็งกลับสู่ค่าความเดิมของมัน

ABSTRACT

TITLE : THE STUDY ON MICRO-STRUCTURE OF LOW CARBON STEEL RODS
WELDED BY FRICTION WELDING

BY : SURASING ARAYANGKUN

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : MECHANICAL ENGINEERING

CHAIR : ASST. PROF. CHAWALIT THINVONGPITUK, Ph.D.

KEYWORDS : FRICTION WELDING

The project was aim to investigate the microstructure of low carbon steel welded by friction welding. The welding machine was constructed and developed to conduct the study. The machine is able to operate under all experimental requirements, which are pressures, time and speed in targeted ranges.

The experiment was done using AISI 1015 steel rods of 10 mm. diameter. The strength and hardness of specimen are 780 MPa and 202 HV respectively.

The experiment condition was extracted from previous researchs and relied on some limitations of the machine. The conditions used in this study were 5 values of friction time (7, 9, 11, 13 and 15 Seconds), 7 values of friction pressure (10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 Bar). The upset time and upset pressure were constant as 3 Sec. and 60 Bar respectively while the rotational speed was 1,200 rpm. The experiment result suggested that friction time of 9 Sec. and friction pressure of 10 Bar may be the most suitable condition. It provided welded strength of 913 MPa, which is 17.09 % higher than the original specimen. However, it was found that the hardness of welded zone is lower than the original specimen. By doing micro – structure analysis it was found that the grain of welded zone is finer than the original one. This can be explained that the upset pressure (60 MPa) has crushed the grain of material in the process. (G number of welded zone is 13.87 while G – number of the original specimen is about 10.05 – 10.88). As the grain becomes smaller, the strength is higher. Considering the hardness, which is found lower around the welded zone, it could be explained that because of the component of ferrite is increased. It is the fact that the

hardness of ferrite is far lower, about 70 – 150 BHN, than the hardness of pearlite therefore, as percentage of pearlite decreases and percentage of ferrite increases of welded zone is decreased.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ความรู้ที่เกี่ยวข้องและทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยความเสียดทาน	4
2.1.1 หลักการเชื่อมด้วยความเสียดทาน	4
2.1.2 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อ การเชื่อมด้วยความเสียดทาน	6
2.1.3 ประเภทของวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน	6
2.1.4 ข้อดีและข้อเสียของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน	9
2.2 ความรู้เกี่ยวกับเหล็กชนิดต่าง ๆ	9
2.2.1 เหล็กกล้า	9
2.2.2 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)	10
2.2.3 ลักษณะทั่ว ๆ ไปของเหล็กคาร์บอน (Plain Carbon Steel)	10
2.2.4 การพิจารณาเหล็กที่มีคาร์บอน 0.45 % จากภาพที่ 2.6	13
2.2.5 คุณสมบัติของเหล็กคาร์บอน	15
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะคุณสมบัติของโครงสร้าง	
จุลภาคชนิดต่าง ๆ	17
2.3.1 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอน	18
2.3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Testing)	22
2.3.4 การวัดความแข็ง (Hardness Testing)	23
2.3.5 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	26
2.4 ทบทวนวรรณกรรม	29
3 การออกแบบและพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน	
3.1 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานก่อนการพัฒนา	32
3.1.1 อุปกรณ์และคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ	33
3.1.2 ข้อดีของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ	34
3.2 การพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน	36
3.2.1 การออกแบบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาแล้ว	37
3.2.2 อุปกรณ์ที่ติดตั้งในเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานหลังการพัฒนา	39
3.2.3 คุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่	44
4 วิธีการศึกษาโครงสร้างจุลภาค	
4.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	46
4.1.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	47
4.1.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ	47
4.2 การกำหนดเงื่อนไขการทดลอง	49
4.2.1 การกำหนดแรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure)	49
4.2.2 การกำหนดเวลาในการเสียดทาน (Friction Time)	49
4.2.3 การกำหนดเงื่อนไขในการทดลองจากตัวแปรคงที่	49
4.2.4 การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม	50
4.3 การทดสอบวัสดุที่ได้จากการทดลอง	50
4.3.1 การเตรียมชิ้นงานและการขึ้นตัวเรือน (Mounting)	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การกำหนดจุดและการวัดค่าความแข็ง	52
4.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	52
4.3.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Image Analyzer	53
5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
5.1 ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	54
5.1.1 ผลทดสอบหาส่วนประกอบทางเคมี	54
5.1.2 ผลการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง	55
5.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	57
5.2 แรงดันในการเสียดทานและเวลาในการเสียดทานที่เหมาะสมในการทดลอง	57
5.2.1 แรงดันในการเสียดทาน	57
5.2.2 เวลาในการเสียดทาน	59
5.3 ผลการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อม	60
5.3.1 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ค่าแรงดันในการเสียดทานแตกต่างกัน	60
5.3.2 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันและเวลาในการเสียดทานที่เหมาะสม	65
5.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	68
5.4.1 การวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค	68
5.4.2 การวิเคราะห์เฟสและขนาดของเกรน (G number)	69
6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปการศึกษา	73
6.1.1 ผลจากการพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน	73
6.1.2 ผลการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน	73
6.2 ข้อเสนอแนะ	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.1 ในส่วนของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนา	74
6.2.2 ในส่วนของผลการทดลอง	74
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก	
ก แบบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน	79
ข ตารางวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานก่อน การเชื่อมและหลังการเชื่อม	84
ค ผลงานตีพิมพ์เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ (ฉบับเต็ม)	93
ประวัติผู้วิจัย	127

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	อุปกรณ์และคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ	33
3.2	รายการอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาแล้ว	38
3.3	อุปกรณ์และคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่	45
5.1	ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ	54
5.2	ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง	56
5.3	ผลการทดสอบค่าความแข็งของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง	56
5.4	ตารางผลการวัดปริมาณเฟส Pearlite และ Ferrite	57
5.5	ผลการทดลองหาค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานภายใต้แรงดันในการเสียดทานต่าง ๆ	58
5.6	ผลการทดลองหาค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานภายใต้เวลาในการเสียดทานต่าง ๆ	59
5.7	ค่าความแข็งที่เงื่อนไขแรงดันการเสียดทานในช่วงต่างๆ เวลาการเสียดทาน 9 Sec. แรงดันการอัด 60 Bar เวลาการอัด 3 Sec. ความเร็วหมุนชิ้นงาน 1,200 rpm	61
5.8	ค่าความแข็งที่เงื่อนไข แรงดันการเสียดทาน 10 Bar เวลาการเสียดทาน 9 Sec.	65
5.9	ผลการทดสอบค่าความแข็งของจุดเชื่อมต่อในแนวแกน Y	67
5.10	ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของ Pearlite และ Ferrite รวมถึงขนาดของเกรน (G number) ที่ระยะต่าง ๆ	70
ข.1	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีชิ้นงานเดิมชิ้นที่ 1 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง	85
ข.2	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีชิ้นงานเดิมชิ้นที่ 2 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง	86
ข.3	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีชิ้นงานเดิมชิ้นที่ 3 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง	87
ข.4	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีชิ้นงานเดิมชิ้นทั้ง 3 ชิ้น โดยนำผลที่ได้จากตารางที่ ข.1 – 3 มาทำการเฉลี่ย	88
ข.5	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของรอยเชื่อมชิ้นที่ 1 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง	89
ข.6	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของรอยเชื่อมชิ้นที่ 2 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.7	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของรอยเชื่อมชั้นที่ 3 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง	91
ข.8	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของรอยเชื่อมทั้ง 3 ชั้น โดยนำผลที่ได้จากตารางที่ ข.5 – 7 มาทำการเฉลี่ย	92

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การเชื่อมด้วยการหมุนเสียดทานในแนวระนาบให้แรงดันอัดด้านเดียว	5
2.2	การเชื่อมด้วยตัวกลางหมุนเสียดทานในแนวระนาบ	7
2.3	การเชื่อมด้วยการหมุนเสียดทานในแนวระนาบทั้งสองด้าน	7
2.4	การเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบขัดสีด้านเดียวในแนวตั้ง	8
2.5	การเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบขัดสีทั้งด้านเดียวในแนวระนาบ	9
2.6	Equilibrium Diagram ของเหล็กคาร์บอน	12
2.7	ลักษณะโครงสร้างของ Pearlite	14
2.8	ลักษณะโครงสร้างของเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่างกัน	15
2.9	คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน ในสภาพ Normalizing	16
2.10	โครงสร้างจุลภาคของ Ferrite และตารางคุณสมบัติ	18
2.11	โครงสร้างจุลภาคของ Pearlite และตารางคุณสมบัติ	19
2.12	โครงสร้างจุลภาคของ Cementite และตารางคุณสมบัติ	19
2.13	โครงสร้างจุลภาคของ Austenite และตารางคุณสมบัติ	20
2.14	โครงสร้างจุลภาคของ Ledeburite และตารางคุณสมบัติ	20
2.15	โครงสร้างจุลภาคของคาร์บอนอิสระหรือ กราไฟท์ และตารางคุณสมบัติ	21
2.16	โครงสร้างจุลภาคของ Bainite และตารางคุณสมบัติ	21
2.17	โครงสร้างจุลภาคของ Martensite และตารางคุณสมบัติ	22
2.18	รูปหัวเพชร และรอยกด	25
2.19	ลักษณะต่างๆของชิ้นทดสอบแรงดึง	26
2.20	สัดส่วนของชิ้นงานทดสอบแรงดึง (ก) กรณีชิ้นงานพื้นที่หน้าตัดกลม (ข) กรณีชิ้นงานพื้นที่หน้าตัดแบน	27
2.21	อุปกรณ์และการติดตั้งชิ้นทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึง	28
3.1	เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ ก่อนการพัฒนา	33
3.2	Monoblock Valve ควบคุมการเคลื่อนที่ของกระบอกไฮดรอลิกส์ ชนิดไป – กลับ	34
3.3	แผ่นเหล็กที่ใช้ยึดเพลาประคอง และเพลาประคอง	35
3.4	เรือนลูกปืน (Housings Bearing) ขนาด 2 inches	35
3.5	โครงสร้างที่ยึดติดกับแท่นคอนกรีต	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.6	ภาพมุมมองด้านหน้าเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานใหม่ที่พัฒนามาจากเครื่องต้นแบบ	37
3.7	ภาพมุมมองด้านหลังเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานใหม่ที่พัฒนามาจากเครื่องต้นแบบ	38
3.8	เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน (Friction Welding Machine) ที่ได้รับการพัฒนา	39
3.9	มอเตอร์ขนาด 5 Hp และเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ขนาด 7.5 Hp ชุดใหม่ที่ติดตั้งเข้าไป	40
3.10	แผ่นเหล็กที่ใช้ยึดเพลาประคอง และเพลาประคอง	41
3.11	วาล์วปรับควบคุมแรงดันไฮดรอลิกส์ด้วยมือ (Manual Relief Valve) ที่ติดตั้งในเครื่องที่ พัฒนาแล้ว	42
3.12	วาล์วควบคุมการเปิด-ปิด ไฮดรอลิกส์ (Electric Solenoid Valve)	43
3.13	เครื่องควบคุมเวลาในการทำงาน (Timer) ยี่ห้อ Omron รุ่น H3CA ที่ใช้ติดตั้งในเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่	43
3.14	วาล์วควบคุมความเร็วของกระบอก (Manual Flow control Valve)	44
3.15	แผนผังกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้นกระบวนการ	45
4.1	ตัวอย่างของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง	46
4.2	เครื่อง Spectrometer ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง	47
4.3	เครื่องทดสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อม	48
4.4	เครื่องวัดความแข็ง ยี่ห้อ Multitoyo รุ่น MVK-H1 Micro Hardness Test	48
4.5	แบบชิ้นงานที่นำไปกลึงบาก	50
4.6	ชิ้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นตัวเรือน	51
4.7	ชิ้นงานที่ขึ้นตัวเรือนด้วย เรซินฟีนอล- ฟอร์มัลดีไฮด์	51
4.8	(ก) ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเสียดทาน (ข) แบบของชิ้นงานที่ตัดเฉพาะส่วนของแนวเชื่อมต่อ (ค) แบบของชิ้นงานที่ผ่าครึ่ง (ง) แบบของชิ้นงานผ่าครึ่งที่กำหนดแนวทดสอบค่าความแข็ง	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.9	กล้องจุลทรรศน์ และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการส่องดูโครงสร้างของชิ้นงาน และถ่ายภาพเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผล	53
4.10	เครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง ยี่ห้อ Olympus รุ่น Olysia M3	53
5.1	กราฟค่าความแข็งในแนวแกน X ที่จุดต่าง ๆ ของเหล็กที่จะนำไป ทดลองเชื่อมด้วยความเสียดทาน	56
5.2	กราฟค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แรงดันในการเสียดทาน ในช่วงต่าง ๆ	58
5.3	กราฟค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้เวลาในการเสียดทาน ในช่วงต่าง ๆ	59
5.4	กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 10 Bar	62
5.5	กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 15 Bar	62
5.6	กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 20 Bar	63
5.7	กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 25 Bar	63
5.8	กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 30 Bar	64
5.9	กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 10, 15, 20, 25 และ 30 Bar	64
5.10	กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 10 Bar เวลาในการเสียดทาน 9 Sec. (เฉลี่ยจากชิ้นงาน 5 ชิ้น)	66
5.11	กราฟค่าความแข็งในแนวแกน Y	67
5.12	ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเสียดสีกันก่อนการดันอัดให้เชื่อมต่อกัน	68
5.13	เกรนที่จุดเชื่อมต่อดำยที่กำลังขยาย 50 X และลดขนาดลง 50 %	69
5.14	เกรนของเหล็ก AISI 1015 ก่อนการเชื่อมต่อดำยที่กำลังขยาย 50 X และลดขนาดลง 50%	69
5.15	กราฟการเปลี่ยนแปลงของ Pearlite, Ferrite และ G number บริเวณแนวเชื่อมต่อ และส่วนที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม	70
5.16	ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ระยะต่างๆ โดยภาพขยายขนาด 50 X	71
ก.1	ภาพแยกชิ้นส่วนของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.2	ภาพมุมมองเฉียงของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา	81
ก.3	ภาพด้านหน้าของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา	81
ก.4	ภาพด้านข้าง (ขวา) ของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา	82
ก.5	ภาพด้านข้าง (ซ้าย) ของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา	82
ก.6	ภาพด้านหลังของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา	83
ก.7	ภาพด้านบนของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยความเสียดทานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย เนื่องจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีคุณภาพ มีความแข็งแรงสูง สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ การเชื่อมด้วยความเสียดทานมีข้อดีหลายประการเช่น ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างฝีมือ ชิ้นงานที่เชื่อมมีการผสมผสานทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม ไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุช่วยประสาน ซึ่งเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยไฟฟ้า โดยใช้รูปเชื่อมเป็นตัวเชื่อมประสาน พบว่าการใช้รูปเชื่อมนี้มีลักษณะเหมือนการพอก เพราะเป็นการเชื่อมติดบริเวณผิวด้านนอกของชิ้นงานมากกว่า โดยเฉพาะเมื่อชิ้นงานมีพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น ความแข็งแรงของแนวเชื่อมยิ่งน้อยลง ซึ่งต่างจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานเป็นอย่างมาก เพราะการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นให้คุณภาพของชิ้นงานที่เชื่อมทั่วทั้งหน้าตัดของแนวเชื่อม ด้วยข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงได้มีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมแบบนี้อย่างต่อเนื่องและกว้างขวาง ซึ่งจากการศึกษาการเชื่อมวัสดุที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน และพื้นที่หน้าตัดต่างขนาดกัน [1] พบว่าชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่มีพื้นที่หน้าตัดต่างขนาดกัน และขนาดเท่ากันมีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากการกำหนดค่าตัวแปรในการเชื่อมจึงมีการศึกษาหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมกับการเชื่อมตามคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ โดยมีตัวแปรที่หน้าทำการศึกษาในเบื้องต้นคือ แรงดันในการเสียดทาน และเวลาในการเสียดทาน [2] [3] ในส่วนของตัวแปรอื่นๆที่มีการศึกษาวิจัย เช่น ความเร็วในการหมุนของชิ้นงานเชื่อม [4] แรงดันในการอัดและเวลาในการอัด [5] ซึ่งทำการทดลองเชื่อมด้วยความเสียดทานกันวัสดุชนิดเดียวกัน และวัสดุชนิดต่างกัน [6] [7] [8] จากการศึกษาวิจัยพบว่าแรงดันในการเสียดทาน และเวลาในการเสียดทานมีเป็นปัจจัยหลักเบื้องต้นของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ซึ่งจะส่งผลอย่างมากต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม [9] [10] การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม [11] [12] ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่รอยเชื่อมพบว่าการเปลี่ยนแปลงที่รอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานมีการเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติวัสดุที่ใช้เชื่อม ซึ่งเกิดจากการใช้วัสดุชนิดเดียวหรือต่างชนิดกัน โดยมีเงื่อนไขของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเชื่อมเป็นส่วนประกอบที่จะส่งผลให้รอยเชื่อมที่เกิดมีค่าความแข็งแรง และความแข็งแรงที่แตกต่างกัน จาก

การศึกษาการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยการเชื่อมเหล็ก AISI 304 เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. โดย การวิเคราะห์เชิงสถิติ พบว่าแรงดันในการเสียดทานที่ 60 MPa และเวลาในการเสียดทานที่ 9 Sec. เป็นค่าที่เหมาะสมในการเชื่อม [13] และจากการศึกษาการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยการเชื่อมท่อ กลมกันวัสดุที่มีรูปทรงต่างกัน พบว่าสามารถเชื่อมต่อชิ้นงานได้ดี [14] ในส่วนของการศึกษาถึง วิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยการถั่นเชิงเส้น (Linear Friction Welding (LFW)) [15] [16] พบว่ามีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมมากเนื่องจากสามารถเชื่อมได้ตลอดหน้าสัมผัส และใน การศึกษาการเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบหัวหมุนเชื่อมเคลื่อนที่ตามแนวเชื่อม (Friction Stir Welding) [17] ก็เป็นวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทานอีกหนึ่งวิธีการที่กำลังได้รับความสนใจ ทำการศึกษาวิจัย เนื่องจากสามารถเชื่อมต่อชิ้นตามแนวยาวของชิ้นงานเชื่อม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสร้าง และพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน และวิเคราะห์โครงสร้างของเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานในระดับ จุลภาค อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรอื่นๆอีกหลายตัวที่อาจมีผลต่อความแข็งแรง และความแข็งแรงของรอย เชื่อมด้วยความเสียดทาน เช่น แรงดันและเวลาในการเชื่อม ความยาวของชิ้นงานที่หายไป ความเร็ว ในการหมุนชิ้นงานเชื่อม อุณหภูมิในการเชื่อม และลักษณะของผิวสัมผัสเป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ จะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการเชื่อม และทดสอบระบบการเชื่อมโลหะด้วยความเสียดทาน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมด้วยความเสียดทาน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างของเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

ในระดับจุลภาค

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การออกแบบ สร้างและพัฒนาเครื่องเชื่อม ด้วยความเสียดทาน และส่วนที่ 2 คือการทดลอง โดยมีขอบเขตงานในแต่ละส่วนดังนี้

1.3.1 การสร้างและพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบต้องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องจน เสร็จสิ้นขบวนการ

- 1.3.1.1 สามารถปรับตั้งเวลาในการเสียดทาน และเวลาในการอัดได้

1.3.1.2 สามารถปรับตั้งแรงดันในการเสียดทาน และแรงดันในการอัดได้

1.3.1.3 สามารถปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกไฮดรอลิกส์ได้

1.3.1.4 สามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงานเชื่อมได้

1.3.2 การทดลอง

ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมด้วยความเสียดทาน ก่อนและหลังการเชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยคุณสมบัติหลักที่จะต้องทำการศึกษา ได้แก่

1.3.2.1 ความแข็งแรงของชิ้นงาน

1.3.2.2 ความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV)

1.3.2.3 ลักษณะและองค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาค

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาแล้ว

1.4.2 ได้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างวัสดุที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม

1.4.3 เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยงานเชื่อมด้วยความเสียดทานในด้านอื่น ๆ ต่อไป

บทที่ 2

ความรู้ที่เกี่ยวข้องและทบทวนวรรณกรรม

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

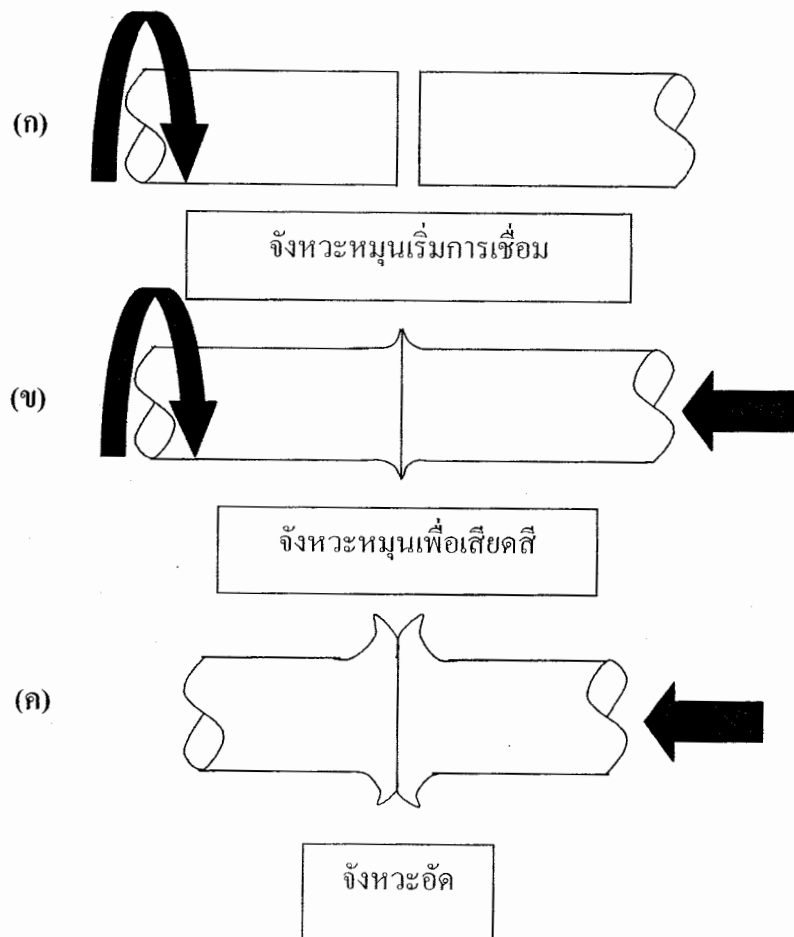
2.1.1 หลักการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

โดยปกติแล้วการเชื่อมประสานวัสดุต่าง ๆ ที่ต้องการความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงนั้นส่วนมากมักอาศัยความร้อนเป็นตัวประสานหรือตัวช่วยประสาน ซึ่งการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่อาศัยพลังความร้อนเป็นตัวประสาน โดยการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นมีหลากหลายวิธีการ และในงานวิจัยที่ทำการศึกษานี้จะทำการศึกษากการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยวิธีการหมุนเสียดทานในแนวระนาบ โดยให้แรงดันอัดด้านเดียว ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งมีหลักการเชื่อมด้วยความเสียดทานดังนี้

2.1.1.1 จังหวะหมุนเริ่มการเชื่อม คือการนำชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานมาจับยึดติดกับหัวจับชิ้นงานเชื่อมทั้งสองด้านและหมุนชิ้นงานเชื่อมด้านเดียว โดยให้ความเร็วและแรงบิดที่เหมาะสมกับขนาดและคุณสมบัติของชิ้นงานเชื่อม ดังภาพที่ 2.1 (ก)

2.1.1.2 จังหวะหมุนเพื่อเสียดสี ในจังหวะนี้คือขั้นตอนของขบวนการทำให้เกิดความร้อนบริเวณหน้าสัมผัสของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองด้าน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลกระทบต่อรอยเชื่อม การสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นนั้นจะต้องให้แรงดันในการเสียดทาน (Friction Welding) ที่เหมาะสมแก่ชิ้นงานด้านที่ไม่หมุนดันให้ชิ้นงานทั้งสองเสียดสีกัน และให้แรงดันในการเสียดทานเป็นแรงดันที่ต่ำ ซึ่งการกำหนดแรงดันขึ้นอยู่กับขนาดและคุณสมบัติของวัสดุที่เสียดสีกัน ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการเสียดทาน (Friction Time) และความเร็วในการดันให้ชิ้นงานเสียดสีกัน (Friction Speed) ก็มีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าสัมผัสของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองด้านด้วยเช่นกัน ดังนั้นในจังหวะหมุนเพื่อเสียดสีจะต้องคำนึงถึงตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ คือ แรงดันในการเสียดทาน, เวลาในการเสียดทาน, ความเร็วรอบของการหมุนชิ้นงานเชื่อม และความเร็วในการดันให้ชิ้นงานเสียดสีกัน เมื่อกำหนดค่าของตัวแปรที่เหมาะสมได้แล้ว ก็จะสามารถเริ่มขบวนการหมุนเพื่อเสียดสีกันได้ โดยการดันให้ชิ้นงานด้านที่ไม่หมุนให้เคลื่อนที่เข้าเสียดสีกันเพื่อสร้างความร้อนที่หน้าสัมผัส ดังภาพที่ 2.1 (ข)

2.1.1.3 จังหวะอัด เป็นขั้นตอนสุดท้ายของขบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทาน และเมื่อเสร็จสิ้นขบวนการในข้อ 2.1.1.2 แล้วการหมุนของชิ้นจะหยุดจากนั้นจะให้แรงดันในการอัด ชิ้นงานหรือเรียกอีกอย่างว่าแรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ซึ่งเป็นแรงดันที่สูงมาก และให้ เวลาในการอัดหรือเรียกอีกอย่างว่าเวลาในการเชื่อม (Upset Time) เชื่อมชิ้นงานทั้งสองให้ติดกัน ดัง ภาพที่ 2.1 (ค) ซึ่งตัวแปรทั้งสองนี้ต้องกำหนดให้เหมาะสมกับขนาดและคุณสมบัติของชิ้นงานเชื่อม เช่น ถ้าให้แรงดันและเวลาในการอัดมากเกินไปอาจทำให้ชิ้นงานเชื่อมคดงอและแนวเชื่อมเสียศูนย์ ได้ หรือให้แรงดันในการอัดน้อยเกินไปอาจทำให้รอยเชื่อมไม่ความแข็งแรงพอเพียงที่จะรองรับ ภาระเชิงกลได้



ภาพที่ 2.1 การเชื่อมด้วยการหมุนเสียดทานในแนวระนาบให้แรงดันอัดด้านเดียว

2.1.2 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นแบ่งออกได้หลายตัวแปร ได้แก่

2.1.2.1 แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) หมายถึง แรงดันที่ใช้ในการดันให้ชิ้นงานสัมผัสและเสียดสีกันในจังหวะเสียดสี ดังนั้นจึงมีผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่หน้าสัมผัส และมีผลต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น

2.1.2.2 แรงดันในการอัด (Upset Pressure) หมายถึง แรงดันที่ใช้ในการอัดให้ชิ้นงานติดกันหลังจากการเสียดสีจนเกิดความร้อนเพียงพอแล้ว แรงดันในการอัดเกิดขึ้นในช่วงเวลาเพียงสั้น ๆ เท่านั้น

2.1.2.3 เวลาในการเสียดทาน (Friction Time) หมายถึง เวลาที่ใช้ในจังหวะการเสียดสีชิ้นงานให้เกิดความร้อน

2.1.2.4 เวลาในการอัด (Pressure Time) หมายถึง เวลาที่ใช้ในการอัดให้ชิ้นงานติดกันในจังหวะอัด

2.1.2.5 ความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงาน (Rotational Speed) หมายถึง ความเร็วรอบของชิ้นงานที่เชื่อม ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างที่เกิดการเสียดทาน

2.1.2.6 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการเสียดทาน

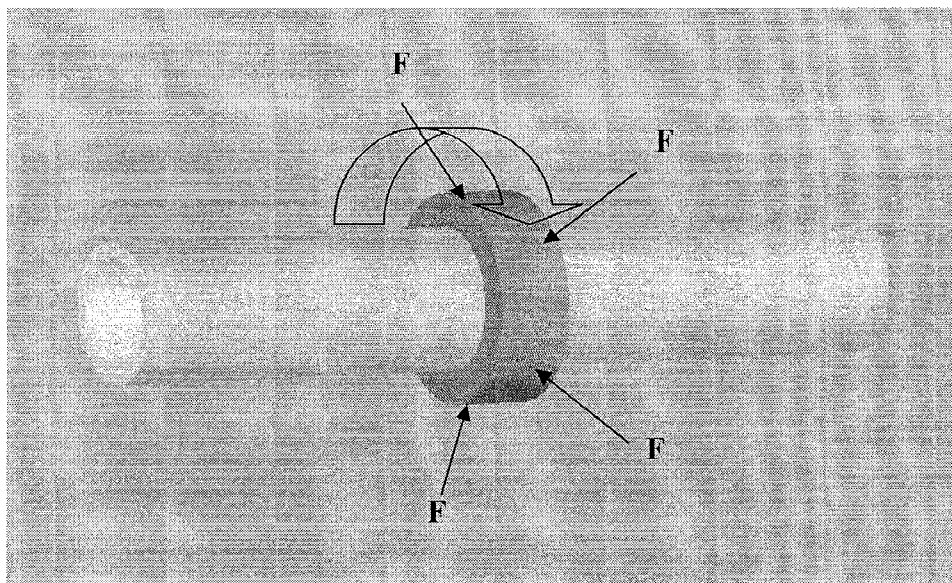
2.1.2.7 ระยะเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานที่เชื่อม

2.1.3 ประเภทของวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

การเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นสามารถแบ่งวิธีการเชื่อมออกไปได้หลายวิธีการ ซึ่งแต่ละวิธีการนั้นอาศัยความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดทานเป็นตัวช่วยประสานดังแสดงในภาพที่ 2.1-2.5

2.1.3.1 การเชื่อมด้วยตัวกลางหมุนเสียดทานในแนวระนาบ

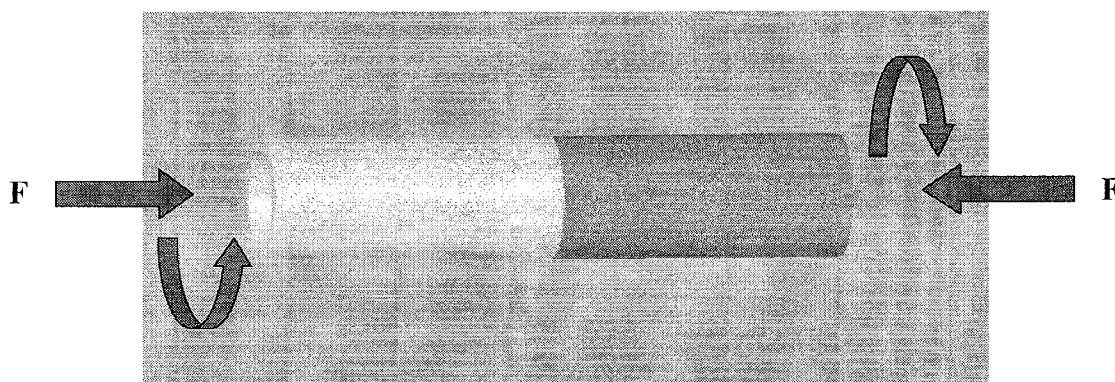
การเชื่อมด้วยวิธีการนี้อาศัยการหมุนของชิ้นงานตัวกลางเพื่อสร้างความร้อนให้แก่บริเวณหน้าสัมผัสของชิ้นงานเชื่อมจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเชื่อมวัสดุชนิดนั้น จากนั้นจึงให้แรงดันที่เหมาะสมอัดชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมเข้าหากัน ซึ่งจะเป็นผลทำให้ชิ้นงานเชื่อมต่อดกกันได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การเชื่อมด้วยตัวกลางหมุนเสียดทานในแนวระนาบ

2.1.3.2 การเชื่อมด้วยการหมุนเสียดทานในแนวระนาบทั้งสองด้าน

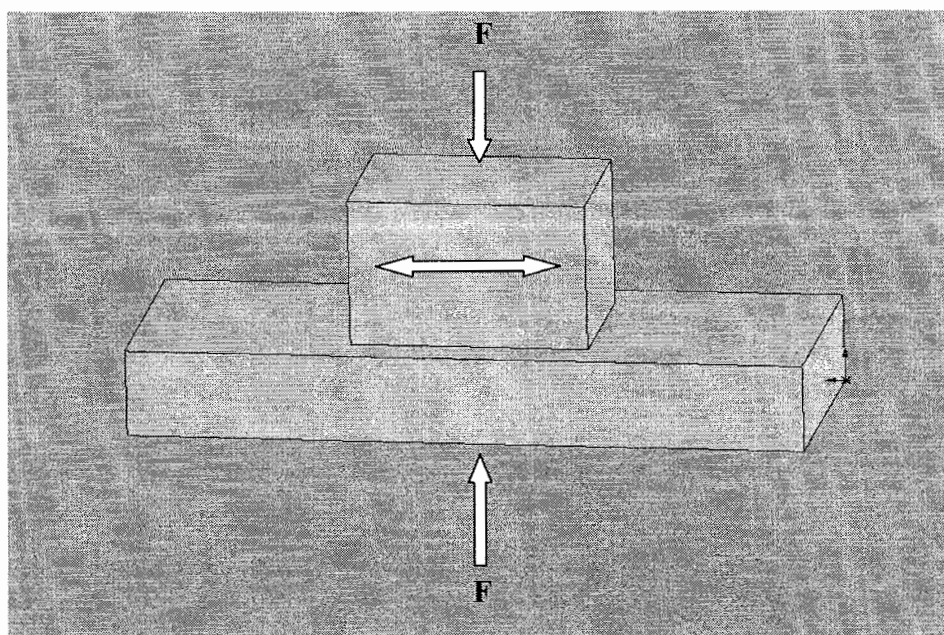
การเชื่อมด้วยวิธีการนี้อาศัยหลักการเชื่อมด้วยวิธีการหมุนชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมทั้งสองชิ้นงาน จากนั้นดันชิ้นงานในขณะที่ยังหมุนอยู่ให้หน้าสัมผัสของชิ้นงานทั้งสองสัมผัสและเสียดสีกัน จนกระทั่งบริเวณหน้าสัมผัสของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเชื่อมวัสดุชนิดนั้น จึงหยุดการหมุนชิ้นงานเชื่อมและให้แรงดันอัดชิ้นงานทั้งสองด้านเข้าหากัน เป็นผลทำให้ชิ้นงานทั้งสองต่อติดกันได้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การเชื่อมด้วยการหมุนเสียดทานในแนวระนาบทั้งสองด้าน

2.1.3.3 การเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบขัดสีด้านเดียวในแนวตั้ง

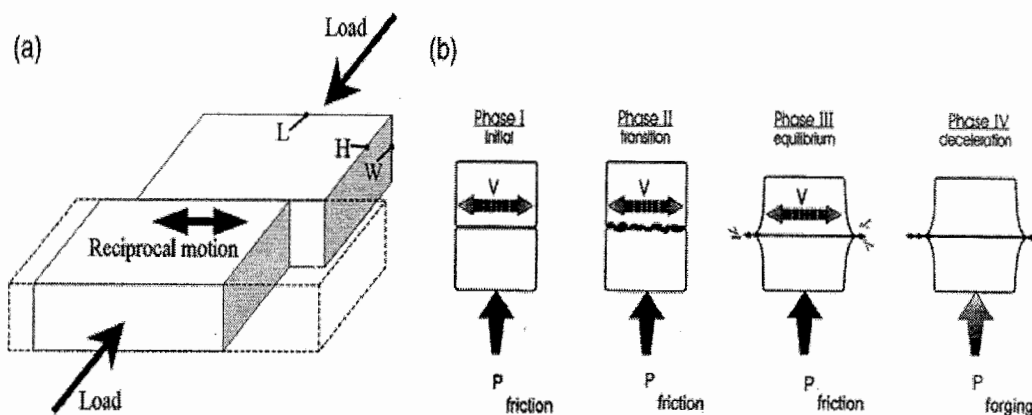
การเชื่อมด้วยวิธีการนี้อาศัยการสั่นของชิ้นงานเชื่อมที่อยู่ในแนวตั้ง (แกน y) ขัดสีกับชิ้นงานในแนวระนาบ (แกน x) ในระหว่างการขัดสีกันนั้นจะต้องให้แรงที่เหมาะสมในแนวแกนตั้งชิ้นงานทั้งสองเข้าหากัน จนกระทั่งหน้าสัมผัสของชิ้นงานที่เสียดสีกันเกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเชื่อมวัสดุชนิดนั้น จึงหยุดการสั่นเสียดสีกันและให้แรงดันในการอัดเพื่อเชื่อมชิ้นงานทั้งสองให้ติดกันดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบขัดสีด้านเดียวในแนวตั้ง

2.1.3.4 การเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบขัดสีทั้งด้านเดียวในแนวระนาบ

การเชื่อมด้วยวิธีการนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะเชื่อมชิ้นงานในแนวระนาบด้วยวิธีการสั่นชิ้นงานด้านเดียวแล้วให้แรงดันอัดชิ้นงานเข้าหากันทั้งสองด้าน โดยกระบวนการเชื่อมด้วยวิธีการนี้จะสร้างการสั่นด้วยอุลตราโซนิคจนทำให้หน้าสัมผัสของชิ้นงานทั้งสองที่จะทำการเชื่อมเกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเชื่อมวัสดุชนิดนั้น แล้วจึงหยุดการสั่นและให้แรงดันในการอัดเพื่อเชื่อมชิ้นงานทั้งสองให้ติดกันดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเชื่อมด้วยความเสียดทานแบบขัดสีทั้งด้านเดียวในแนวระนาบ [15]

2.1.4 ข้อดีและข้อเสียของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

ข้อดีของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน คือ สามารถเชื่อมต่อกันได้ทั้งพื้นหน้าตัดของชิ้นงาน ไม่มีฟองอากาศ มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับวัสดุเดิมหรืออาจมากกว่า ใช้เวลาในการเชื่อม น้อย มีรอยเชื่อมสม่ำเสมอไม่จำเป็นต้องใช้ช่างฝีมือเชื่อม ชิ้นงานเชื่อมแต่ละชิ้นที่เชื่อมด้วยเงื่อนไขเดียวกันมีค่าความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในงานอุตสาหกรรมนิยมใช้ในการเชื่อมต่อวัสดุที่ต้องการความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงเช่น เพลากลาง เพลาขับ ก้านวาล์ว อดีไอเสียร์รถยนต์

ข้อเสียของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน คือ เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานมีราคาแพงและมีขนาดใหญ่ต้องใช้พื้นที่ในการจัดวางและติดตั้งเครื่อง ต้องมีการเตรียมการหาข้อมูลของวัสดุที่จะทำการเชื่อมเพื่อที่จะใช้เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขในการเชื่อม ตลอดจนปัจจุบันยังมีผู้เชี่ยวชาญที่เข้าใจถึงเทคนิคและวิธีการในการเชื่อมด้วยความเสียดทานน้อย

2.2 ความรู้เกี่ยวกับเหล็กชนิดต่าง ๆ

2.2.1 เหล็กกล้า

หมายถึงเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม โดยจะยึดถือหลักที่ว่าในเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า 1.7 หรือ 2 % จะเรียกว่าเหล็กกล้า (ถ้ามีคาร์บอนผสมอยู่มากกว่า 1.7 หรือ 2 % จะจัดเป็นเหล็กหล่อ) นอกจากธาตุคาร์บอนแล้วยังอาจจะมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย แต่จะอยู่ในลักษณะเป็นธาตุเจือปน (Impurities) เช่น ซิลิกอน, แมงกานีส, กำมะถัน และฟอสฟอรัส เหล็กกล้าแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่คือ

2.2.2 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)

เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลัก ธาตุอื่น ๆ มีอยู่น้อยไม่เจาะจงผสมลงไป แต่อาจจะติดมาจากกรรมวิธีทางถลุง หรือ กรรมวิธีไล่แก๊ส เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสม คือ

2.2.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) มีคาร์บอนน้อยไม่เกิน 0.2 % เป็นเหล็กที่อ่อนมีความแข็งแรงต่ำ สามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย ที่ทำเป็นเหล็กเส้นใช้ในงานก่อสร้าง หรือรีดเป็นแผ่นใช้ในงานวิศวกรรมทั่ว ๆ ไป บางทีเรียกเหล็กชนิดนี้ว่าเหล็กละมุน (Mild steel)

2.2.2.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) มีคาร์บอนตั้งแต่ 0.2 - 0.5 % เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าประเภทแรกใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลทั่ว ๆ ไป สามารถทำการอบชุบได้

2.2.2.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) มีคาร์บอนตั้งแต่ 0.5 % ขึ้นไป จัดเป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูง

2.2.3 ลักษณะทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steel)

เหล็กกล้าคาร์บอน หรือ Carbon Steel เป็นวัสดุช่างประเภทเดียวที่มีคุณสมบัติทางความแข็งแรง (Strength) และความอ่อนตัว (Ductility) ที่เปลี่ยนแปลงได้กว้างมากตามปริมาณของคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็ก ทำให้เหมาะที่จะเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงาน ดังตัวอย่างเช่น ในเหล็กกล้าคาร์บอน ถ้ามีปริมาณของคาร์บอนต่างกันเพียงเล็กน้อยจะทำการชุบแข็งด้วยวิธีแตกต่างกันหรือทำการขึ้นรูป (Mechanical Forming) แตกต่างกันอีก อาจจะทำให้เหล็กมีความแข็งแรงแตกต่างกันได้อย่างมากมายคือ อาจจะไปรับค่าความแข็งแรงได้ถึงจำนวน 10 Kg / mm² อัตราการยืดตัว (Elongation) ก็อาจจะแตกต่างกันได้ตั้งแต่ 50% ถึง 0.1%

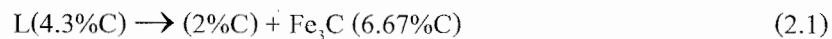
การศึกษาถึงคุณสมบัติและการควบคุมคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยการอธิบายร่วมกับ Equilibrium Diagram ของเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งเราทราบว่าปริมาณของคาร์บอนในเหล็กมีความสำคัญมากต่อความแข็งแรง (Strength) และความอ่อนตัว (Ductility) ก่อนที่จะศึกษาถึง Equilibrium Diagram ของเหล็กกล้าคาร์บอนควรจะต้องทราบ Terminology ที่เกี่ยวข้องกับ Diagram เสียก่อน ดังนี้

Austenite หรือที่เรียกว่าเหล็กแกมมา (γ) คือ Solid Solution ของเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุดถึง 2 % (บางกรณีใช้ 1.7 %) ที่อุณหภูมิ 1130°C มีระบบผลึก (Crystal System) เป็น Face Centered Cubic (Fcc)

Ferrite ที่มีค่าความแข็ง 74 – 158 HV หรือที่เรียกว่าเหล็กแอลฟา (α) คือ Solid Solution ของเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุด 0.025 % ที่อุณหภูมิ 723 °C มีระบบผลึกเป็น Body-Centered Cubic (Bcc)

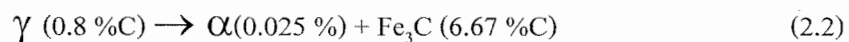
Cementite หรือ เหล็กคาร์ไบด์ บางทีก็เรียกว่าคาร์ไบด์เฉยๆ เป็น Intermetallic Compound ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนมีสูตร Fe_3C ซึ่งมีความแข็งสูงมาก แต่เปราะรับแรงกระแทกไม่ได้

Eutectic ที่เกี่ยวกับ Equilibrium Diagram ของเหล็กคาร์บอนนี้คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1,130 °C โดยเหล็กหลอมเหลวที่มีคาร์บอน 4.3% แยกตัวออกเป็น Phase γ มีคาร์บอน 2 % กับ Cementite มีคาร์บอน 6.67 %

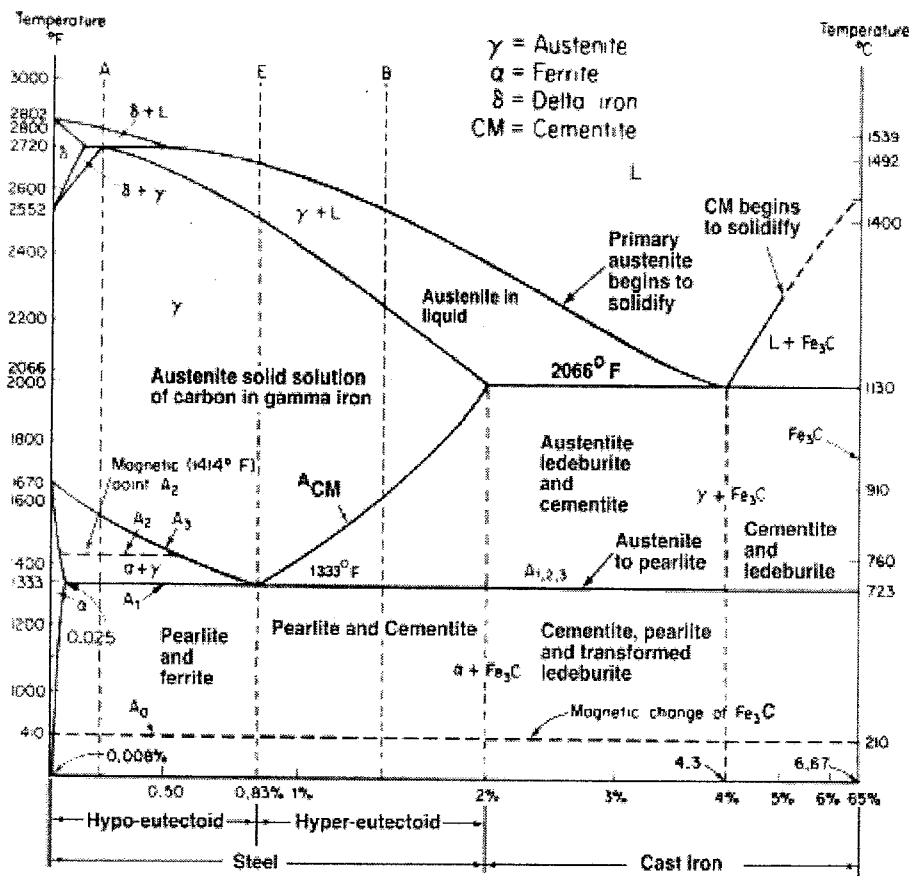


จากปฏิกิริยา Eutectic แสดงว่า อาจเกิดการรวมระหว่าง γ กับ Fe_3C และให้เหล็กหลอมเหลวก็ได้เรียกปฏิกิริยา Eutectic เหมือนกันแต่จะเกิดเมื่อเหล็กถูกเผาให้ร้อน

Eutectoid มีลักษณะคล้ายคลึงกับปฏิกิริยา Eutectic ผิดไปแต่เพียงเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาพของแข็งเท่านั้น ปฏิกิริยานี้คือ การแยกตัวของ Phase γ ไปเป็น Phase α กับ Cementite Fe_3C หรืออาจจะเกิดกับการรวมระหว่าง α กับ Fe_3C ให้ γ ก็ได้



Pearlite ที่มีค่าความแข็ง 184 – 390 HV ซึ่งเป็นผลึกรวมระหว่าง Ferrite (α) 0.025 % C กับ Cementite (6.67 % C) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Eutectoid ในขณะที่ทำให้เย็นช้าๆ การเกิดจะสลับกันเป็นแถบยาวๆ (lamellar Structure) ของ Ferrite กับ Cementite ดังนั้น Pearlite จึงไม่ใช่ Phase เดียว แต่จะเป็นสอง Phase ประกอบ ภาพที่ 2.6 ประกอบ



ภาพที่ 2.6 Equilibrium Diagram ของเหล็กคาร์บอน [18]

A_{cm} คือ เส้นแสดงอุณหภูมิที่จะเกิดการเปลี่ยน Phase จาก Austenite มาเป็น Cementite ในขณะที่เหล็กเย็นตัวลงมาถ้าให้เหล็กร้อนขึ้นก็จะเป็นเส้นที่แสดงการเปลี่ยน Cementite ไปเป็น Austenite

A_3 คือ เส้นแสดงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Ferrite ไปเป็น Austenite มาเป็น Ferrite ในขณะที่เหล็กเย็น และจะเป็นอุณหภูมิที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Ferrite ไปเป็น Austenite ในขณะที่เหล็กร้อน

A_2 คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติแม่เหล็กของ Ferrite ซึ่งจะมีอุณหภูมิประมาณ 768 °C เส้น A_2 ไม่มีการเปลี่ยน Phase ดังนั้นจึงไม่ปรากฏใน Equilibrium Diagram

A_1 เป็นเส้นแสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา Eutectoid คือ อุณหภูมิ 723 °C ทั่วๆ ไป เรามักจะเขียน r กับ c ต่อท้าย A_3 และ A_1 ดังเช่น จาก Equilibrium Diagram ของเหล็กกับคาร์บอน ในรูปของ Cementite (Fe_3C) จะพบว่าเหล็กบริสุทธิ์จะเปลี่ยน Phase จาก α เป็น γ ที่อุณหภูมิ 910 °C (1,670 °F) และเปลี่ยนจาก γ เป็น δ ที่อุณหภูมิ 1,400 °C (2,552 °F) ที่อุณหภูมิ 1539 °C (2,800 °F) เหล็กจะหลอมละลาย

2.2.4 การพิจารณาเหล็กที่มีคาร์บอน 0.4% จากภาพที่ 2.6

2.2.4.1 ที่อุณหภูมิ 1,539°C เหล็กจะอยู่ในสภาพหลอมละลาย

2.2.4.2 ที่อุณหภูมิ 1,500 °C เหล็กจะเริ่มแข็งตัวให้กำเนิดนิวเคลียสของเหล็ก δ (Delta) ที่มีธาตุคาร์บอน 0.075 %

2.2.4.3 ที่อุณหภูมิเหนือ 1,492 °C เล็กน้อยเหล็กจะประกอบด้วยเนื้อเหล็ก δ ที่มีคาร์บอน 0.10 % กับเหล็กหลอมเหลวที่มีธาตุคาร์บอน 0.50 %

2.2.4.4 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,492°C เป็นอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา Peritectic กล่าวคือ เหล็กที่มีธาตุคาร์บอน 0.10 % จะรวมกับเหล็ก หลอม เหลวบางส่วนแล้วให้เหล็ก γ (Gamma) ที่มีธาตุคาร์บอน 0.18 %

2.2.4.5 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,492 °C เล็กน้อยเหล็ก 0.4 % C จะประกอบด้วยเหล็ก γ 0.18 % กับเหล็กหลอมเหลว 0.50 % C

2.2.4.6 เมื่ออุณหภูมิลดลงจะปรากฏเหล็ก γ จะเพิ่มปริมาณมากขึ้น ส่วนปริมาณของเหล็กหลอมเหลวจะลดลงตามลำดับ แต่ทั้งเหล็ก γ และเหล็กหลอมเหลวจะประกอบด้วยธาตุคาร์บอนมากขึ้น

2.2.4.7 ที่อุณหภูมิ 1,450°C จะเป็นจุดที่เหล็กหลอมเหลวที่เหลือแข็งตัวหมด กลายเป็นเหล็ก 0.4 %C

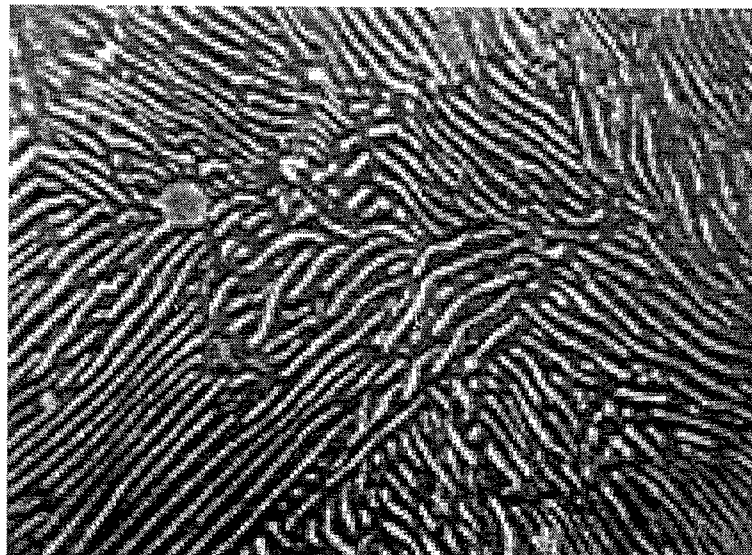
2.2.4.8 เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจะปรากฏเหล็ก γ ไม่เปลี่ยนแปลงยังคงเป็นเหล็ก γ 0.4 % C จนถึงอุณหภูมิ 800 °C จึงจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่บริเวณรอบๆ เม็ดเกรนของเหล็ก จะให้กำเนิดนิวเคลียสของเหล็ก α 0.02 % C และเมื่ออุณหภูมิลดลง ปริมาณของเหล็ก α จะเพิ่มมากขึ้น ส่วนเหล็ก γ จะกลับปริมาณลดลง แต่ทั้งเหล็ก α และ γ จะมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนเพิ่มขึ้นด้วย

2.2.4.9 ที่อุณหภูมิเหนือ 723 °C เล็กน้อย จะปรากฏมีเหล็ก α 0.025 % กับเหล็ก γ 0.8 % C อย่างละประมาณ 50 %

2.2.4.10 ที่อุณหภูมิ 723 °C พอดี เป็นอุณหภูมิที่ให้ปฏิกิริยา Eutectoid ซึ่งเหล็ก γ 0.8% C จะแตกตัวให้เหล็ก α 0.025 % กับ Cementite (Fe_3C) 6.67 % C พร้อมๆ กัน โดยมีปริมาณเหล็ก α 0.025 % มากกว่า Cementite ประมาณ 7 เท่า

$$\frac{\text{ปริมาณเหล็ก } \alpha}{\text{ปริมาณ } \text{Fe}_3\text{C}} = \frac{6.67 - 0.8}{0.8 - 0.025} = \frac{7}{1} \quad (2.3)$$

ลักษณะการแตกตัวของเหล็ก γ จะให้แถบยาวๆ ของเหล็ก α 0.025 % C กับ Cementite สลับกันไปเราเรียกโครงสร้างนี้ว่า Pearlite ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างของ Pearlite [18]

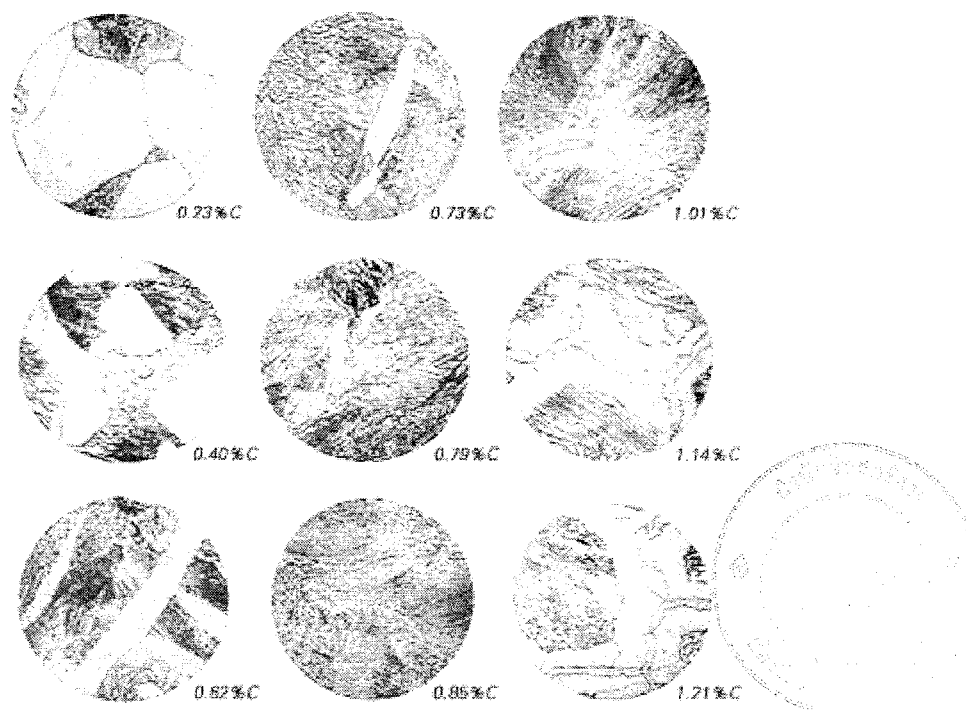
เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอีกกว่า 723°C จะปรากฏว่าเหล็ก 0.4 % C จะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเหล็ก α (0.025 % C) กับ Pearlite (0.8 % C) ถ้าอุณหภูมิลดลงอีกจะปรากฏการเปลี่ยนแปลงอีกเล็กน้อยโดยเหล็ก α 0.025 % C จะแยกตัวให้เหล็ก α ที่มีคาร์บอนน้อยกว่า 0.025 % กับ Cementite (6.67 % C) ซึ่งเป็น Cementite ที่มีชื่อเรียกโดยเฉพาะว่า เทอร์ทีอารี (Tertiary) จะเกิดอยู่รอบๆ แถบบางๆ ของ Ferrite ในโครงสร้าง Pearlite และรอบๆ เกรนของ Ferrite ที่เกิดก่อน 723°C (Primary Ferrite) ในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกออกได้ว่าเป็น Cementite ชนิด Eutectoid หรือ Tertiary เพราะจะมีสูตรและโครงสร้างเหมือนกันคือ Fe_3C

การเปลี่ยนแปลงที่อธิบายนี้จะเกิดเฉพาะเมื่ออัตราการเย็นตัว (Rate of Cooling) เป็นไปอย่างช้าๆ เพื่อเปิดโอกาสให้อะตอมของคาร์บอนสามารถเคลื่อนที่ได้ทันทำให้เกิด Phase ต่างๆ แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวเร็วจะไม่ปรากฏ Phase ต่างๆ ที่อธิบายแต่กลับจะได้โครงสร้างของเหล็กต่างออกไป

ในการคำนวณหาปริมาณของ Phase ที่เกิด ณ อุณหภูมิต่างๆ อาศัยกฎของ Lever-Arm ดังเช่น เหล็ก 0.40 % C ที่ 750°C จะมีปริมาณของเหล็ก $\alpha = 34\%$ และ $\gamma = 66\%$

สำหรับเหล็ก 0.8 % C ตาม Diagram (ภาพที่ 2.6) ที่อุณหภูมิบรรยากาศ จะมีโครงสร้างที่เป็น Pearlite ทั้งหมด 100 % และเหล็กที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.8 % ที่อุณหภูมิบรรยากาศ จะมีโครงสร้างประกอบด้วย Cementite กับ Pearlite ซึ่งจะมี Cementite ถึงสามประเภทคือ

Pro-eutectoid, Eutectoid และ Tertiary เหล็ก 1 % C ที่อุณหภูมิ 500 °C จะปรากฏมีเหล็ก α 0.02 % กับ Cementite (Fe_3C) 6.67 % C ดังแสดงในภาพที่ 2.8

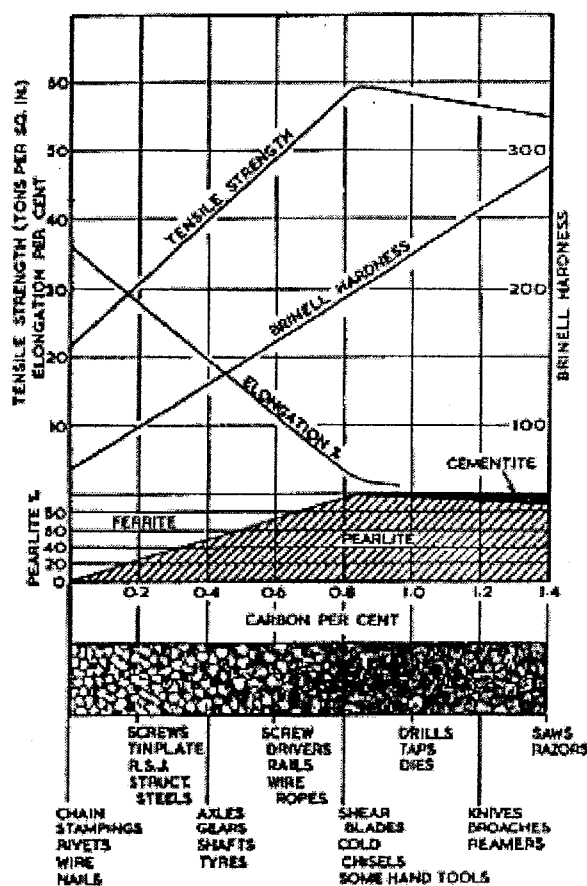


ภาพที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างของเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่างกัน [18]

2.2.5 คุณสมบัติของเหล็กคาร์บอน

จากที่ทราบว่า ธาตุคาร์บอนเป็นธาตุที่อยู๋ได้ในเหล็กกล้าสองลักษณะคือ ในสภาวะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) และธาตุคาร์บอนอีกส่วนหนึ่งที่เกินปริมาณที่จะละลายได้ จะรวมกับเหล็กเป็นสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compound) หรือ Cementite ซึ่งจะมีบทบาทที่สำคัญในการทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนมีความแข็งแรง และความแข็งเพิ่มมากขึ้น ตามปริมาณของ Cementite นอกจากคาร์บอนจะเป็นธาตุที่มีบทบาทเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว การอบชุบเหล็กกล้ามีส่วนสำคัญอีกประการหนึ่งที่เปลี่ยนโครงสร้างของเหล็ก ซึ่งผลการอบชุบมีบทบาทที่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเหล็กได้กว้างขวางมาก อาจจะทำให้เหล็กมีความแข็ง หรือความเหนียวได้สูงขึ้นอยู่กับการอบชุบ และลักษณะของโครงสร้างสุดท้ายที่ได้รับ ดังนั้นในการกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนจะต้องกำหนดธาตุคาร์บอน และลักษณะการอบชุบความร้อนประกอบด้วย เพราะถ้ากำหนดอย่างหนึ่งจะเป็นการยากที่จะทราบคุณสมบัติเชิงกลได้แน่นอน ในทางวิชาการยังต้องกำหนดลักษณะโครงสร้าง และรายละเอียดของขนาดเกรนอีกด้วยเพื่อความแน่นอน สำหรับทางด้านปฏิบัตินิยมกำหนดส่วนผสม และการอบชุบ

ในที่นี้จะขอนำลักษณะของเหล็กที่ผ่านการทำนอร์มอลไลซ์ (Normalizing) ที่ปริมาณคาร์บอนต่าง ๆ เพื่อให้เห็นลักษณะ โครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนไฮโปยูเทคตอยด์ (Hypo-Eutectoid) (0.4 % C) และเหล็กกล้าคาร์บอนไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (Hyper-Eutectoid) (1.2 % C) และผลจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (การทดสอบแรงดึงและความแข็ง) ดังแสดงในภาพที่ 2.9



—Diagram Showing the Relationship between Carbon Content, Mechanical Properties, Microstructure and Uses of Plain Carbon Steels in the Normalized Condition.

ภาพที่ 2.9 คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน ในสภาพ Normalizing [18]

จากภาพจะเห็นว่าค่าความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้น จนถึงประมาณ 0.8 % C โครงสร้างจะเป็น Pearlite และเมื่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นจะปรากฏค่าความเค้นแรงดึงจะกลับลดลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเหล็กมีคาร์บอนสูงเกินกว่า 0.8 % จะปรากฏ Cementite ประเภท Secondary เกิดตามขอบเกรน และมีลักษณะต่อเนื่อง ทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนไม่สามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้นที่เป็นเช่นนั้นเพราะ Cementite ที่แข็ง และเปราะไปห่อหุ้มเนื้อเหล็กที่เป็น Pearlite ทำให้ Pearlite ไม่มีโอกาสรับแรงได้เต็มที่ Cementite จะแตกหรือขาดเสียก่อน ทำให้ค่าความเค้นแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนลดลง

สำหรับความแข็งแรงปรากฏว่ายังมีคาร์บอนมาก ปริมาณ Cementite จะมากตาม ทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคาร์บอน ส่วนความเหนียวของเหล็กกล้าจะลดลงเมื่อมีคาร์บอนเพิ่มขึ้น และจะเข้าใกล้ค่าอัตราการยืดตัว (% Elongation) เป็นศูนย์เมื่อเหล็กมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.8 %

การที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนเช่น ทำให้เหล็กที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.8 % มีค่าความเค้นแรงดึง และอัตราการยืดตัวให้สูงขึ้น สามารถทำได้โดยการอบชุบ Spheroidizing

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะและคุณสมบัติของโครงสร้างจุลภาคชนิดต่าง ๆ

2.3.1 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

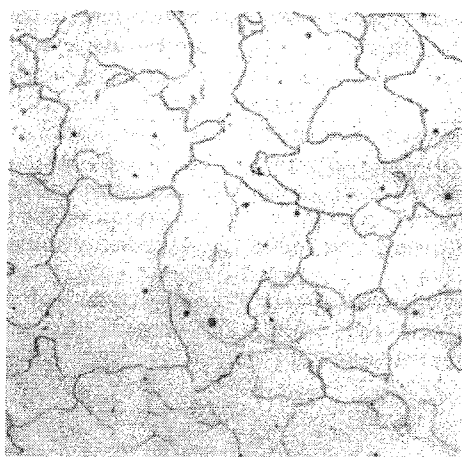
โครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างที่ต้องตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง (ปกติใช้กำลังขยายในช่วง 75 – 1,500 เท่า) การศึกษาโครงสร้างจุลภาคเรียกว่าไมโครกราฟฟี (Micrography) การศึกษาทางโลหะวิทยาโดยทั่วไปนั้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อตรวจสอบขนาด และรูปร่างของผลึก, ลักษณะโครงสร้างของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีต่างๆ มาแล้ว, ข้อบกพร่องภายในโครงสร้าง (อโลหะฝังใน, รอยร้าวขนาดเล็ก ฯลฯ) และโครงสร้างจุลภาคจะแสดงถึงคุณภาพของการอบชุบ และคุณสมบัติเชิงกล ฯลฯ การตรวจสอบโครงสร้างของจุลภาคทำได้โดย ตัดชิ้นงานขนาดพอเหมาะ $10 \times 10 \times 10 \text{ mm.}^3$ หรือ กว้าง 10-15 mm. สูง 15 mm. ถ้างานบางหรือขนาดเล็กมากต้องอัดพลาสติกหรือสารสังเคราะห์อื่นเพื่อให้มีขนาดพอเหมาะจับถือได้ง่าย หลังจากนั้นนำงานไปขัดด้วยกระดาษทรายหยาบ กระดาษทรายละเอียดและขัดมัน แล้วจึงนำไปกัดด้วยน้ำยาเพื่อแสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาค (ถ้าขัดด้วยอิเล็กทรอนิกส์จะได้ผลดีกว่าขัดด้วยมือ) หลังจากขัดมัน (ก่อนกัดน้ำยา) จะพบสารมลทินหรือวัสดุฝังในต่าง ๆ เช่น กราไฟท์ (ในเหล็กหล่อ) การกัดน้ำยาเพื่อให้โครงสร้างจุลภาคปรากฏขึ้นมาเรียกว่า Etching ซึ่งมีหลายชนิด แต่ละชนิดใช้กับโลหะต่างชนิดกัน เช่น เหล็กหล่อ และเหล็กกล้านิยมขัดด้วยน้ำยา Nital 2-5 % ($\text{HNO}_3 + \text{Alcohol}$) อลูมิเนียมผสมกัดด้วยสารละลายน้ำ + กรดไฮโดรฟลูออริก 0.5 % และสารละลายแอมโมเนียม (8 %) + CuCl_2 ถ้าโลหะบริสุทธิ์ หรือโลหะผสมประกอบด้วยเกรนเนื้อสม่ำเสมอ จะเห็นขอบเกรนเป็นเส้นสีดำบางลักษณะคล้ายตาข่าย ถ้ากัดด้วยน้ำยาที่เข้มข้นหรือใช้เวลานานกว่าปกติเรียกว่า Deep Etching จะได้โครงสร้างจุลภาคที่ดูกัดไม่เท่ากันจึงสามารถจำแนกเฟสต่าง ๆ ได้ชัดเจน โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า Eutectoid (0.8 % C) ซึ่งมี Cementite เป็นแผ่นและเม็ดกลม ขณะกัดน้ำยานั้นจะกัด Ferrite มากกว่ากัด Cementite (Fe_3C) เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์บริเวณที่มีน้ำยากัดออกไป จะทำให้แสงที่ตกกระทบสะท้อนกลับไม่เป็นระเบียบ และมีทิศทางแตกต่างจากเดิม จึงเห็นเป็นสีดำบริเวณที่น้ำยาไม่

กัดหรือกัดสว่านหมดตลอด (เนื้อสว่านเสมอ) แสงที่ตกกระทบจะสะท้อนกลับเป็นระเบียบจึงเห็นเป็นสีขาว ดังนั้นขอบระหว่าง Ferrite (กัดลึก) และ Cementite (ไม่กัดหรือกัดตื้น) จึงเห็นเป็นสีดำ (ขอบสีดำนั้นที่จริงเป็น Ferrite แต่แสงตกกระทบขอบ Cementite ซึ่งสูงกว่าจึงเกิดเงาบัง Ferrite ที่ใกล้กับขอบไว้และเห็นเป็นสีดำ)

2.3.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอน

เหล็กกล้าคาร์บอนมีโครงสร้างประกอบด้วย Ferrite, Pearlite, Cementite, Austenite (ตกค้าง) สเตไดท์ (Steadite) เมื่อนำไปอบจนถึงอุณหภูมิวิกฤติโครงสร้างดังกล่าว จะกลายเป็น Austenite เมื่อเย็นตัวลง Austenite จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างอื่นเช่น มาร์เทนไซต์ (Martensite), เบนไนท์ (Bainite) หรือ Pearlite ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว

2.3.2.1.เฟอร์ไรท์ (Ferrite) เป็นสารละลายของแข็งระหว่างเหล็กคาร์บอนโครงสร้างผลึกที่ตำแหน่ง $(0,0,\frac{1}{2})$ Ferrite ละลายคาร์บอนได้สูงที่สุด 0.025 % ที่อุณหภูมิวิกฤติ (723 °C) ที่อุณหภูมิห้องละลายได้ประมาณ 0.008 % และที่ศูนย์ (0) องศาละลายได้ประมาณ 0.0025 % ปริมาณ Ferrite ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนถ้าคาร์บอนต่ำจะมี Ferrite มาก ถ้าคาร์บอนสูงปริมาณ Ferrite จะลดลง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็น Ferrite เป็นเม็ดเกรนสีขาว (สว่าง) และขอบเกรนเป็นสีดำ ดังแสดงในภาพที่ 2.10



เฟอร์ไรท์ (Ferrite)

คุณสมบัติ

เหนียว, ยืดตัวดี

ความแข็ง 70 – 150 BHN

Elongation 40 %

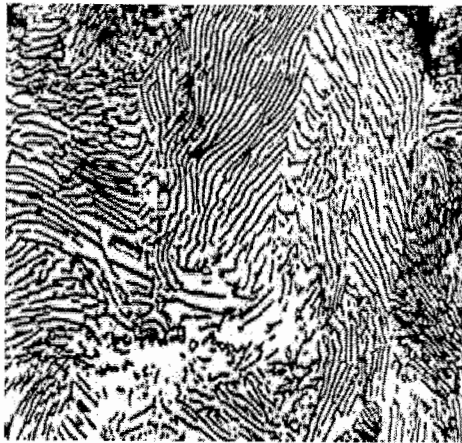
ความหนาแน่น 7.86 g / cm³

ความแข็งแรงดึง 40,000 – 50,000

ภาพที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคของเฟอร์ไรท์และตารางคุณสมบัติ

2.3.2.2 เพลิลไลท์ (Pearlite) เป็นโครงสร้างผสมระหว่าง Ferrite และ Cementite เกิดจากปฏิกิริยา Eutectoid ประกอบด้วย Ferrite เรียงสลับกับ Cementite มีทั้งชนิดแผ่น (Lamellar Pearlite) และชนิดกลม (Globular Pearlite) Pearlite เกิดขึ้นทั้งในเหล็ก และ โลหะนอกกลุ่มเหล็กบางชนิดเช่น Cu – 11.8 Al, Cu – 5.2 Si, Cu – 27 Sn, Zn – 47 Mg ฯลฯ เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำจะเห็น Pearlite เป็นเกรนสีดำ เมื่อใช้กำลังขยายสูงจะเห็น Pearlite

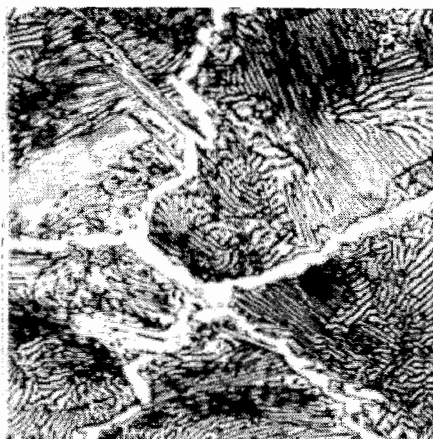
ประกอบด้วยเส้นสีดำสลับบนพื้นสีขาว Pearlite ปลายมีความแข็งประมาณ 170 BHN Pearlite ละเอียด มีความแข็งประมาณ 375 BHN ดังแสดงในภาพที่ 2.11



เพิลไลต์ (Pearlite)
คุณสมบัติ
เหนียวปานกลาง
ความแข็ง 175 - 370 BHN
Elongation 15 %
ความหนาแน่น 7.78 g / cm ³
ความแข็งแรงดึง 135,000–150,000 psi

ภาพที่ 2.11 โครงสร้างจุลภาคของ Pearlite และตารางคุณสมบัติ

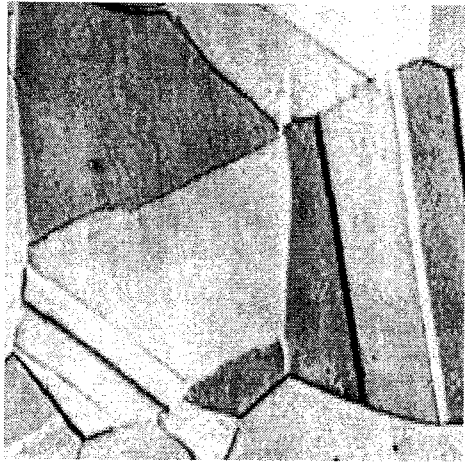
2.3.2.3 ซีเมนต์ไทท์ (Cementite) เป็นสารประกอบระหว่างเหล็กและคาร์บอน โดยมีปริมาณคาร์บอน 6.67 % บางทีเรียกว่าคาร์ไบด์หรือเหล็กคาร์ไบด์ ที่ถูกต้องควรเรียกว่า Cementite เพราะถ้าเรียกคาร์ไบด์ อาจเข้าใจไปผิดเป็นคาร์ไบด์ระหว่างโลหะอื่นกับคาร์บอนเพราะคาร์ไบด์มีหลายชนิดเช่น เหล็กคาร์ไบด์, ซิลิกอนคาร์ไบด์, โครเมียมคาร์ไบด์ เป็นต้น หรือถ้าเรียกเหล็กคาร์ไบด์ก็ยังไม่ถูกต้องนัก เพราะเหล็กคาร์ไบด์อาจหมายถึงเอฟซีลอนคาร์ไบด์ก็ได้ Cementite มีทั้งชนิดแผ่น, กลมและตาข่าย ถ้าเกิดร่วมกับ Ferrite จะกลายเป็น Pearlite ถ้าเกิดร่วมกับ Pearlite จะกลายเป็น เลเดบูไรท์ (Ledeburite) เฉพาะ Cementite มีความแข็งแรงดึงประมาณ 350,000 psi ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ซีเมนต์ไทท์ (Cementite)
คุณสมบัติ
แข็งมาก, เปราะ
ความแข็ง 800 – 1,100 BHN
ความหนาแน่น 7.66 g / cm ³
ความแข็งแรงดึง 350,000 psi

ภาพที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคของ Cementite และตารางคุณสมบัติ

2.3.2.4 ออสเทนไนท์ (Austenite) เป็นสารละลายของแข็งระหว่างเหล็ก – คาร์บอน มีโครงสร้างผลึกเป็น Fcc หนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอม 4 ตัว ละลายคาร์บอนได้สูงสุด 2 % ที่ 1,130 °C และที่อุณหภูมิต่ำ Austenite จะไม่เสถียรนอกจากในเหล็กกล้าผสมบางชนิด ดังแสดงในภาพที่ 2.13



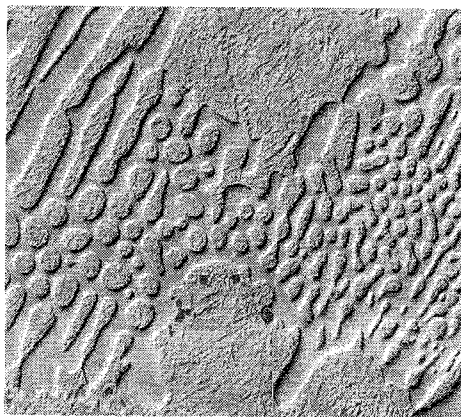
ออสเทนไนท์ (Austenite)

คุณสมบัติ

อ่อน แม่เหล็กดูดไม่ติด ปกติเสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติแต่ในเหล็กบางชนิดจะมี Austenite เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ
ความหนาแน่น 7.84 g / cm³ (0.9 %C)

ภาพที่ 2.13 โครงสร้างจุลภาคของ Austenite และตารางคุณสมบัติ

2.3.2.5 เลเดบูไรท์ (Ledeburite) คำว่า Ledeburite ในความหมายทั่วไปหมายถึง Ledeburite เปลี่ยนรูปหรือ Transformed Ledeburite ($p + Fe_3C$) ซึ่งเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้าง Ledeburite ที่อุณหภูมิ ตามปฏิกิริยา Eutectoid ดังแสดงในภาพที่ 2.14



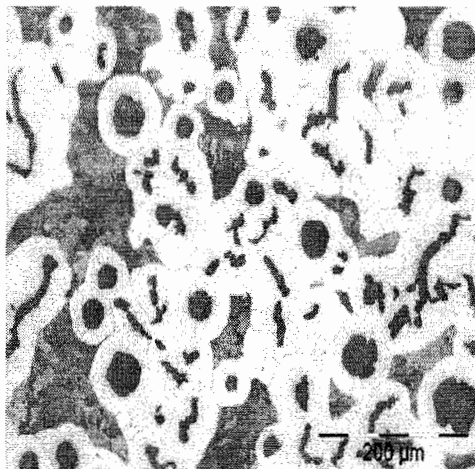
เลเดบูไรท์ (Ledeburite)

คุณสมบัติ

แข็ง, เปราะ

ภาพที่ 2.14 โครงสร้างจุลภาคของ Ledeburite และตารางคุณสมบัติ

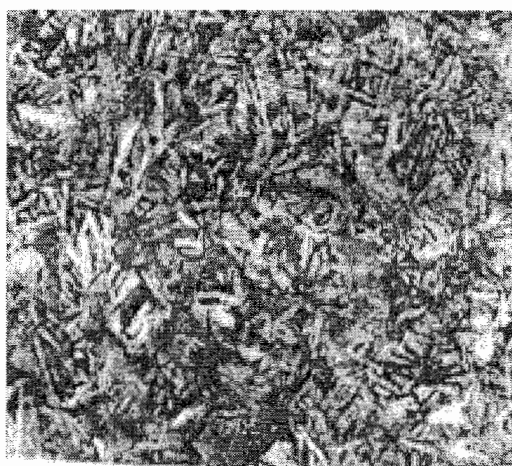
2.3.2.6 คาร์บอนอิสระหรือกราไฟท์ คาร์บอนโดยทั่วไปผสมอยู่ในเหล็กสองลักษณะ คือ รวมตัวกับเหล็กเป็น คาร์ไบด์ และแยกตัวเป็นอิสระฝังในเนื้อเหล็กเรียกว่า กราไฟท์ ซึ่งมีทั้งชนิดเกล็ด, กลุ่ม และกลม ดังแสดงในภาพที่ 2.15



<p>คาร์บอนอิสระหรือกราไฟท์</p> <p>คุณสมบัติ</p> <p>อ่อน, เปราะเป็นรูพรุน</p> <p>ความหนาแน่น 2.25 g/cm³</p>
--

ภาพที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของคาร์บอนอิสระหรือ กราไฟท์ และตารางคุณสมบัติ

2.3.2.7 เบนไนท์ (Bainite) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการชุบมี 2 ชนิด คือ Bainite บน (Upper Bainite) และ Bainite ล่าง (Lower Bainite) เดิมที่เรียก Bainite บนว่าซอร์ไบท์ (Sorbite) และ Bainite ล่างว่า โทรุสไทท์ (Troostite) มีลักษณะคล้าย Martensite มากต่างกันว่า เมื่อกักน้ำยาแล้ว ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็นสีดำ (Martensite เห็นเป็นสีน้ำตาลแก่) Bainite มีลักษณะคล้ายขนนก (Martensite ลักษณะคล้ายแท่งเข็ม) Bainite เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ Austenite ที่อุณหภูมิสูงกว่า M_s (Martensite Start) แต่ต่ำกว่าการเกิดอุณหภูมิการเกิด Pearlite แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสม และปริมาณคาร์บอนในเหล็กและที่สำคัญที่สุดคือ ความสำคัญของเวลา - อุณหภูมิ ระหว่างการเย็นตัวของ Austenite. Bainite เกิดขึ้นทั้งในเหล็ก และ โลหะนอกกลุ่มเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 2.16



<p>เบนไนท์ (Bainite)</p> <p>คุณสมบัติ</p> <p>เบนไนท์บนความแข็ง 400 BHN</p> <p>เบนไนท์ล่างความแข็ง 575 BHN</p>
--

ภาพที่ 2.16 โครงสร้างจุลภาคของ Bainite และตารางคุณสมบัติ

2.3.2.8 มาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของ Austenite (ชุบ) ปกติจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวคล้ายเข็มวางอยู่ไม่เป็นระเบียบทั่วเนื้อโลหะ Martensite ที่เกิดจากการชุบเรียกว่า มาร์เทนไซต์ขาว (White Martensite) เมื่อนำไปอบคืนไฟ (Temper) Martensite จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแก่ เรียกว่า เทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (temper Martensite) Martensite เกิดขึ้นโดยไม่เกิดการแพร่ (ของคาร์บอน) ดังนั้นการเกิด Martensite จึงขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว ไม่ได้ขึ้นอยู่กับเวลาดังเช่น Pearlite หรือ Bainite อุณหภูมิเริ่มเกิด Martensite เรียกว่า M_s (Martensite Start) อุณหภูมิที่เกิด Martensite สมบูรณ์ เรียกว่า M_f (Martensite Finish) อุณหภูมิ M_s และ M_f จะสูงหรือต่ำแค่ไหนขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี เหล็กบางชนิดมี M_s และ M_f ต่ำกว่า อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในภาพที่ 2.17



<p>มาร์เทนไซต์ (Martensite)</p> <p>คุณสมบัติ</p> <p>เปราะ</p> <p>ความแข็ง 650 BHN</p>
--

ภาพที่ 2.17 โครงสร้างจุลภาคของ Martensite และตารางคุณสมบัติ

2.3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Testing)

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical Properties) หมายถึงความสามารถในการรับแรง หรือภาระ (Load) ในลักษณะต่าง ๆ โดยสมบัติทางกลของวัสดุที่สำคัญได้แก่ ความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength)

ความแข็ง (Hardness) คือ ความต้านทานต่อการผิดรูปอย่างถาวรของวัสดุ วิธีการที่วัดความแข็งได้อย่างแม่นยำ ทำได้โดยอาศัยเครื่องวัดความแข็ง (Hardness Tester) โดยเครื่องวัดความแข็งจะมีตัวกด (Indenter) สำหรับกดลงบนพื้นผิววัสดุด้วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งจะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาดต่าง ๆ กันด้วย จากนั้นจะทำการวัดรอยบุ๋มนั้นเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความแข็งในแต่ละวิธีการวัดความแข็ง ซึ่งจะมีวิธีการคำนวณหาแตกต่างกันออกไป

2.3.4 การวัดความแข็ง (Hardness Testing)

ความแข็งเป็นความต้านทานต่อการผิดรูปอย่างถาวรของวัสดุ วัสดุที่มีความแข็งสูงก็มักจะมีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย ดังนั้นการวัดความแข็งเป็นวิธีที่สะดวก และประหยัดในการที่จะทราบค่าความแข็งแรงของวัสดุนั้น ๆ เทคนิคของการวัดค่าความแข็งแบ่งได้ 4 แบบ ได้แก่

2.3.4.1 การวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

2.3.4.2 การวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell and Superficial Rockwell)

2.3.4.3 การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส์ (Vickers Microhardness Test)

2.3.4.4 การวัดความแข็งแบบนูฟ (Knoop Microhardness Test)

โดยแต่ละวิธีมีหลักการที่เหมือนกันคือ เครื่องวัดความแข็งจะมีหัวกด (Indenter) ที่มีรูปร่างทรงกลมหรือ พีรามิดสำหรับกดลงบนพื้นผิววัสดุด้วยแรงขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกดขนาดต่าง ๆ กันด้วย จากนั้นจะทำการวัดขนาดรอยกดเพื่อนำมาคำนวณความแข็ง

1) การวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) ใช้สัญลักษณ์ HBN หรือ HB หัวกดที่ใช้จะเป็นเหล็กกล้าชุบแข็งทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. และมีความแข็ง 850 - 1500 HV จะสามารถวัดความแข็งของโลหะที่มีความแข็งไม่เกิน 300-650 HB แรงที่ใช้สามารถเลือกได้จาก 500, 1500 และ 3000 kgf ความแข็งตามบริเนลสามารถหาได้จาก

$$HB = \frac{\text{แรงทดสอบ}}{\text{พื้นที่ของรอยกด}} \quad (2.4)$$

ผิวงานที่จะทดสอบต้องเรียบปราศจากวัสดุหล่น, ออกไซด์ และเหมาะสมกับวัสดุที่อ่อนเหนียว ความหนาของชิ้นงานต้องมีขนาดอย่างน้อย 8 เท่า ของความหนาของรอยกด เวลาที่ใช้ในการทดสอบอยู่ระหว่าง 15-25 Sec. หลังจากนั้นจึงวัดขนาดของรอยกด และเทียบค่าความแข็งได้จากตารางเทียบความแข็ง

2) การวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test) ในการปฏิบัติการทางวัสดุศาสตร์นี้เราจะใช้การวัดความแข็งแบบ Rockwell หัวกดที่ใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ

(1) Diamond Cone 120° (เพชรทรงกรวย) ใช้กับโลหะแข็ง

(2) Steel Ball (เหล็กกล้าทรงกลม) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/16, 1/8, 1/4 หรือ 1/2 นิ้ว ใช้กับโลหะทั่วไป

ต้องเลือกหัวกด และ Load ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุ ระวังอย่าให้ชิ้นงานกระแทกกับหัวกด ในขณะที่นำชิ้นงานวางหรือเอาออกจากรอง และชิ้นงานที่จะนำมาวัดความแข็ง ต้องผ่านการขัดผิวหน้าด้วยผงขัดมันอย่างน้อย 6 μm และค้ำฐานต้องเรียบเสียก่อน

มีฉะนั้นชุดเครื่องมือ และหัวกดจะได้รับความสะดวกสบายได้ จุดวัดความแข็งไม่ควรอยู่ใกล้กันมากเกินไป

3) การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) จะใช้หัวกดเป็นเพชรรูปพีระมิด (Square-Based Diamond Pyramid) ที่มีมุม 136° ระหว่างด้านของหน้าเพชร (ภาพที่ 2.18) แรงที่ใช้กดต่างๆ ไปจะนิยมเลือกใช้ระหว่าง 2-1000 N. ทั้งนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาทดสอบค่าความแข็ง จะหาได้จากอัตราส่วนของแรงที่ใช้ในการกดต่อพื้นที่ของขนาดรอยกดมีหน่วยเป็น mm^2 โดยหาได้จากเส้นทแยงมุมของรอยกดแล้วแทนค่าสูตร ดังต่อไปนี้

$$\text{HV} = \frac{1.854 F}{d^2} \quad \text{มีหน่วยเป็น N/mm}^2 \quad (2.5)$$

โดย $F =$ แรงกด (N)

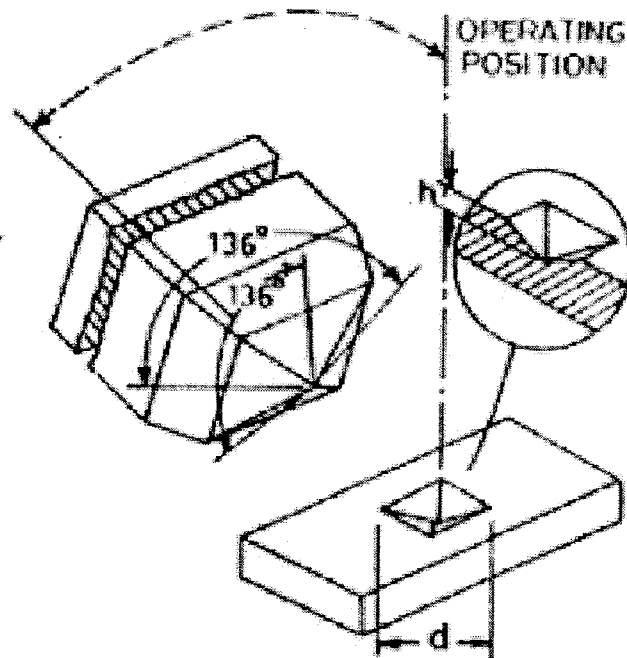
$d =$ ความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยกด (mm.)

ผิวชิ้นทดสอบจะต้องเรียบปราศจากออกไซด์ และวัสดุชนิดอื่นๆเช่น สารหล่อลื่นทุกชนิดความหนาของชิ้นทดสอบ จะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาดำสุด เท่ากับ 1.5 เท่า ของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด d ตามเกณฑ์จะทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง 10°C หรือ 35°C ระยะห่างระหว่างรอยกด ให้ถือเกณฑ์ ดังนี้

(1) เหล็กกล้า ทองแดง และทองเหลือง อย่างน้อยที่สุด 3 เท่า ของความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

(2) โลหะเบา เช่น ดีบุก ตะกั่ว อย่างน้อยที่สุด 6 เท่า ของความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

2.3.4.4 Micro-Vickers Hardness Testing (Multitoyo Model:MVK-H3) เป็นการวัดความแข็งในระดับจุลภาค รอยกด และการวัดค่าความแข็งจะมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ มีบริเวณที่จะวัดความแข็งน้อยเช่น เกรนของเหล็กเป็นต้น และจะต้องมีการเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานให้เรียบหน่วยที่ใช้วัด คือ Vickers (HV) หรือ Diamond Pyramid Hardness เนื่องจากหัวกดเป็นเพชรรูปพีระมิด ทำมุม 136° ใช้ Load ตั้งแต่ 2-1000 N โดยใช้เวลาในการกด 10-15 วินาที และรอยกดจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 รูปหัวเพชร และรอยกด

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็ง

$$HV = \frac{\text{แรงกดทดสอบ (F)}}{\text{พื้นที่รอยกดบนผิวทดสอบ (S)}} \quad (2.6)$$

$$\text{พื้นที่ผิวรอยกดรูปปิระมิด } S = \frac{d^2 \sin(\alpha/2)}{2}$$

เมื่อ 0.102 คือ ค่าคงที่ ที่คูณเข้าเพื่อการเปลี่ยนหน่วยจาก kg/mm^2 เป็น N/mm^2

ดังนั้น

$$HV = \frac{0.102 \times 2 F \sin(136^\circ/2)}{d^2} \quad (2.7)$$

$$= \frac{0.1891 F}{d^2} \quad \text{N/mm}^2$$

เมื่อ $F =$ แรงกด (N)

$d =$ ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของรอยกด (mm) $= (d_1 + d_2) / 2$

เนื่องจากรอยกดบนผิวชิ้นทดสอบมีขนาดเล็กมาก จึงต้องให้ผิวชิ้นทดสอบผิวเรียบ ปราศจากออกไซด์ หรือผ่านการกัดกรดมาก่อน เพื่อที่จะได้เห็นโครงสร้างจุลภาค และสามารถเลือกกดบนโครงสร้างที่ต้องการได้ ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาต่ำสุด เท่ากับ 1.5 เท่า ของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด (d) อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง $10^\circ - 35^\circ \text{C}$ ระยะห่างระหว่างรอยกดให้ถือตามเกณฑ์ ดังนี้

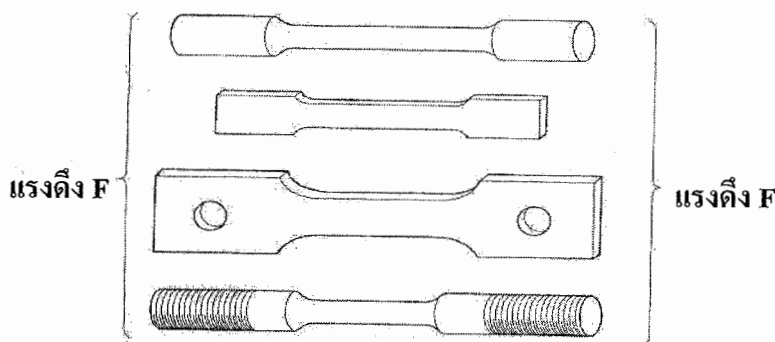
1) เหล็กกล้า ทองเหลือง และทองแดง ห่างอย่างน้อยที่สุด 3 เท่า ของค่าความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

2) โลหะเบา เช่น ดีบุก ตะกั่ว ห่างอย่างน้อยที่สุด 6 เท่าของค่าความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

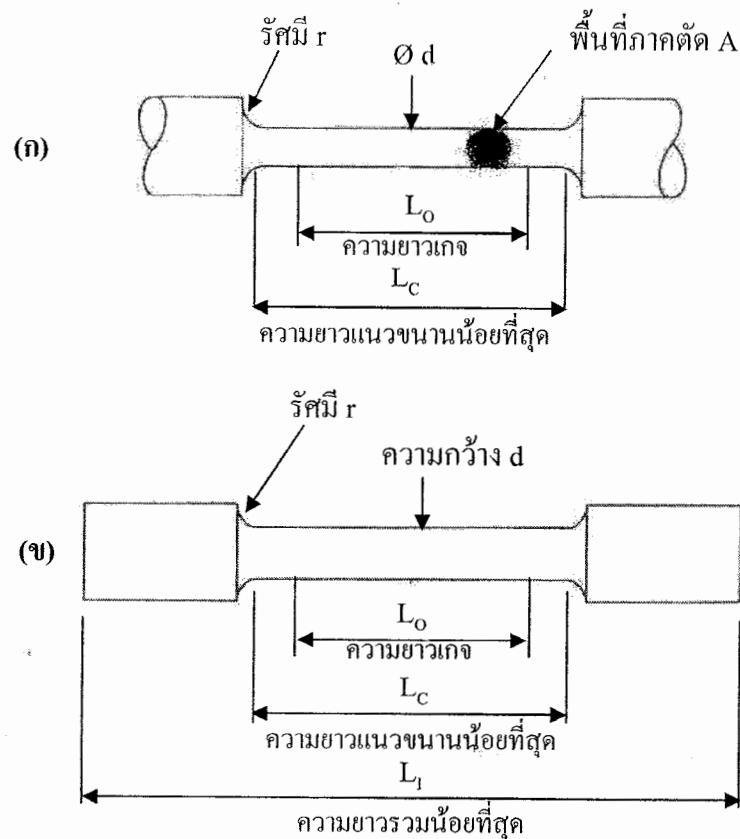
การติดตั้งกล้องจะต้องมั่นคง ไม่สั่นสะเทือน เพราะจะส่งผลให้ค่ารอยกดที่ได้คลาดเคลื่อน การให้แรงกดจะต้องสม่ำเสมอให้เวลากดแฉบนผิวงานเท่ากัน เมื่อต้องการเปรียบเทียบค่าขยาย และมีแสงสว่างให้เพียงพอในการวัดขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด

2.3.5 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการวัดความต้านทานของวัสดุ โดยการให้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (Static Load) จนกระทั่งวัสดุขาดจากกัน ชิ้นงานทดสอบมีหลายลักษณะ ดังแสดงในภาพที่ 2.19 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องทดสอบ หัวจับชิ้นงานทดสอบ และขนาดของแรงที่ใช้ดึง แต่โดยทั่วไปแล้วชิ้นทดสอบมักจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม



ภาพที่ 2.19 ลักษณะต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบแรงดึง [19]



ภาพที่ 2.20 สัดส่วนของชิ้นงานทดสอบแรงดึง (ก) กรณีชิ้นงานพื้นที่หน้าตัดกลม (ข) กรณีชิ้นงานพื้นที่หน้าตัดแบน [19]

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะมีการกำหนดขนาดต่าง ๆ ไว้เป็นมาตรฐาน ไม่ว่าจะเป็นเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความยาวของชิ้นงานทดสอบ และรัศมีความโค้งของบริเวณบ่าถือ เพื่อจับดึง ขนาดของชิ้นทดสอบแสดงในภาพที่ 2.20 โดยชิ้นทดสอบที่มีพื้นที่หน้าตัดกลม จะมีส่วนของความยาวเกจ (Gage Length; L_0) ต่อพื้นที่หน้าตัด (A) เป็นค่าความสัมพันธ์ที่คงที่ที่เรียกสัดส่วนนี้ว่า สัดส่วนของชิ้นทดสอบ โดยมีความสัมพันธ์กัน ดังสมการที่ 2.8

$$L_0 = 5.658 \sqrt{A} \quad (2.8)$$

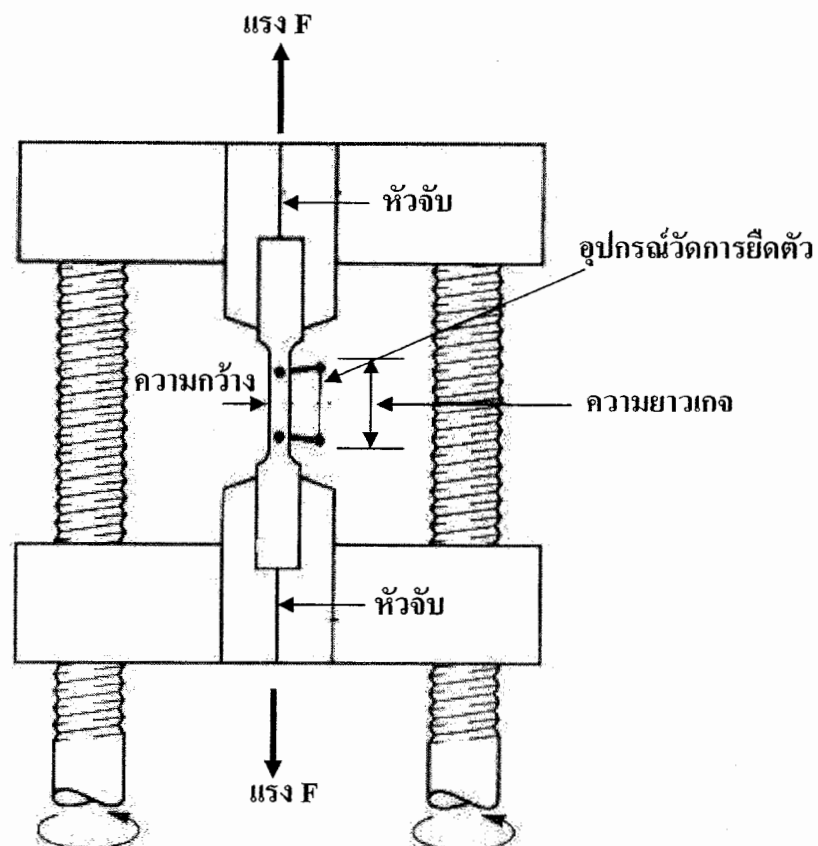
ซึ่ง

$$A = \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right)$$

$$\sqrt{A} = 0.886 d$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad L_0 &= 5.658 \times 0.886 d = 5.013 d \\ &= 5 d \text{ (โดยประมาณ)} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ดังนั้นหากชิ้นทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm. ความยาวเกจจะเท่ากับ 25 mm. ตามลำดับ ในภาพที่ 2.20 ช่วงความยาวเกจ (L_0) คือ ความยาวของชิ้นงานทดสอบที่จะใช้วัดการยืดตัวของชิ้นทดสอบ ส่วนความยาวแนวนานต่ำสุด (L_C) คือ ความยาวต่ำสุดที่ชิ้นทดสอบ ควรจะมีพื้นที่ภาคตัดที่คงที่ตลอดทุกส่วนก่อนที่จะทำการทดสอบค่าของความยาว L_0 , L_C , L_1 และพื้นที่หน้าตัด A จะถูกกำหนดโดยมาตรฐานแต่ละประเทศ สำหรับเครื่องทดสอบจะมีหลายแบบและหลายขนาด แต่จะมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 อุปกรณ์และการติดตั้งชิ้นทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึง [19]

2.4 ทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นมีมากมาย ทั้งการเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกัน วัสดุต่างชนิดกัน วัสดุต่างขนาดกันและวัสดุขนาดเดียวกัน เป็นต้น โดยงานวิจัยมีวิธีการศึกษาแตกต่างกันไป ซึ่งที่ผ่านมาก็มีตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยความเสียดทานเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัย ดังนี้

Sahin and Akata [1] ได้ทำการศึกษารายการเชื่อมเหล็กเพลลาขาวที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.17 – 0.23 % โดยใช้วัสดุที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันและต่างขนาดกัน จากการศึกษาพบว่าการใช้แรงดันเสียดทาน 30 MPa และเวลาเสียดทาน 5 Sec. มีผลทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากที่สุด

Sahin (a) [2] ยังได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ Austenitic–Stainless steels (AISI304) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. จากการศึกษาพบว่าการใช้แรงดันเสียดทานที่ 60 MPa และเวลาเสียดทานที่ 9 sec. ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากที่สุด และค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมมีค่าลดลง

Ates and et al. [3] ได้ทำการศึกษาในส่วนของแรงดันในการเสียดทานของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยใช้โลหะซูเปอร์อัลลอยด์ ชนิด MA956 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 mm. เป็นวัสดุในการศึกษาวิจัย พบว่าแรงดันในการเสียดทานที่ 50-100 MPa เป็นตัวแปรที่เหมาะสมในการเสียดทาน

Ozdemir and et al. [4] ได้ทำการศึกษาความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงานเชื่อมที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของรอยเชื่อม และความแข็งแรงของชิ้นงาน ด้วยวิธีการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน ระหว่างเหล็กเบอร์ AISI 304L และเหล็กเบอร์ AISI 4340 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 mm. จากการศึกษาพบว่าการใช้ความเร็วรอบ 1500 rpm มีผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยที่สุด และค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมต่อมีค่ามากขึ้นกว่าเดิม

Sathiya and et al. [5] ได้ทำการศึกษาทดลองเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันระหว่างเหล็กสแตนเลสชนิด AISI 304L และชนิด AISI 430 ด้วยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน พบว่าชิ้นงานเชื่อมมีค่าความแข็งแรงโดยเฉลี่ยต่ำกว่าชิ้นเดิมโดยได้ความแข็งแรงประมาณ 95.52 % ของความแข็งแรง

Hascalik and Orhan [6] ได้ศึกษาในกรณีของอัลลอยด์ที่มีทดลองผสม Al_2O_3 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันและผสมกับอลูมิเนียมอัลลอยด์เบอร์ 6160 จากนั้นนำมาเชื่อมกับเหล็ก AISI 1020 ด้วยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยกำหนดตัวแปรในการเชื่อมคือ แรงดันในการเสียดทาน 10 Mpa เวลาในการเสียดทาน 8 Sec. แรงดันในการเชื่อม 5 Mpa เวลาในการเชื่อม 4 Sec. และความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานที่ 2,500 rpm ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าบริเวณรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันนี้ทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

K. Jayabharath and et al. [7] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างของวัสดุ Sintered ที่เชื่อมต่อกันกับทองแดง (Cu) ขึ้นรูป ด้วยการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ซึ่งทดลองด้วยการปรับค่าของตัวแปร 2 ตัวแปรคือ แรงดันในการเสียดทาน และแรงดันในการเชื่อม แล้วมาวิเคราะห์หาค่าความแข็งของแนวเชื่อมต่อ และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเหล็กพบว่าบริเวณแนวเชื่อมต่อมีความแข็งมากขึ้นและเกิดโครงสร้างจุลภาคใหม่

Meshram and et al. [8] ได้ทำการศึกษาชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานกับวัสดุต่างชนิดต่างกัน โดยทำการทดลองเชื่อมเหล็ก (Fe), ไททาเนียม (Ti), ทองแดง (Cu) และนิกเกิล (Ni) ด้วยวิธีการเชื่อมสลักวัสดุที่แตกต่างกัน พบว่าวัสดุที่ต่างกันเมื่อนำมาเชื่อมด้วยความเสียดทานก็จะได้รอยเชื่อมที่มีโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่แตกต่างกันไป

Ma and et al. [9] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ส่วนที่บานออกจากรอยเชื่อม และทดสอบแรงกระทำของอัลลอยด์ที่มีส่วนประกอบของ Ti – 6Al – 4V ที่เชื่อมด้วยวิธีการเสียดทานด้วยการสันเชิงเส้น (Linear friction welding (LFW)) จากการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่รอยเชื่อม และเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงที่รอยเชื่อมได้ซึมขยายเข้าสู่ส่วนของพื้นที่รอบข้างของรอยเชื่อม มีผลทำให้รอยเชื่อมมีค่าทดสอบแรงกระทำต่ำกว่าชิ้นงานเดิม

Noh and et al, [10] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.30 % เชื่อมต่อกับเซรามิกกลุ่มชนิด Alumina ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. โดยใช้ความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงานเชื่อมต่ำ (900 rpm) จากการศึกษาด้วยวิธีการนำ Alumina มาเชื่อมต่อกับ Aluminum ที่มีขนาดเท่ากัน ด้วยการกำหนดตัวแปรเวลาในการเสียดทานเป็น 8 ช่วงคือ 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 Sec. และกำหนดตัวแปรอื่นๆ เป็นตัวแปรคงที่คือ แรงดันในการเสียดทานที่ 20 MPa และแรงดันในการอัดที่ 40 MPa จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมที่เวลาในการเสียดทานต่างๆ มาเชื่อมต่อการเหล็ก ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าสามารถเชื่อมต่อกันได้ดี และจากการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคพบว่ารอยเชื่อมหลอมผสมผสานได้และมีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม 240 MPa

Shin and et al. [11] ได้ทำการศึกษาชิ้นงานด้วยการส่องวิเคราะห์การต่อเซอร์โคเนียม (Zr) ผสมด้วยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปทรงที่มีการเปลี่ยนแปลงของบริเวณที่ทำการเชื่อมโดยการใช้อินฟราเรด (Infrared) วิเคราะห์โครงสร้างของชิ้นงาน โดยมีแรงดันและเวลาในการเสียดทานเป็นตัวแปร และพบว่าปริมาณส่วนที่ยื่นออกมาด้านข้างของชิ้นงานระหว่างเชื่อม นั้น มีความสัมพันธ์กันกับแรงดันและเวลาการเสียดทานและลักษณะโครงสร้างเหมือนการตกผลึก

Uwada and et al. [12] ได้ทำการศึกษาชิ้นงานด้วยการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของ Oxide-Dispersion-Strengthened-Steel (ODS) ที่เชื่อมต่อกับวัสดุที่มีเกรน Ferritic-Martensitic-Steel (PNC-FMS) ด้วยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน พบว่าช่วงเวลาการหล่อเย็นของชิ้นงานเชื่อมที่ช่วงเวลาแตกต่างกันส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของชิ้นงานเชื่อมที่บริเวณรอยเชื่อมต่อ

Sahin (b) [13] ได้ทำการศึกษาลักษณะคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงผสมผสานของรอยเชื่อมของเหล็กแอสตนเลสเกรด AISI 304 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน จากการทดลองด้วยวิธีการนำชิ้นงานเชื่อมที่มีขนาดหน้าตัดที่ต่างกัน และใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติในส่วนของแรงดันในการเสียดทาน และเวลาในการเสียดทาน พบว่าแรงดันในการเสียดทานที่ 60 MPa และเวลาในการเสียดทานที่ 9 Sec. เป็นค่าที่เหมาะสมในการทดลอง และจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเชื่อมทั้งสองด้าน พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานเชื่อมต่างขนาดกันมีโครงสร้างจุลภาคในแต่ละด้านแตกต่างกัน

Luo and et al, [14] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมด้วยความเสียดทานของท่อเหล็กคาร์บอนต่ำชนิด Q 235 ที่เชื่อมต่อกับเป้าหุ้ยัดที่มีหน้าตัดเชื่อมแตกต่างกัน โดยทำการศึกษารูปแบบของหน้าตัดท่อส่วนที่เสียดสีกันในแบบต่างๆ และศึกษาส่วนที่บานออกจากรอยเชื่อม จากการศึกษาพบว่าสามารถเชื่อมต่อกันได้ดีในทุกแบบของหน้าตัดท่อที่ทำการทดลอง และจากการศึกษาลักษณะการบานของเศษที่บานออกจากรอยเชื่อมพบว่าลักษณะการบานของเศษวัสดุที่หลอมจากการเสียดสีที่หน้าสัมผัสบานเข้าด้านในท่อเป็นส่วนมากในทุกแบบการทดลอง

Li and et al. [15] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมด้วยวิธีการเสียดทานด้วยการสั้นเชิงเส้น (Linear friction welding (LFW)) ที่มีผลต่อชิ้นงานเชื่อมที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยม พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฟสของโครงสร้างจุลภาคในแต่ละส่วนของแนวเชื่อมต่อไม่เหมือนกัน

Karadge and et al. [16] ได้ทำการศึกษาเนื้อของวัสดุและโครงสร้างของ Ti-6AL-4V ที่เชื่อมด้วยความเสียดทานแบบการสั้นเชิงเส้น (LFW) โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุที่ใช้เชื่อมในระดับมหภาคและจุลภาค ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นต่อชิ้นงานเชื่อมด้วย

Balasubramanian [17] ได้ทำการศึกษาความเร็วรอบและความเร็วในการเคลื่อนของ หัวหมุนเชื่อมที่เชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแบบ Friction Stir Welding โดยการทดลองเชื่อมชิ้นงานด้วยการเปรียบเทียบการเชื่อมอลูมิเนียมอัลลอยด์ชนิดเบอร์ AA 1050, AA 6061, AA 2024, AA7039 และ AA 7075 พบว่าต้องใช้ความเร็วรอบในการหมุนและเวลาในการเคลื่อนที่เชื่อมแตกต่างกัน เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่สมบูรณ์

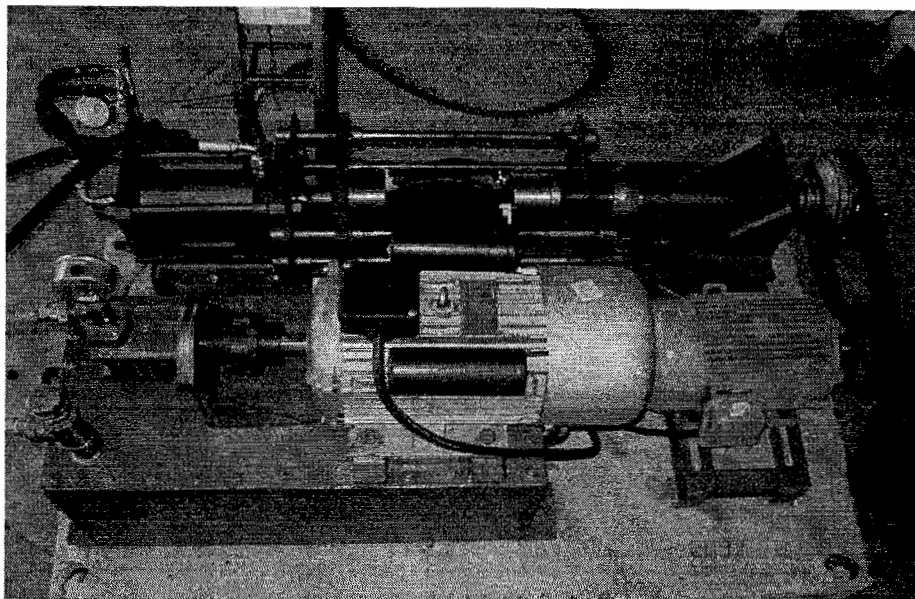
บทที่ 3

การออกแบบและพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่สร้างขึ้นโดยนายวิระยุทธ นนท์ชนะ และนายอำนาจ บุญะวัน [20] นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งได้ทำการออกแบบ และสร้างเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานไว้ในเบื้องต้น โดยเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่สร้างไว้นี้สามารถทำการเชื่อมต่อชิ้นงานได้ด้วยวิธีการ ควบคุมแรงดันในกระบวนการเชื่อมด้วยมือ และไม่สามารถทราบได้ถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเชื่อมด้วยวิธีการนี้ จึงเป็นที่มาของการศึกษา และพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน เพื่อให้ได้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่มีประสิทธิภาพดี และสามารถปรับค่าตัวแปรต่างๆ ที่จะมีผลต่อชิ้นงานเชื่อม โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

3.1 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานก่อนการพัฒนา

เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ ได้ถูกสร้างขึ้นตามแนวคิดที่แสดงในบทที่ 2 โดยมีมอเตอร์ขนาด 3 Hp เป็นต้นกำลังในการหมุนชิ้นงาน และใช้ระบบไฮดรอลิกส์ในการสร้างแรงดันอัดชิ้นงานเพื่อเชื่อม เครื่องเชื่อมนี้ทำงานโดยใช้ระบบ Monoblock Valve ควบคุมแรงดันไฮดรอลิกส์ในช่วงต่างๆ ในส่วนของการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อม นั้นใช้ Inverter ขนาด 3 Hp ในการควบคุมความเร็วรอบการทำงาน โครงสร้างทั้งหมดของเครื่องเชื่อมสร้างบนฐานคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ ก่อนการพัฒนา [20]

3.1.1 อุปกรณ์และคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ

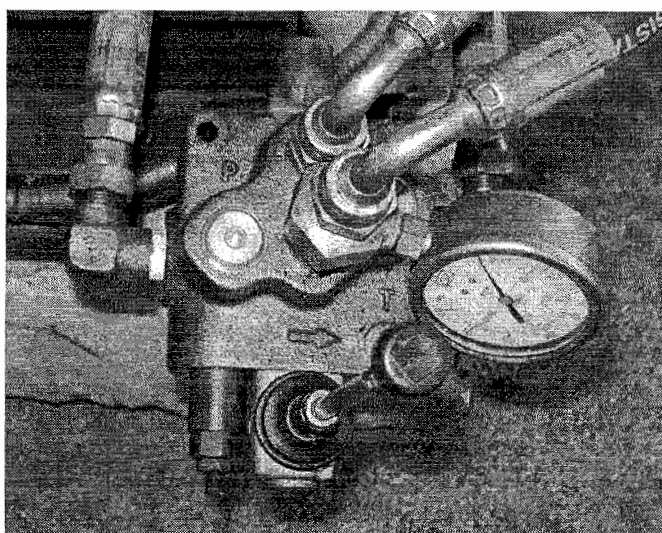
การที่เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานจะสามารถทำการเชื่อมต่อนั้น ต้องอาศัยหลักการทำงานในส่วนต่างๆ ประกอบเข้าด้วยกัน เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบก็เช่นกันต้องอาศัยอุปกรณ์หลักการต่างๆ ประกอบเพื่อเชื่อมต่อนั้น ซึ่งมีอุปกรณ์และคุณสมบัติ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ

รายการ	อุปกรณ์/คุณสมบัติ
1. มอเตอร์ปั๊มไฮดรอลิกส์	220 V / 3 Hp
2. มอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	380 V / 3 Hp
3. ระบบวาล์วควบคุมไฮดรอลิกส์	Monoblock Valve
4. ครอบไฮดรอลิกส์	Ø 4 inches
5. แรงดันปั๊มไฮดรอลิกส์	100 Bar
6. ระบบควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	Inverter 3 Hp

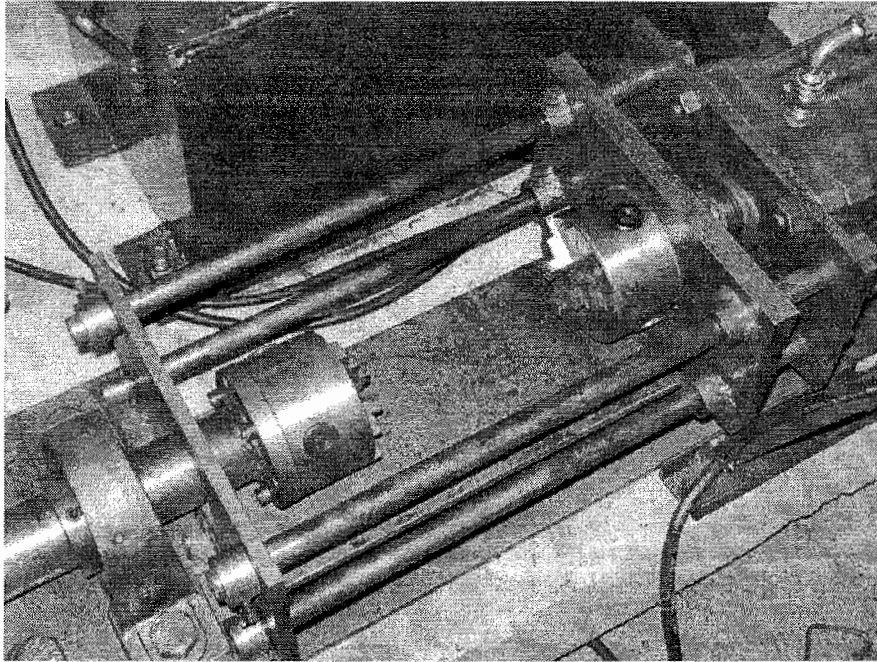
3.1.2 ข้อดีของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ

แม้ว่าเครื่องเชื่อมต้นแบบจะสามารถทำงานได้จริง แต่เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ มีข้อดีหลักๆ คือ ไม่สามารถปรับตั้งหรือควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมได้ เช่น ค่าแรงดันในการอัดของกระบอกไฮดรอลิกส์ได้ ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยวิธีการนี้ เนื่องจากเดิมนั้นเครื่องเชื่อมใช้ Monoblock Valve เป็นอุปกรณ์ที่ในการควบคุมการเคลื่อนที่ไป-กลับของกระบอกไฮดรอลิกส์ ซึ่งควบคุมการเคลื่อนที่ของกระบอกด้วยคันโยกมือ เป็นผลให้ไม่สามารถควบคุมแรงดันของกระบอกให้มีความสม่ำเสมอได้ จึงไม่สามารถทราบได้ถึงตัวแปรของแรงดันในการเสียดทาน และการอัดได้ ดังภาพที่ 3.2

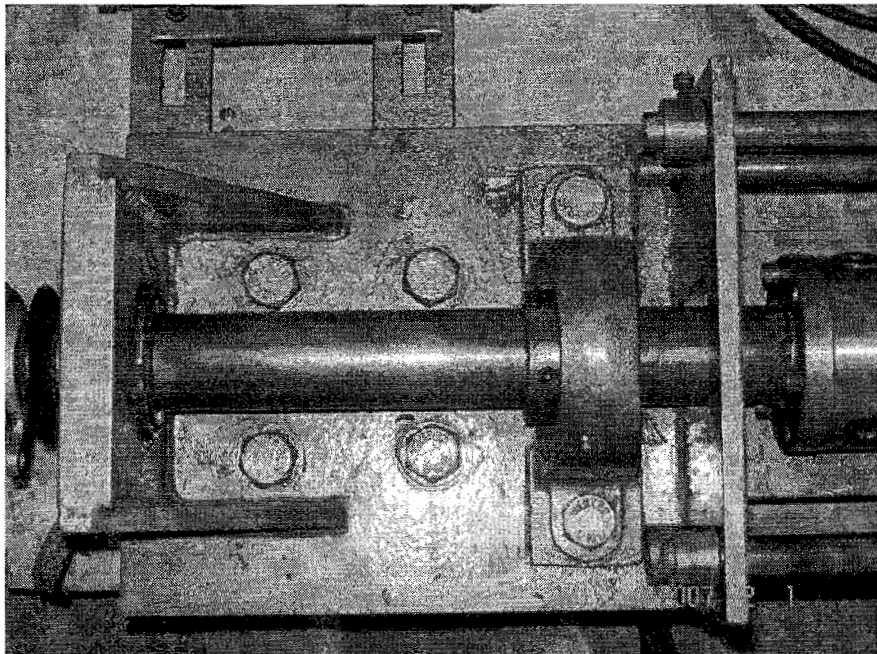


ภาพที่ 3.2 Monoblock Valve ควบคุมการเคลื่อนที่ของกระบอกไฮดรอลิกส์ ชนิดไป – กลับ

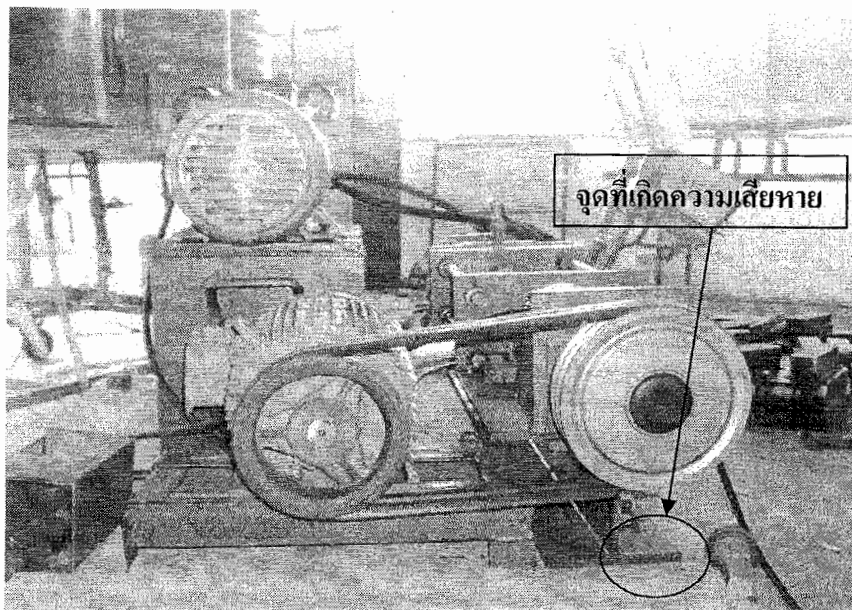
ในส่วนของมอเตอร์ที่ใช้ในการหมุนชิ้นงานเชื่อมนั้นพบว่ามีกำลังต่ำเกินไป และเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ ไม่สามารถควบคุมเวลาในการเสียดสีชิ้นงาน (Friction Time) เพื่อให้เกิดความร้อน และเวลาในการอัดชิ้นงาน (Upset Time) เพื่อการเชื่อมต่อได้ ในส่วนของโครงสร้างพบว่าแผ่นเหล็กที่ใช้ยึดเพลลาประกอบ และเพลลาประกอบมีขนาดเล็กเกินไป ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ทำให้ขณะเชื่อมชิ้นงานโครงสร้างเกิดการสั่น และเสถียรน้อยทำให้แนวเชื่อมต่อไม่ตรงกัน ซึ่งการที่เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ เมื่อทำการเชื่อมแล้วเกิดอาการสั่นและเสถียรน้อย ซึ่งเกิดจากการใช้เรือนลูกปืน (Housings Bearing) ขนาด 2 inches เพียงตัวเดียว ดังแสดงในภาพที่ 3.4 นอกจากนี้การที่โครงสร้างเกิดการสั่นยังส่งผลเสียต่อโครงสร้างที่ยึดฐานของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.3 แผ่นเหล็กที่ใช้ยึดเฟลาประคอง และเฟลาประคอง



ภาพที่ 3.4 เรือนลูกปืน (Housings Bearing) ขนาด 2 inches



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างที่ยึดติดกับแท่นคอนกรีต

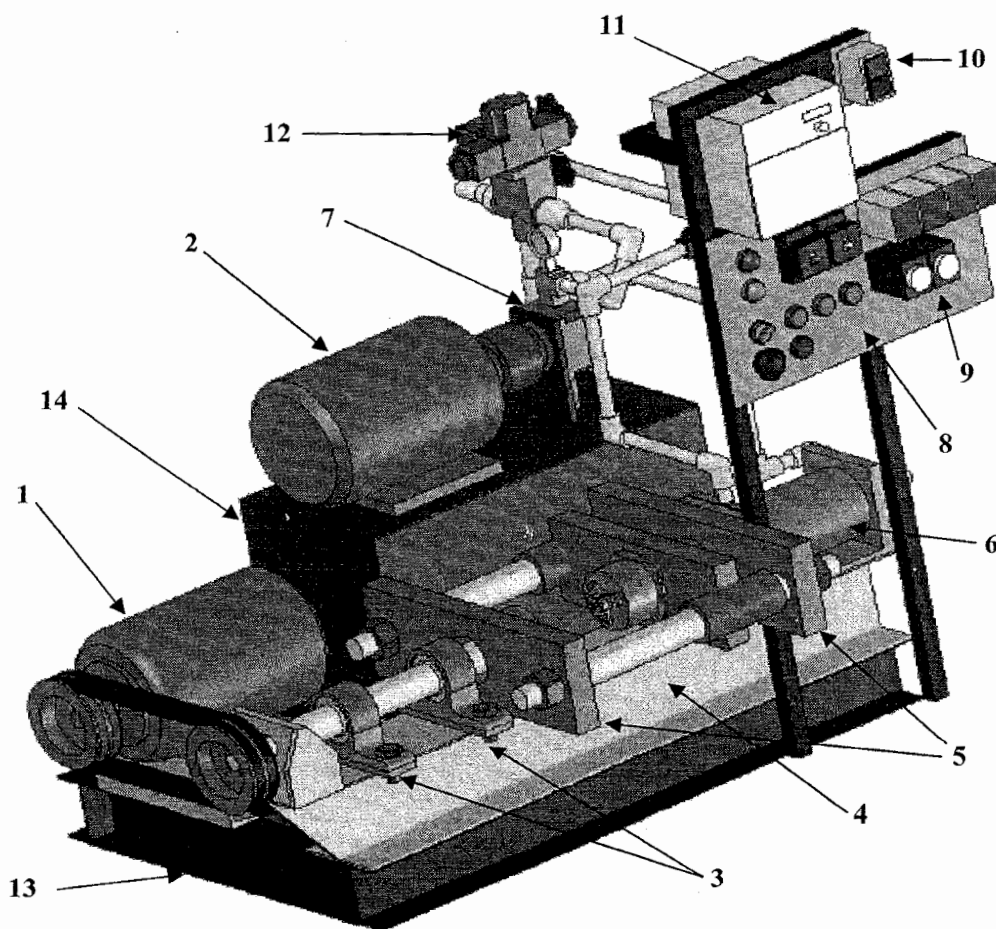
3.2 การพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

จากปัญหาที่พบในเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ จึงได้ทำการออกแบบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานใหม่โดยมีพื้นฐานมาจากเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ เพื่อเป็นการพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบให้มีประสิทธิภาพ เป็นไปตามเงื่อนไขของขอบเขตงานวิจัยที่กำหนดไว้ และเพื่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคต โดยกำหนดให้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาแล้วต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

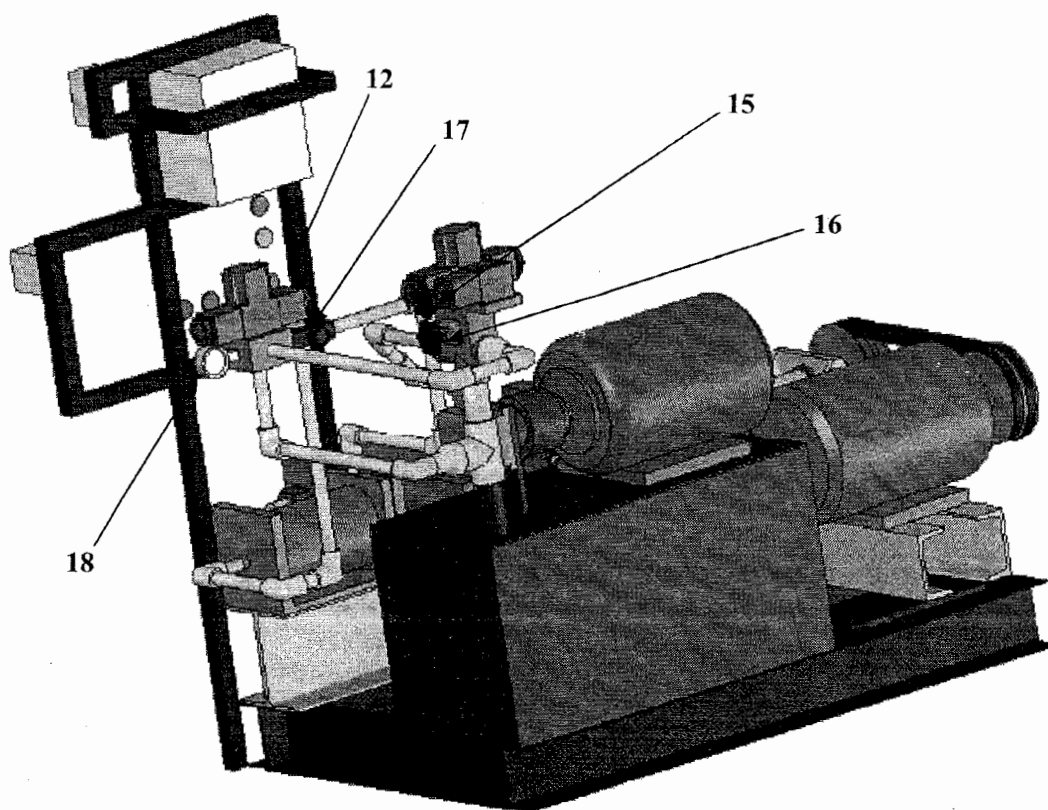
- (1) สามารถเชื่อมชิ้นงานให้ติดกันได้
- (2) สามารถควบคุมเวลาในการเสียดทาน และเวลาในการอัดได้
- (3) สามารถควบคุมแรงดันในการเสียดทาน และแรงดันในการอัดได้
- (4) สามารถควบคุมความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงานได้
- (5) สามารถควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกนของชิ้นงานได้
- (6) การเชื่อมชิ้นงานต้องสามารถทำงานได้เสร็จสิ้นในขบวนการเดียว
- (7) โครงสร้างของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบต้องมีความแข็งแรงขณะที่เครื่องทำงานต้องไม่มีการสั่น และแนวเชื่อมต่อชิ้นงานต้องเป็นแนวเดียวกัน

3.2.1 การออกแบบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาแล้ว

จากข้อกำหนดในการพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงได้ทำการออกแบบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานใหม่ โดยมีโครงสร้างและส่วนประกอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.6 – 3.7 และมีรายละเอียดของอุปกรณ์ใหม่ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ส่วนภาพที่ 3.8 แสดงภาพเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาแล้ว



ภาพที่ 3.6 ภาพมุมมองด้านหน้าเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานใหม่ที่พัฒนามาจากเครื่องต้นแบบ



ภาพที่ 3.7 ภาพมุมมองด้านหลังเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานใหม่ที่พัฒนามาจากเครื่องต้นแบบ
ตารางที่ 3.2 รายการอุปกรณ์ต่างๆของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาแล้ว

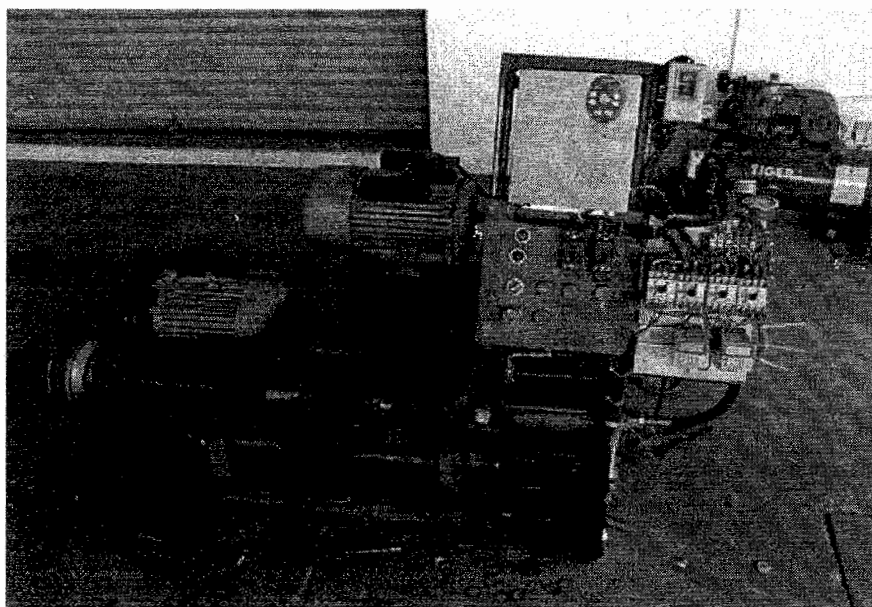
หมายเลข	อุปกรณ์
1	มอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม AC 380 V / 5 Hp
2	มอเตอร์ปั๊มไฮดรอลิกส์ AC 220 V / 3 Hp
3	เรือนลูกปืน (Housings Bearing) ขนาด 2 inches
4	เพลลาประคองขนาด 2 inches
5	แผ่นเหล็กที่ใช้ยึดเพลลาประคองหนา 40 mm.
6	กระบอกไฮดรอลิกส์ Ø 4 inches
7	ปั๊มไฮดรอลิกส์ขนาดแรงดัน 100 Bar
8	แผงควบคุมการทำงานของเครื่อง
9	อุปกรณ์ควบคุมเวลาในการทำงาน (Timer)
10	สวิตช์หลักในการเปิด - ปิด

ตารางที่ 3.2 รายการอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาแล้ว (ต่อ)

หมายเลข	อุปกรณ์
11	เครื่องควบคุมการหมุนของมอเตอร์ (Inverter 7.5 Hp)
12	ระบบวาล์วควบคุมการ เปิด-ปิด ไฮดรอลิกส์ (Electric Solenoid Valve AC 220 V.)
13	โครงแทนเครื่องเหล็ก C 100 X 50 X 4 mm ³ .
14	ถังน้ำมัน ไฮดรอลิกส์
15	วาล์วควบคุมแรงดันไฮดรอลิกส์ช่วงการเสียดทาน (Manual Relief Valve)
16	วาล์วควบคุมแรงดันไฮดรอลิกส์ช่วงการอัด (Manual Relief Valve)
17	วาล์วควบคุมความเร็วของกระบอกไฮดรอลิกส์ (Manual Flow Control Valve)
18	เกอวัดแรงดัน

3.2.2 อุปกรณ์ที่ติดตั้งในเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานหลังการพัฒนา

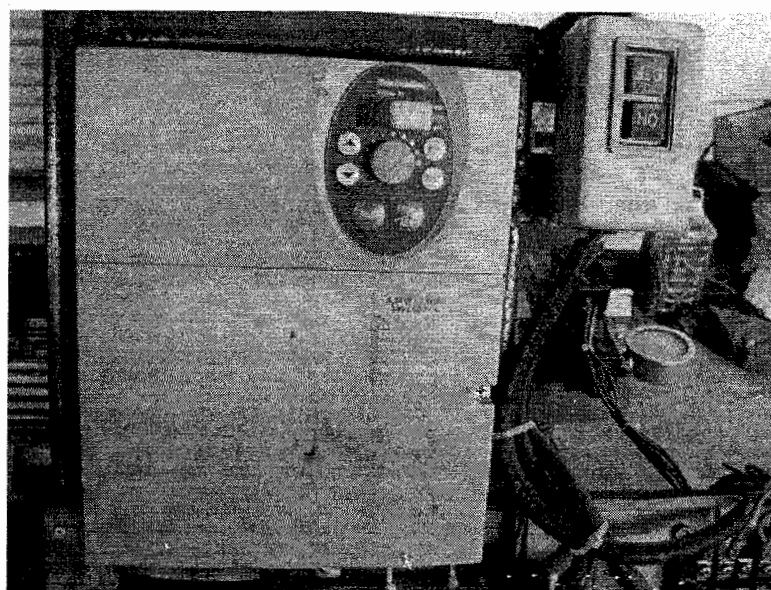
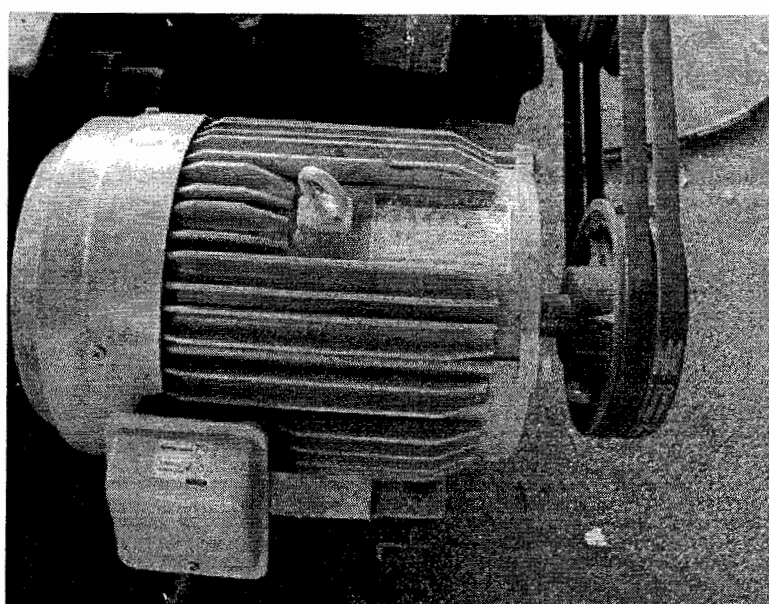
เพื่อให้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ได้รับการพัฒนาแล้ว มีประสิทธิภาพตามความต้องการ จึงต้องทำการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ โดยการปรับเปลี่ยนในส่วนของโครงสร้างใหม่ และติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเข้าไป ดังรายการอุปกรณ์ในตารางที่ 3.2 และมีรายละเอียดการเปลี่ยนแปลง ดังนี้



ภาพที่ 3.8 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน (Friction Welding Machine) ที่ได้รับการพัฒนา

3.2.2.1 เปลี่ยนมอเตอร์และเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Inverter)

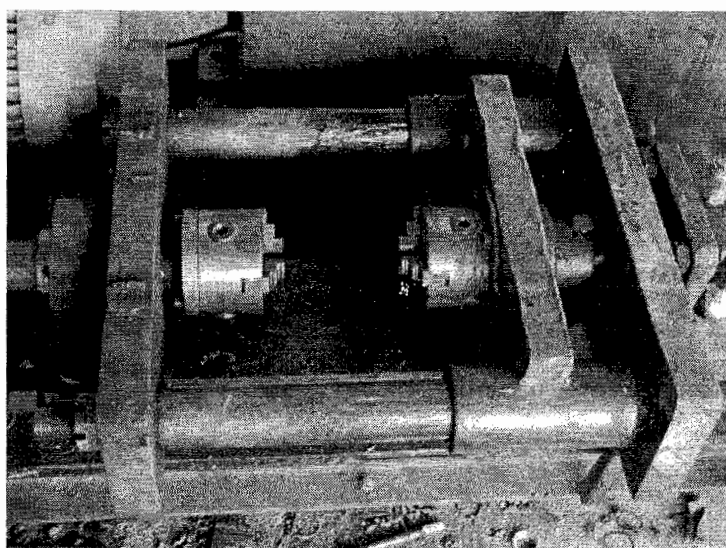
เนื่องจากมอเตอร์เดิมของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบมีขนาด 3 Hp เมื่อทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานตามเงื่อนไขที่กำหนดในงานวิจัย พบว่าไม่สามารถหมุนชิ้นงานเสียดสีกันได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์ไม่เพียงพอ จึงต้องทำการเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่เป็นขนาด 5 Hp โดยในการเปลี่ยนมอเตอร์ครั้งนี้ต้องทำการเปลี่ยนเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เป็นขนาด 7.5 HP เนื่องจากเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เดิมมีขนาด 3 Hp จึงไม่สามารถนำมาใช้กับมอเตอร์ตัวใหม่ได้



ภาพที่ 3.9 มอเตอร์ขนาด 5 Hp และเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ขนาด 7.5 Hp ชุดใหม่ที่ติดตั้งเข้าไป

3.2.2.2 เปลี่ยนแผ่นเหล็กที่ใช้ยึดเพลลาประคองและเพลลาประคอง

จากข้อบกพร่องที่มีต่อแผ่นเหล็กยึดเพลลาประคอง และเพลลาประคองดังที่ได้อธิบายไว้ในข้อที่ 3.1.1 และภาพที่ 3.3 จึงทำการปรับเปลี่ยนให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง เพื่อให้ได้แนวเชื่อมต่อที่ตรงกัน และลดการสั่นของเครื่อง โดยเปลี่ยนเพลลาประคองให้มีขนาด 2 inches จำนวน 2 เพลลา และแผ่นเหล็กยึดเพลลาประคองหนา 40 mm. แทนที่ของเดิม ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แผ่นเหล็กที่ใช้ยึดเพลลาประคอง และเพลลาประคอง

3.2.2.3 การเปลี่ยนโครงสร้างของแท่นเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

จากข้อบกพร่องของแท่นเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ ดังที่ได้ อธิบายมาแล้วในข้อที่ 3.1.1 และภาพที่ 3.5 แล้วนั้น จึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแท่น เครื่องใหม่ โดยใช้เหล็กทรง C ขนาด 100 X 50 X 4 mm.³ มาสร้างเป็นแท่นเครื่องแทนที่ของเดิม ซึ่ง หล่อขึ้นจากคอนกรีตเสริมเหล็กทำให้ได้โครงสร้างของแท่นเครื่องที่มีน้ำหนักเบากว่าเดิม แต่มีความ แข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม และง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆเพิ่มเติม

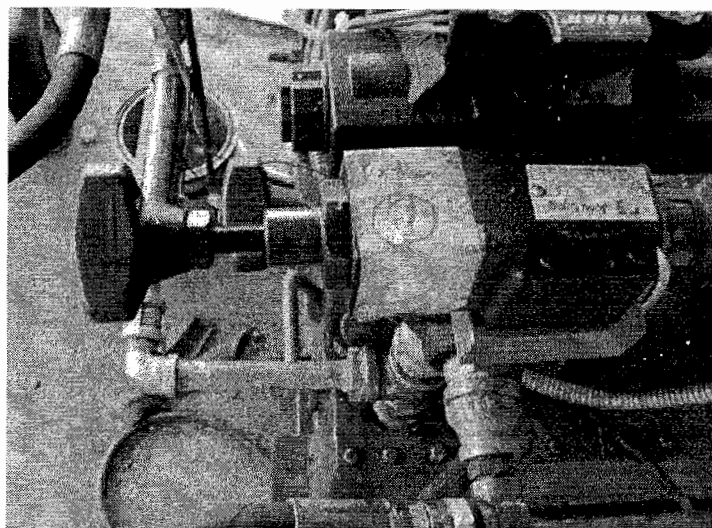
3.2.2.4 การติดตั้งชุดควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิกส์

ในการทำงานของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบนั้น การควบคุม การทำงานของระบบไฮดรอลิกส์ สามารถควบคุมได้เฉพาะการเคลื่อนที่ไปกลับของกระบอ กไฮดรอลิกส์ได้เท่านั้น ไม่สามารถควบคุมแรงดันของกระบอ กไฮดรอลิกส์ในช่วงการทำงานที่ แตกต่างกันได้ ในส่วนของความเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอ กไฮดรอลิกส์นั้น เครื่องเชื่อมด้วย ความเสียดทานต้นแบบก็ไม่สามารถควบคุมได้เช่นกัน ทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลที่มีผลต่อชิ้นงาน เชื่อมได้ จึงต้องทำการปรับเปลี่ยนชุดควบคุม Monoblock Valve เดิมออก เพื่อให้ระบบไฮดรอลิกส์

สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องจนเสร็จสิ้นกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทาน และสามารถปรับตั้งค่าแรงดันของกระบอกไฮดรอลิกส์ในช่วงที่แตกต่างกันได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำระบบไฟฟ้าเข้ามาช่วยในการควบคุมระบบไฮดรอลิกส์ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1) วาล์วปรับควบคุมแรงดันไฮดรอลิกส์ด้วยมือ (Manual Relief Valve)

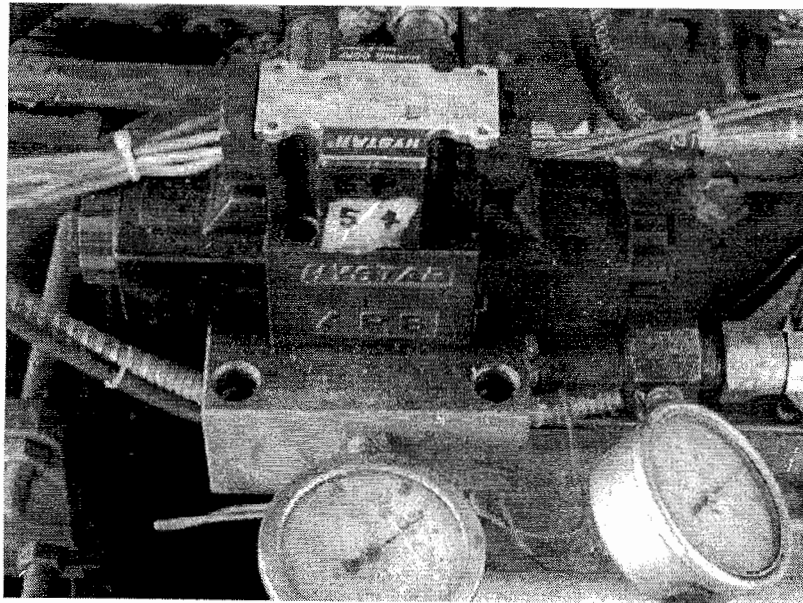
หลักการการทำงานของวาล์วปรับควบคุมแรงดันไฮดรอลิกส์ด้วยมือที่ติดตั้งกับเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่นี้ คือ เมื่อทำการขันสกรูเข้าจะเป็นการเพิ่มแรงดันภายในระบบ และเมื่อคลายสกรูออกจะเป็นการลดแรงดันภายในระบบ ซึ่งวาล์วควบคุมแรงดันนี้มีหน้าที่ในการปรับแรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) และปรับแรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ตามเงื่อนไขของตัวแปรที่กำหนด



ภาพที่ 3.11 วาล์วปรับควบคุมแรงดันไฮดรอลิกส์ด้วยมือ (Manual Relief Valve) ที่ติดตั้งในเครื่องที่พัฒนาแล้ว

2) วาล์วควบคุมการเปิด-ปิด ไฮดรอลิกส์ (Electric Solenoid Valve)

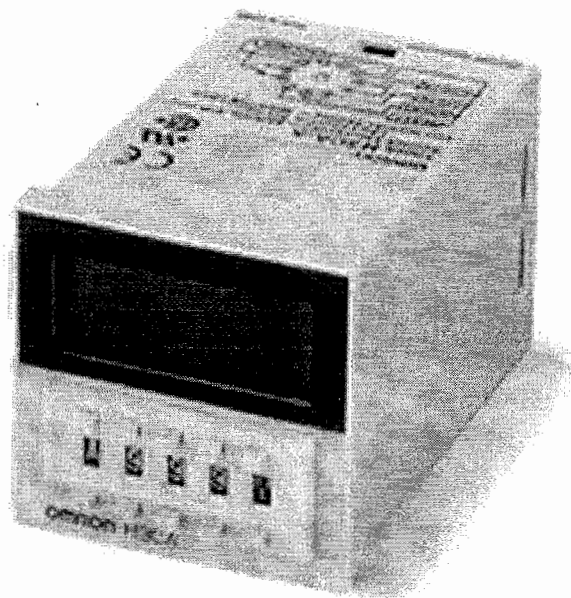
หลักการการทำงานของวาล์วควบคุมการเปิด-ปิด ไฮดรอลิกส์ ที่ติดตั้งกับเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่นี้ คือ ใช้ในการเปิด - ปิด การไหลของแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกส์ หรือสับเปลี่ยนช่วงการทำงานของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยใช้กระแสไฟฟ้า AC 220 V. ในการสั่งการทำงาน



ภาพที่ 3.12 วาล์วควบคุมการเปิด-ปิด ไฮดรอลิกส์ (Electric Solenoid Valve)

3) เครื่องควบคุมเวลาในการทำงาน (Timer)

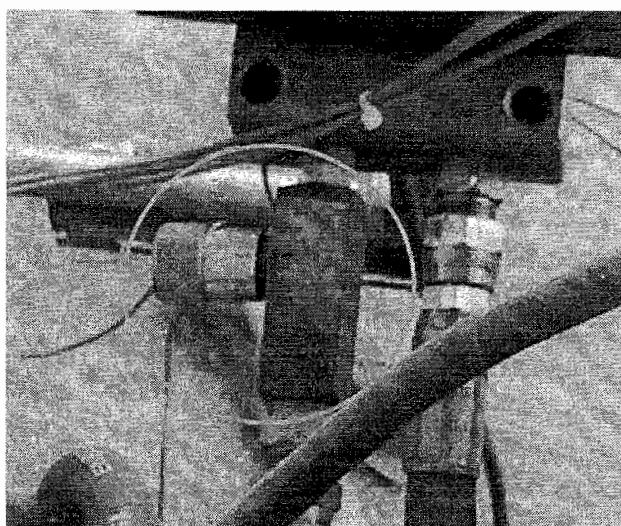
เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่นี้ ใช้เครื่องควบคุมเวลาในการทำงาน (Timer) เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องในช่วงเวลาต่างๆที่ต้องการ



ภาพที่ 3.13 เครื่องควบคุมเวลาในการทำงาน (Timer) ยี่ห้อ Omron รุ่น H3CA ที่ใช้ติดตั้งในเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่

4) วาล์วควบคุมความเร็วของกระบอก (Manual Flow control Valve)

หลักการการทำงานของวาล์วควบคุมความเร็วของกระบอก (Manual Flow control Valve) ที่ติดตั้งกับเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่นี้คือ ใช้ในการควบคุมปริมาณการไหลออกของน้ำมันไฮดรอลิกส์เมื่อหมุนเข้า (ตามเข็มนาฬิกา) จะทำให้การไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ในระบบไหลออกไปได้น้อย ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของกระบอกไฮดรอลิกส์เคลื่อนที่ไปได้ช้า และเมื่อปรับคลาย (หมุนทวนเข็มนาฬิกา) ก็จะส่งผลในลักษณะตรงกันข้าม โดยวาล์วควบคุมความเร็วของกระบอกนี้มีหน้าที่ในการปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของกระบอกไฮดรอลิกส์ ซึ่งการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของกระบอกไฮดรอลิกส์นี้ มีผลต่อการสูญเสียหน้าสัมผัสของชิ้นงานเชื่อม และทำให้การเคลื่อนที่ของกระบอกไฮดรอลิกส์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถปรับอัตราการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของกระบอกได้ด้วยปุ่มหมุนที่ตัววาล์ว



ภาพที่ 3.14 วาล์วควบคุมความเร็วของกระบอก (Manual Flow control Valve)

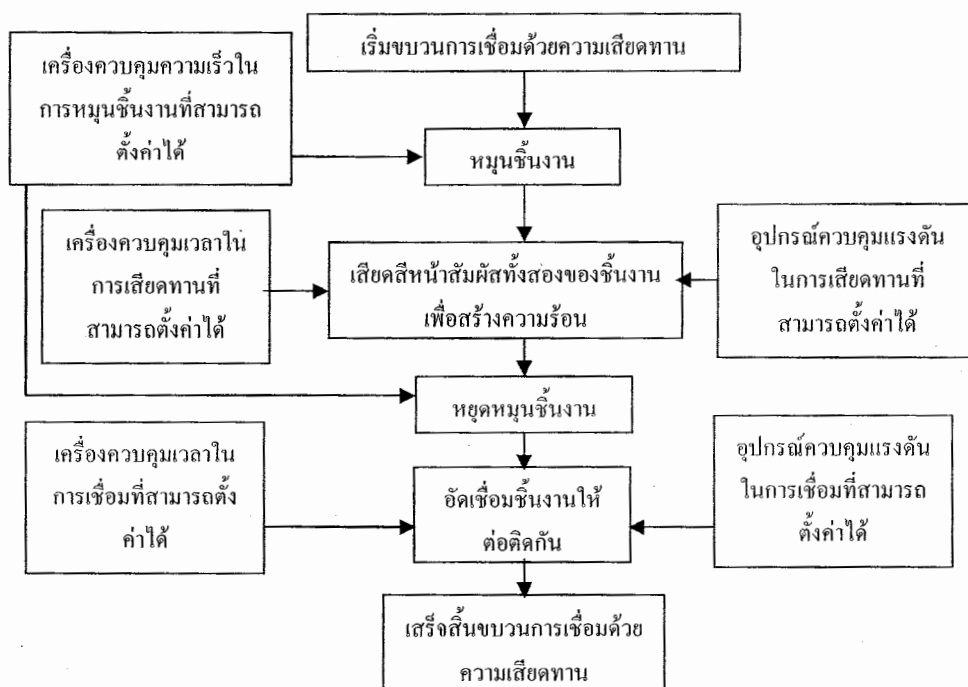
3.2.3 คุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่

จากเงื่อนไขที่กำหนดให้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่ต้องทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่เริ่มต้นขบวนการให้ชิ้นงานเลื่อนเข้าหากัน ทำการเสียดสีกัน และดันชิ้นงานให้เชื่อมต่อกัน โดยเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่นี้ ต้องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องจนเสร็จสิ้นขบวนการ สามารถปรับตั้งความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงานเชื่อม ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกไฮดรอลิกส์ เวลาและแรงดันในการทำงานได้นั้น จากการแก้ไขปรับเปลี่ยนและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ จึงทำให้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่สามารถทำได้ยังมี

ประสิทธิภาพและทำได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดในข้อที่ 3.2 โดยเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานมีอุปกรณ์และคุณสมบัติของอุปกรณ์แต่ละตัว ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และภาพที่ 3.15

ตารางที่ 3.3 อุปกรณ์และคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนาใหม่

รายการ	อุปกรณ์/คุณสมบัติ
มอเตอร์ปั๊มไฮดรอลิกส์	AC 220 V / 3 Hp
มอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	AC 380 V / 5 Hp
ระบบวาล์วควบคุมไฮดรอลิกส์	Manual Relief Valve
ระบบวาล์วควบคุมการ เปิด-ปิด ไฮดรอลิกส์	Electric Solenoid Valve AC 220 V.
กระบอกไฮดรอลิกส์	Ø 4 inches
ระบบควบคุมความเร็วของกระบอกไฮดรอลิกส์	Manual Flow control Valve
ระบบควบคุมเวลาในการทำงาน	Timer
แรงดันปั๊มไฮดรอลิกส์	100 Bar
ระบบควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	Inverter 7.5 Hp



ภาพที่ 3.15 แผนผังกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้นกระบวนการ

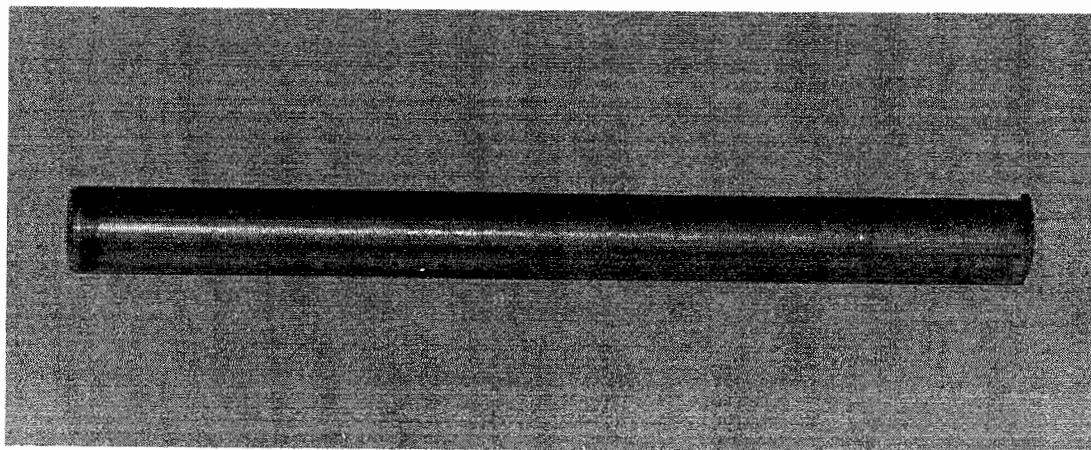
บทที่ 4

วิธีการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการในการศึกษาเกี่ยวกับ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หนึ่งของการศึกษานี้

4.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่จะนำมาใช้ในเชื่อมด้วยความเสียดทานนี้จัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามท้องตลาด ซึ่งเรียกว่าเหล็กเพลทขาว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm. ยาว 100 mm. ดังภาพที่ 4.1 ซึ่งจะมีคาร์บอนต่ำกว่า 0.20 % เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ จะใช้ทำชิ้นส่วนที่เป็นเหล็กแผ่นบางต่าง ๆ หรือเหล็กแผ่นขนาดใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป เหล็กกล้าชนิดนี้จะมีความแข็งแรงน้อย เหนียว และแปรรูปได้ง่าย ใช้กับงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูง



ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

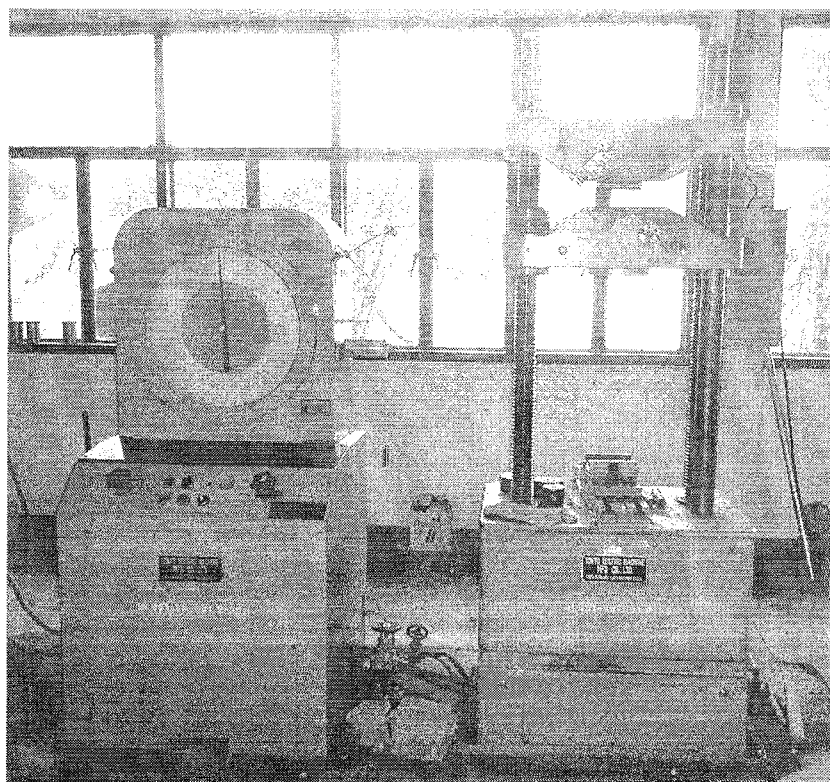
ก่อนที่จะนำเหล็กไปทำการทดลองเชื่อมนั้น ต้องนำเหล็กไปทดสอบเพื่อหาส่วนประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง Emission Spectrometer รุ่น ARL 3460 Fisons Instruments ดังแสดงในภาพที่ 4.2 โดยใช้มาตรฐานของระบบ AISI (American Iron and Steel Institute) เพื่อตรวจสอบหาส่วนประกอบทางเคมี



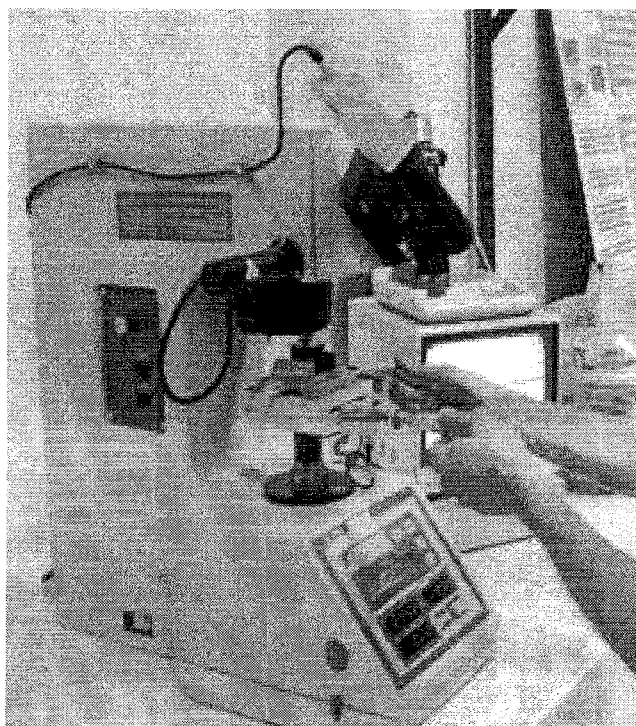
ภาพที่ 4.2 เครื่อง Spectrometer ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

4.1.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ก่อนการนำเหล็กไปทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้น ต้องทราบถึงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้นก่อน ในงานวิจัยนี้ทำการหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุด้วยวิธีการนำเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยไปทดสอบหาค่าความแข็งแรง โดยใช้เครื่องทดสอบค่าความแข็งแรง ยี่ห้อ Torsee รุ่น ACR – 200 – 30 P ผลิตโดย Tokyo Testing Machine MFG Co., LTD. ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และทำการทดสอบหาค่าความแข็ง โดยใช้เครื่อง Micro Hardness Test ยี่ห้อ Multitoyo รุ่น MVK-H1 ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.3 เครื่องทดสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อม



ภาพที่ 4.4 เครื่องวัดความแข็ง ยี่ห้อ Multitoyo รุ่น MVK-H1 Micro Hardness Test

4.2 การกำหนดเงื่อนไขในการทดลอง

ในการกำหนดเงื่อนไขในการทดลองนั้น จากตัวแปรที่กล่าวไว้ในข้อที่ 2.1.2 พบว่ามีตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเชื่อมด้วยความเสียดทานอยู่มาก แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ในเบื้องต้นเท่านั้น โดยมีรายละเอียดของการศึกษาดังนี้

4.2.1 การกำหนดแรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure)

ในการกำหนดตัวแปรของแรงดันในการเสียดทานนั้น จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเปรียบเทียบกับความสามารถของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่สร้างและพัฒนาขึ้นมาใหม่ จึงได้กำหนดเงื่อนไขของตัวแปรในการใช้แรงดันในการเสียดทานเป็น 7 ช่วง คือ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 Bar เป็นเงื่อนไขเบื้องต้นในการทดลอง เพื่อต้องการหาค่าแรงดันในการเสียดทานที่ให้ค่าความแข็งแรงที่สุดใน 7 ช่วงที่ทำการทดลอง ในส่วนของตัวแปรอื่น ๆ ได้กำหนดให้เป็นค่าคงที่คือ เวลาในการเสียดทาน (Friction Time) ที่ 9 Sec.[2] แรงดันในการอัด (Upset Pressure) ที่ 60 Bar [3] เวลาในการอัด (Upset Time) ที่ 3 Sec.[5] และในส่วนของความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงาน (Rotational Speed) นั้นกำหนดจากประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่สร้างโดยเครื่องสามารถทำความเร็วในการหมุนได้สูงสุดที่ 1,200 rpm จึงกำหนดให้เป็นค่าคงที่ และในการทดลองเชื่อมในแต่ละช่วงของตัวแปรนั้น จะทำการเชื่อมชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้นงาน ในของแต่ละช่วงตัวแปร

4.2.2 การกำหนดเวลาในการเสียดทาน (Friction Time)

ในการกำหนดเวลาในการเสียดทานนั้น จากผลที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 4.2.1 จะได้ว่าตัวแปรของแรงดันในการเสียดทานที่ดีที่สุด ซึ่งจะนำมากำหนดให้เป็นตัวแปรคงที่ และการกำหนดเวลาในการเสียดทานอาศัยหลักการเช่นเดียวกับข้อที่ 4.2.1 โดยกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรในการใช้เวลาในการเสียดทานเป็น 5 ช่วง คือ 7, 9, 11, 13 และ 15 Sec. เป็นเงื่อนไขเบื้องต้นในการทดลอง ในส่วนของตัวแปรอื่น ๆ ได้กำหนดให้เป็นค่าคงที่เหมือนกันคือ แรงดันในการอัด (Upset Pressure) ที่ 60 Bar เวลาในการอัด (Upset Time) ที่ 3 Sec. และความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงาน (Rotational Speed) ที่ 1,200 rpm และนำผลที่ดีที่สุดจากทดสอบหาค่าความแข็งแรงที่ทำการเฉลี่ยของ 3 ชิ้นงาน ในแต่ละช่วงตัวแปรมากำหนดให้เป็นตัวแปรคงที่

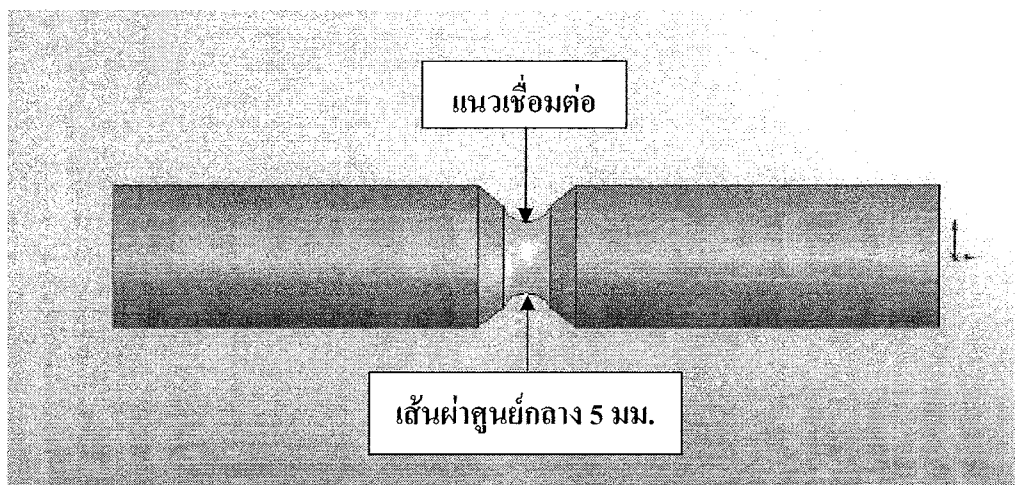
4.2.3 การกำหนดเงื่อนไขในการทดลองจากตัวแปรคงที่

จากการกำหนดช่วงแรงดันในการเสียดทานและเวลาในการเสียดทาน ขั้นตอนในข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 นั้นทำให้ทราบถึงเงื่อนไขในการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับทำการเชื่อมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคต่อไป

อนึ่งการศึกษาในส่วนนี้ถือเป็นการศึกษาในขั้นเบื้องต้น เนื่องจากความจริงแล้วยังมีตัวแปรอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมอย่างไรก็ตาม การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ดังกล่าวไม่ได้อยู่ในขอบเขตของการศึกษานี้ และอาจเป็นประเด็นในการศึกษาต่อไปในอนาคต

4.2.4 การทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม

จากการทดลองเชื่อมขึ้นตามเงื่อนไขของแรงดันในการเสียดทานและเวลาในการเสียดทานนั้น ชิ้นงานที่ได้จากเงื่อนไขต่างๆ ของการเชื่อมทั้งสองเงื่อนไข และตัวแปรในช่วงต่างๆ ต้องนำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม เนื่องจากชิ้นเชื่อมที่เชื่อมความเสียดทานมีความแข็งแรงของรอยเชื่อมมากกว่าวัสดุเดิม เมื่อนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงการขาดจากกันของชิ้นงานเชื่อม จะขาดจากกันบริเวณส่วนที่เป็นวัสดุเดิมเป็นผลให้เครื่องทดสอบค่าความแข็งแรงแสดงผลออกมาเป็นค่าความแข็งแรงของวัสดุเดิมเท่านั้น ไม่สามารถแสดงค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่แท้จริงออกมา จึงต้องทำการแก้ไขโดยวิธีการนำชิ้นงานเชื่อมไปทำการกลึงบากกำหนดจุดขาดที่รอยเชื่อมให้มีพื้นที่หน้าตัดที่จุดเชื่อมเล็กกลงกว่าชิ้นงานเดิม โดยทำการกลึงบากลงให้เหลือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5 mm. ดังแสดงในภาพที่ 4.5



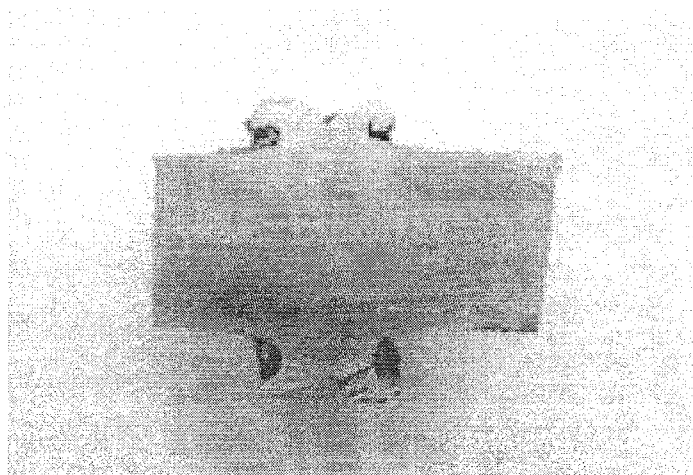
ภาพที่ 4.5 แบบชิ้นงานที่นำไปกลึงบาก

4.3 การทดสอบวัสดุที่ได้จากการทดลอง

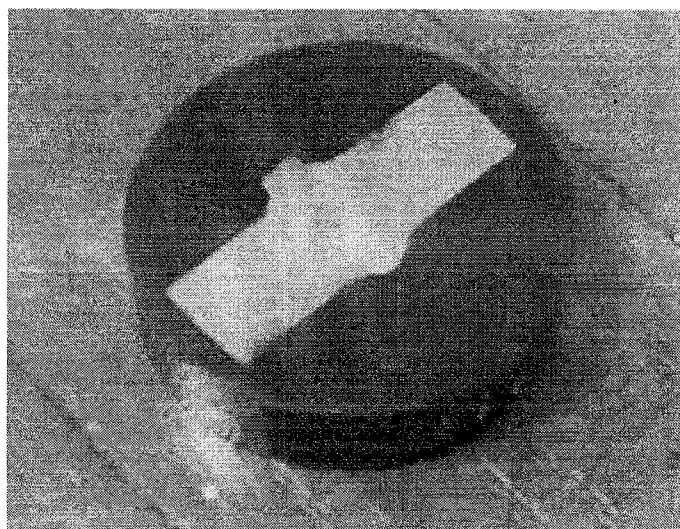
จากการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยการเปรียบเทียบจากผลของค่าความแข็งแรง จากนั้นจึงนำชิ้นงานเชื่อมตามเงื่อนไขดังกล่าว มาทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยการศึกษาวิจัยนี้ใช้การวัดความแข็งแรงแบบ Vickers Hardness (HV) เนื่องจากบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดเล็ก โดยมีรายละเอียดของวิธีการศึกษาดังนี้

4.3.1 การเตรียมชิ้นงานและการขึ้นตัวเรือน (Mounting)

เพื่อการจับยึดที่มั่นคงและป้องกันการผิดพลาดในการทดลองของชิ้นงานทดสอบ จะต้องเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบด้วยการนำชิ้นงานไปขึ้นตัวเรือนเสียก่อน ซึ่งการเตรียมชิ้นงานก่อนการขึ้นตัวเรือนนั้นต้องนำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานตามเงื่อนไขที่กำหนดดังกล่าว มาตัดเอาเฉพาะส่วนที่ต้องการนำไปวิเคราะห์ โดยชิ้นงานต้องมีความยาวไม่เกิน 30 mm. ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ก่อนการนำชิ้นงานมาขึ้นตัวเรือน และในการขึ้นตัวเรือนของชิ้นงานที่จะทำการวิเคราะห์นี้จะขึ้นตัวเรือนด้วย เรซินฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol-Formaldehyde) ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า เบเคอไลท์ (Bakelite) ดังภาพที่ 4.7



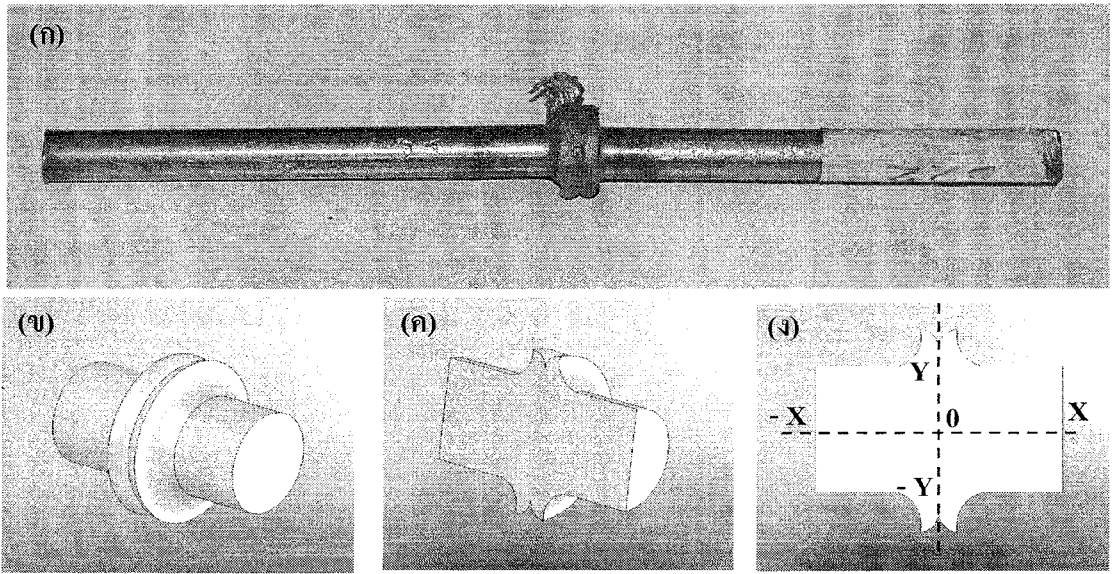
ภาพที่ 4.6 ชิ้นงานที่เตรียมก่อนการขึ้นตัวเรือน



ภาพที่ 4.7 ชิ้นงานที่ขึ้นตัวเรือนด้วย เรซินฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์

4.3.2 การกำหนดจุดและการวัดค่าความแข็ง

ในการวัดค่าความแข็งของรอยเชื่อมนั้น จะทำการแบ่งชิ้นงานออกเป็นสองด้านดังแสดงในภาพที่ 4.8 โดยในตำแหน่งที่ $X = 0$ (แกน Y) นั้นเป็นตำแหน่งกึ่งกลาง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เหล็กทั้ง 2 แห่ง เสียดสีและเชื่อมต่อกัน ในการวัดความแข็งจะทำการวัดความแข็งตามแนวแกน X (ดูภาพที่ 4.8 (ง)) โดยวัดห่างออกไปจากแกน $X = 0$ ไปทางด้านขวา (เรียกว่า X) จุดละ 0.5 mm. และวัดออกไปทางด้านซ้าย (เรียกว่า -X) ออกไปจุดละ 0.5 mm. เช่นกัน โดยความแข็งที่วัดได้ตามแกน X เป็นความแข็งของแท่งเหล็กส่วนที่หมุน ส่วนความแข็งที่วัดได้ตามแกน -X เป็นความแข็งของแท่งเหล็กส่วนที่ยึดอยู่กับที่ ซึ่งจะได้อ่านค่าและวิธีดังแสดงในภาพที่ 4.8 คือ นำชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานดังภาพที่ 4.8 (ก) มาทำการตัดเอาเฉพาะส่วนที่เชื่อมต่อกันความยาว 20 mm. ดังภาพที่ 4.8 (ข) จากนั้นนำมาผ่าครึ่งด้วยวิธีการเลื่อยให้ขาดจากกัน เพื่อไม่ให้ความร้อนจากการตัดมีผลกระทบต่อโครงสร้างของรอยเชื่อม ที่จะทำการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.8 (ค) ในขั้นตอนการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานนั้นจะทำการวัดความแข็งในแนวแกน X ดังภาพที่ 4.8 (ง)



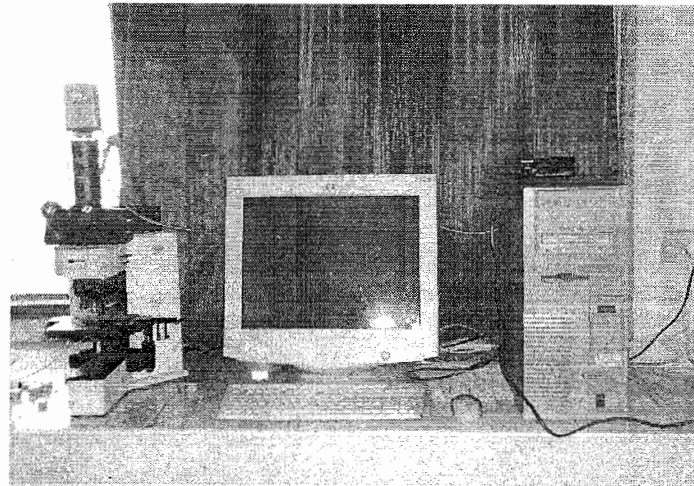
ภาพที่ 4.8 (ก) ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเสียดทาน (ข) แบบของชิ้นงานที่ตัดเฉพาะส่วนของแนวเชื่อมต่อ (ค) แบบของชิ้นงานที่ผ่าครึ่ง (ง) แบบของชิ้นงานผ่าครึ่งที่กำหนดแนวทดสอบค่าความแข็ง

4.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

นอกจากการวัดความแข็งของรอยเชื่อมแล้ว ยังทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอีกด้วย โดยนำชิ้นงานเชื่อมมาทำการขึ้นตัวเรือนแล้วนำมาขัดให้ผิวหน้าชิ้นงาน เพื่อกำจัดรอยขีดข่วนหรือร่องรอยที่เกิดจากการตัด และทำการขัดตามกระบวนการจนเสร็จสิ้น และเหมาะสม

ที่จะนำไปกักขังด้วยไนตอล (กรดไนตริก 2 ml. และเอทานอลหรือเมทานอล 98 ml.) โดยใช้ระยะเวลาในการกักขังรอย 2 ถึง 3 Sec. จากนั้นนำชิ้นงานที่กักให้เกิดรอยไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงในภาพที่ 4.9

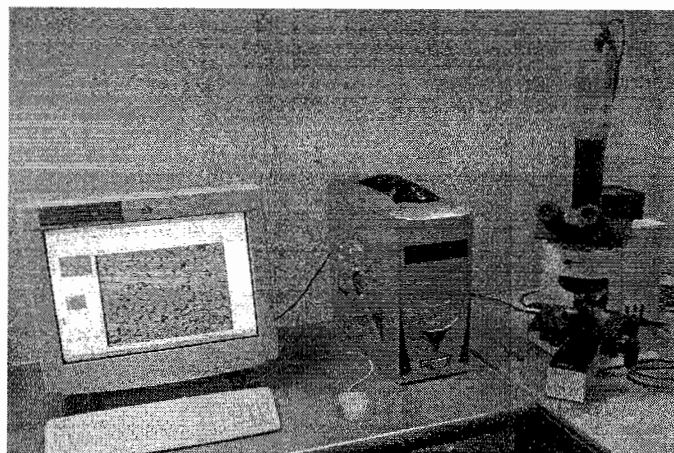
อนึ่งในการถ่ายภาพของเกรนและเฟสที่เกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อม จะทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ($X = 0$) และที่จุดต่างๆทุกๆระยะ 0.5 mm. ไปทาง X และ -X



ภาพที่ 4.9 กล้องจุลทรรศน์ และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการส่งดูโครงสร้างของชิ้นงาน และถ่ายภาพเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผล

4.3.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Image Analyser

จากภาพถ่ายที่ได้ในระยะเวลาต่างๆจากข้อที่ 4.3.3 จะต้องนำภาพที่ได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Image Analyser ดังภาพที่ 4.10 เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณความแตกต่างของเฟส และขนาดของเกรน (G number) ที่เกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อม



ภาพที่ 4.10 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง ยี่ห้อ Olympus รุ่น Olysia M3

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการทดสอบโดยเรียงตามลำดับขั้นตอนของวิธีการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบหาส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง ผลการทดสอบเหล็กที่ใช้ในการทดลอง ผลการทดสอบหาตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้าด้วยความเสียดทาน ผลการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของเหล็กที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน ผลการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

5.1.1 ผลทดสอบหาส่วนประกอบทางเคมี

การทดสอบหาส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กคาร์บอนต่ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยนำชิ้นเหล็กจำนวน 5 ชิ้น มาวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Spectrometer ตามมาตรฐานของระบบ AISI (American Iron and Steel Institute) ผลที่ได้จากการเฉลี่ยพบว่าเป็นเหล็กชนิด AISI 1015 โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

ชิ้นที่	% C2	% Si1	% S	% P1	% Mn3	% Ni2	% Cr1
1	0.15590	0.17402	0.01375	0.02847	0.46780	0.00617	0.01082
2	0.13035	0.13647	0.01775	0.01488	0.37647	0.01474	0.02309
3	0.17312	0.14025	0.01968	0.01597	0.36705	0.01516	0.02017
4	0.14193	0.16924	0.02364	0.02302	0.44068	0.00800	0.01261
5	0.13192	0.14995	0.02163	0.02416	0.41221	0.00875	0.01091
เฉลี่ย	0.14664	0.15399	0.01929	0.02130	0.41284	0.01056	0.01552

ตารางที่ 5.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

ชั้นที่	% Mo2	% V3	% Cu5	% W	% Ti4	% Sn2	% Co1
1	0.00294	0.00047	0.00373	0.00153	0.00035	0.00098	0.00307
2	0.00362	0.00111	0.00696	0.00202	0.00016	0.00125	0.00445
3	0.00205	0.00091	0.06503	0.00118	0.00020	0.00105	0.00427
4	0.00404	0.00277	0.11376	0.00502	0.00052	0.00176	0.00414
5	0.00209	0.00081	0.07190	0.00230	0.00018	0.00117	0.00356
เฉลี่ย	0.00295	0.00121	0.05228	0.00241	0.00028	0.00124	0.00390

ชั้นที่	% AL7	% Ph6	% B1	% Nb	% Zn5	% N1	% FE
1	0.00133	-0.00023	0.00004	-0.00039	-0.00011	-0.00253	99.13190
2	0.00058	0.00156	0.00011	0.00189	0.00101	-0.00452	99.26600
3	0.00275	0.00005	0.00012	0.00105	0.00055	0.01294	99.15650
4	0.00428	0.00459	0.00027	0.00593	0.00341	0.03999	98.99040
5	0.00112	-0.00006	0.00014	0.00087	0.00048	0.00129	99.15460
เฉลี่ย	0.00201	0.00118	0.00014	0.00187	0.00107	0.00943	99.13988

จากตารางส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ จะพบว่าปริมาณคาร์บอน (C2) ที่ได้จากชั้นงานทดสอบทั้ง 5 ชั้นงานนั้น มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอยู่ในช่วง 0.13192 - 0.17312 % เมื่อนำผลที่ได้มาเฉลี่ยพบว่าปริมาณคาร์บอน 0.14664 % และเมื่อนำมาเทียบตามมาตรฐานของระบบ AISI พบว่าเป็นเหล็กชนิด AISI 1015

5.1.2 ผลการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แบ่งการทำการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.2.1 ผลการทดสอบหาค่าความแข็งแรง (Tensile Strength Test)

ในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของเหล็กที่จะใช้ในการทดลองเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้น ต้องนำเหล็กที่จะใช้ในการทดลองมากลึงออกให้เหลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm. จากนั้นนำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงจำนวน 3 ชั้น ผลที่ได้นำมาเฉลียดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างที่	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ค่าความแข็งแรง (Tensile Strength, MPa)	790	770	780	780

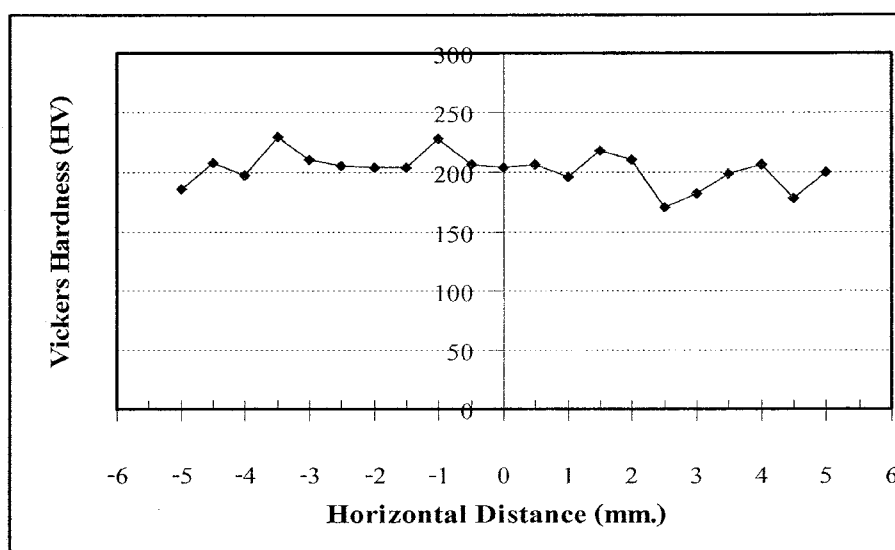
จากตารางแสดงผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้ในการทดลองจะพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 780 MPa

5.1.2.2 ผลการทดสอบหาค่าความแข็ง Vickers Hardness (HV)

การทดสอบค่าความแข็งของเหล็กก่อนการนำมาใช้ในการทดลอง จะนำเหล็กมาผ่านและนำไปขึ้นตัวเรือน เพื่อที่จะนำมาทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็ง โดยทำการวัดค่าความแข็งในแนวแกน X ดังตัวอย่างในภาพที่ 4.8 ผลที่ได้ทั้งหมดนำมาเฉลี่ย ดังตารางที่ 5.3 และภาพที่ 5.1

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบค่าความแข็งของเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

ระยะของจุดกด	-5	-4.5	-4	-3.5	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0
ค่าความแข็ง (HV)	186	208	198	230	210	205	204	204	229	207	204
ระยะของจุดกด	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	-
ค่าความแข็ง (HV)	206	196	218	210	170	183	199	207	179	199	-
ค่าความแข็งเฉลี่ย	202 HV										



ภาพที่ 5.1 กราฟแสดงค่าความแข็งในแนวแกน X ที่จุดต่างๆของเหล็กที่จะนำไปทดลองเชื่อมด้วยความเสียดทาน

จากตารางและภาพที่กล่าวมา เมื่อทำการวัดค่าความแข็งของเหล็กเดิม ก่อนที่จะนำไปทดลองเชื่อมด้วยความเสียดทาน ด้วยการวัดค่าความแข็งทั้งหมด 21 จุด โดยแต่ละจุดห่างกัน 0.5 mm. พบว่าค่าความแข็งที่ได้จากการเชื่อมมีค่าเท่ากับ 202 HV

5.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจากชิ้นงานเดิมที่ขึ้นตัวเรือนและผ่านกระบวนการขัดมันกัดกรด จากนั้นนำมาถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องถ่ายภาพดังแสดงในภาพที่ 4.9 เพื่อที่จากนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของเฟส Pearlite และ Ferrite ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 4.10 จากการวิเคราะห์ทั้ง 10 ภาพ โดยแต่ละภาพถ่ายห่างกันภาพละ 0.5 mm. พบว่าชิ้นเหล็กเดิมมีปริมาณ โดยเฉลี่ยของ Pearlite 10.39 % และ Ferrite 89.62 % ดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ตารางผลการวัดปริมาณเฟส Pearlite และ Ferrite

ตารางผลการวัดปริมาณเฟส Pearlite และ Ferrite ของเหล็กเดิมด้วยการวัดในแนวแกน X											
Base Iron	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	ค่าเฉลี่ย
% Pearlite	10.15	10.38	10.24	10.51	10.83	10.66	10.22	10.08	10.05	10.73	10.39
% Ferrite	89.85	89.62	89.76	89.49	89.17	89.34	89.78	89.92	89.95	89.27	89.62

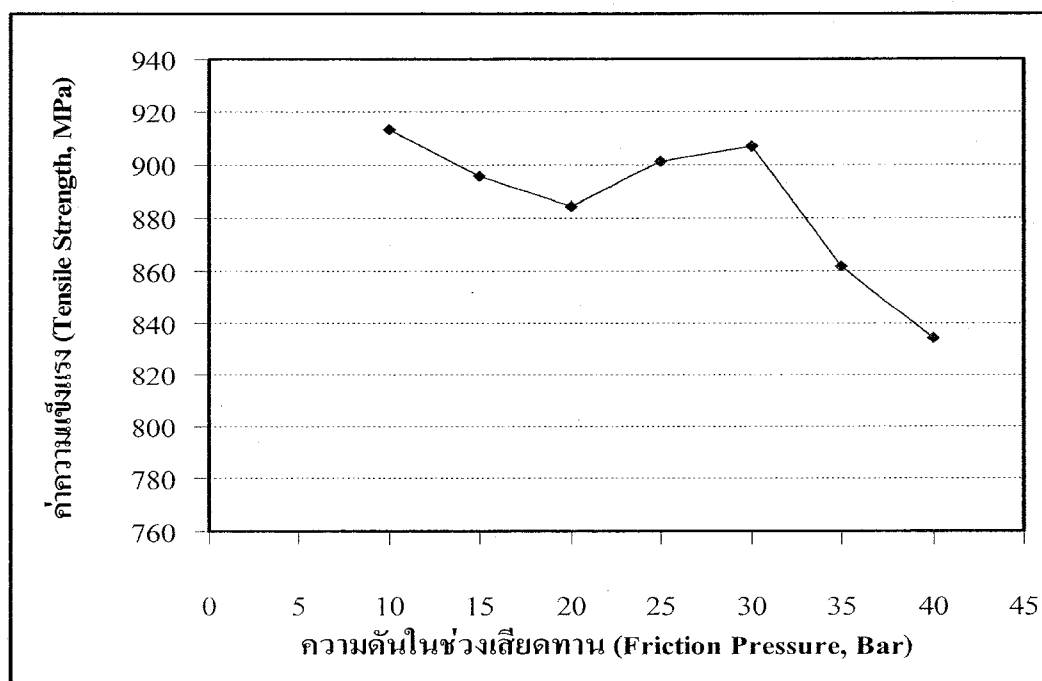
5.2 แรงดันในการเสียดทานและเวลาในการเสียดทานที่เหมาะสมในการทดลอง

5.2.1 แรงดันในการเสียดทาน

ในงานวิจัยนี้ได้นำชิ้นงานมาทดลองเชื่อมตามขบวนการที่ได้อธิบายมาแล้วในข้อที่ 4.2.1 โดยในขั้นแรกได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแรงดันในการเสียดทาน โดยทำการเชื่อมชิ้นงานที่แรงดันในการเสียดทานจาก 10 – 40 Bar และปรับเปลี่ยนแรงดันทุกๆ 5 Bar ในขณะที่เงื่อนไขอื่นๆ คงที่แล้วนำชิ้นงานมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงดังได้อธิบายมาแล้ว ผลการทดลองดังตารางที่ 5.5 และนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 5.2 จากผลการทดลองในตารางที่ 5.5 และภาพที่ 5.2 จะเห็นว่าเมื่อใช้แรงดันเสียดทานในการเชื่อมสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้มีแนวโน้มลดน้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อใช้แรงดันในการเสียดทานมากไปรอยเชื่อมอาจได้รับความร้อนมากขึ้น ทำให้โครงสร้างอ่อนตัวและความแข็งแรงลดลง จากผลการทดลองพบว่าที่แรงดันในการเสียดทาน 10 Bar เป็นแรงดันในการเสียดทานที่ทำให้รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงสูงสุด

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองหาค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานภายใต้แรงดันในการเสียดทานต่างๆ

ตัวอย่างที่ (Trial no.)	แรงดันเสียดทาน (Friction Pressure) (Bar)	เวลาเสียดทาน (Friction Time) (Sec)	ค่าความแข็งแรงแต่ละชิ้นงาน (Tensile Strength, MPa)			ความแข็งแรงเฉลี่ย (Tensile Strength) (MPa)
			ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	
1	10	9	910	910	920	913
2	15	9	895	900	892	896
3	20	9	880	885	890	885
4	25	9	900	905	900	901
5	30	9	905	910	907	907
6	35	9	865	860	862	862
7	40	9	835	837	830	834



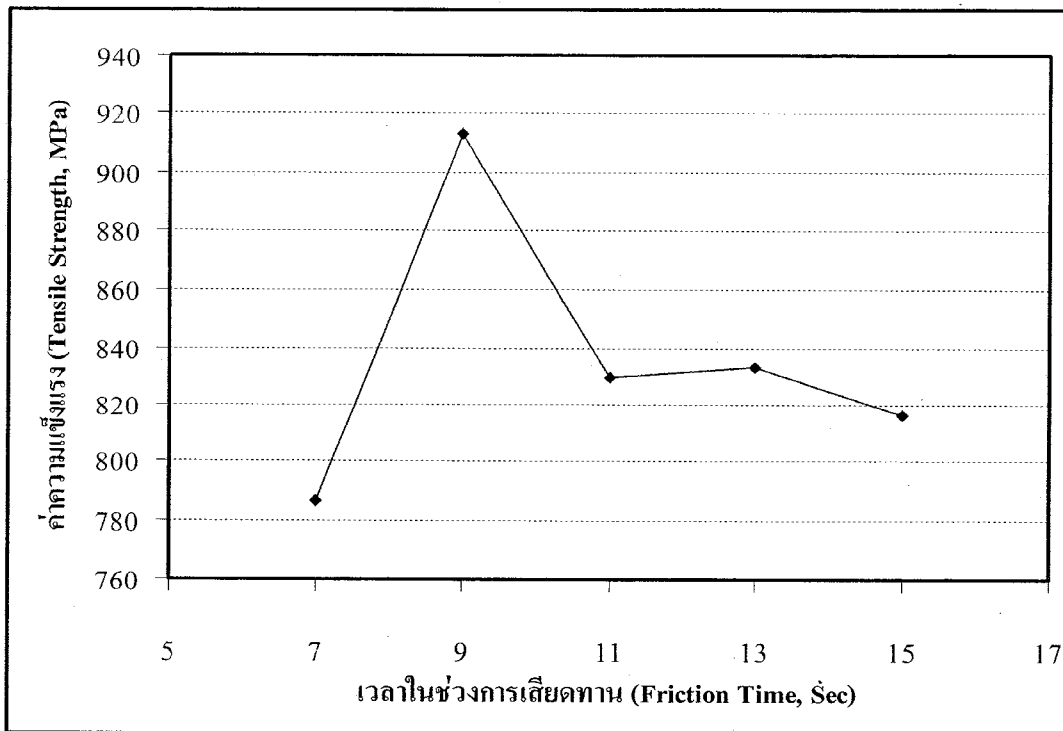
ภาพที่ 5.2 กราฟค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แรงดันในการเสียดทานในช่วงต่างๆ

5.2.2 เวลาในการเสียดทาน

หลังจากได้เงื่อนไขที่เหมาะสมของแรงดันในการเสียดทานแล้ว จึงได้นำเงื่อนไขมาทดสอบหาเวลาในการเสียดทานต่อไป โดยการนำชิ้นงานมาเชื่อมภายใต้แรงดันในการเสียดทาน 10 Bar และเชื่อมภายใต้เวลาเสียดทานต่าง ๆ กันคือ 7, 9, 11, 13 และ 15 Sec. โดยให้ตัวแปรอื่นๆคงที่ได้แก่ แรงดันอัด 60 Bar จากนั้นนำชิ้นงานที่เชื่อมได้ไปทดสอบหาค่าความแข็งแรง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.6 และภาพที่ 5.3 จากข้อมูลในตารางที่ 5.6 และภาพที่ 5.3 จะเห็นว่าเวลาในการเสียดทานที่ให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่เหมาะสมคือ 9 Sec. ซึ่งผลที่ได้นี้ก็คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Sahin, M. [2] [15] หากให้เวลาในการเสียดทานสูงหรือน้อยกว่านี้ แนวโน้มความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมจะลดลง ดังนั้นจากผลการทดสอบภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของ การเชื่อมด้วยความเสียดทานสำหรับการศึกษานี้คือ ใช้แรงดันในการเสียดทาน 10 Bar เวลาในการเสียดทาน 9 Sec. แรงดันในการอัด 60 Bar เวลาในการอัด 3 Sec. และความเร็วรอบของการเชื่อม 1,200 rpm

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองหาค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานภายใต้เวลาในการเสียดทานต่างๆ

ตัวอย่างที่ (Trial no.)	แรงดันเสียดทาน (Friction Pressure) (Bar)	เวลาเสียดทาน (Friction Time) (Sec)	ค่าความแข็งแรงแต่ละชิ้นงาน (Tensile Strength, MPa)			ความแข็งแรงเฉลี่ย (Tensile Strength) (MPa)
			ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	
1	10	7	800	770	790	786
2	10	9	900	900	940	913
3	10	11	780	840	870	830
4	10	13	810	830	860	833
5	10	15	800	820	830	816



ภาพที่ 5.3 กราฟค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้เวลาในการเสียดทานในช่วงต่างๆ

5.3 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม

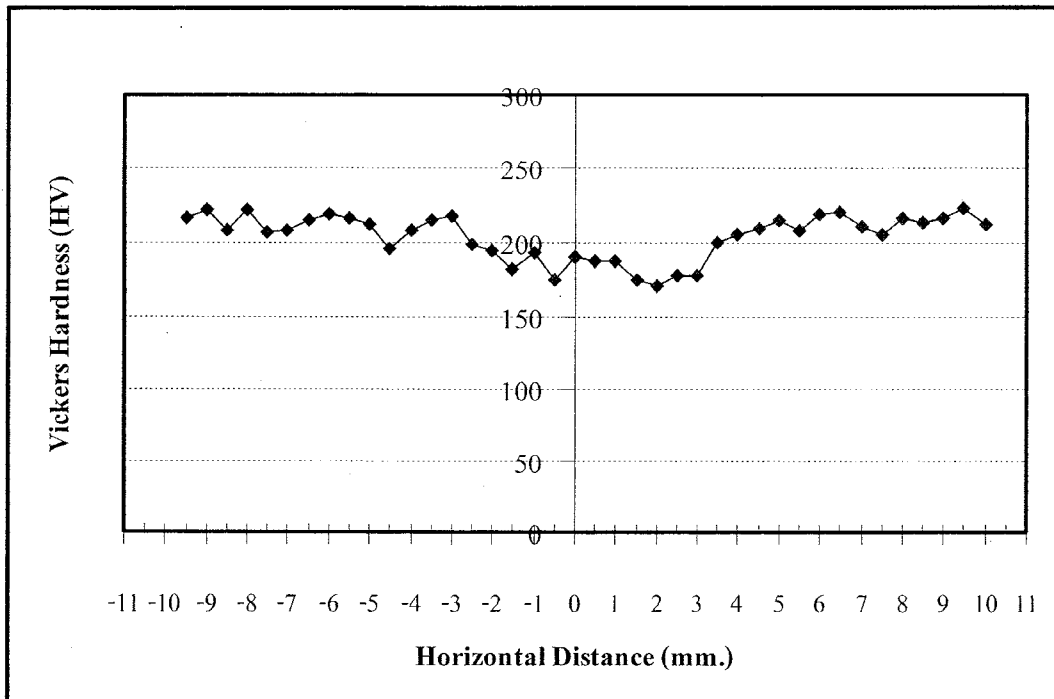
5.3.1 ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ค่าแรงดันในการเสียดทานแตกต่างกัน

จากการทดสอบหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ผ่านมาในข้อที่ 5.2 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วย โดยการนำชิ้นงานที่เชื่อมเงื่อนไขของแรงดันในการเสียดทานที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 Bar เวลาในการเสียดทาน 9 Sec. แรงดันในการอัด 60 Bar เวลาในการอัด 3 Sec. และความเร็วในการหมุนชิ้นงานเชื่อม 1,200 rpm อย่างละ 1 ชิ้นงาน มาทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมและผลของค่าความแข็งแรงที่วัดได้จากชิ้นงานที่เชื่อมตามเงื่อนไขของแรงดันในการเสียดทานต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 5.7 และกราฟแสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่แรงดันในการเสียดทานต่างๆดังภาพที่ 5.4 – 5.9

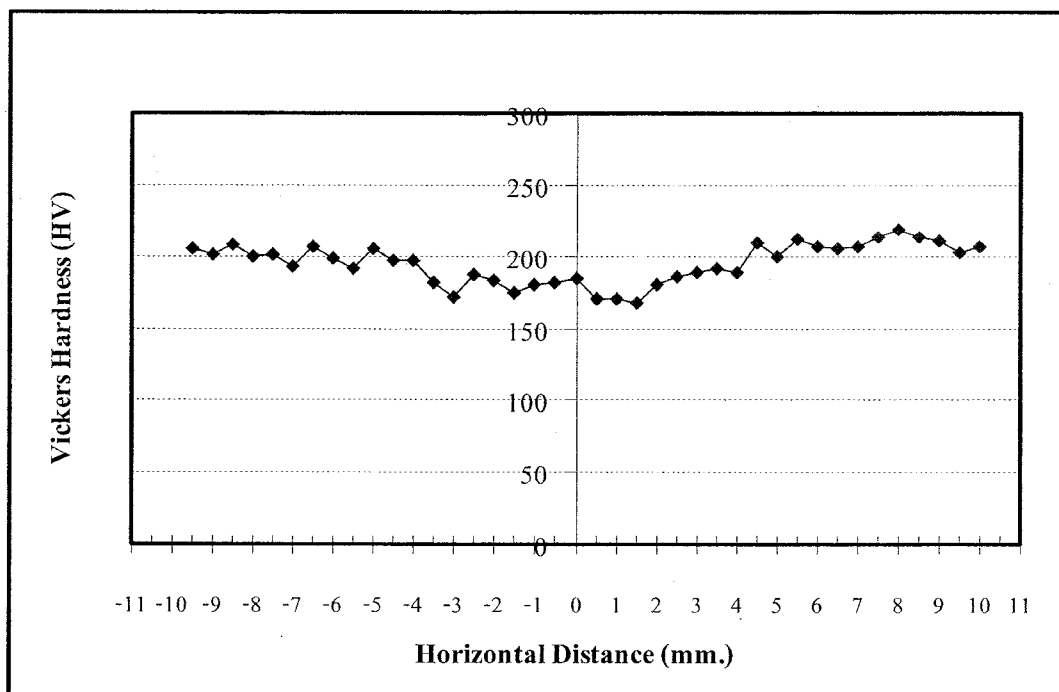
จากกราฟในภาพที่ 5.4 – 5.9 พบว่าความแข็งแรงที่รอยเชื่อมที่เกิดจากเงื่อนไขในการเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทานในช่วงต่างๆผลที่เกิดขึ้น คือ ค่าความแข็งแรงที่จุดเชื่อมต่อมีค่าต่ำลงในทุกเงื่อนไขของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน จึงต้องทำการวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่เกิดขึ้นด้วยการไปวิเคราะห์ในด้านโครงสร้างจุลภาคต่อไป

ตารางที่ 5.7 ค่าความแข็งที่เงื่อนไขแรงดันการเสียดทานในช่วงต่างๆ เวลาการเสียดทาน 9 Sec.
แรงดันการอัด 60 Bar เวลาการอัด 3 Sec. ความเร็วหมุนชิ้นงาน 1,200 rpm

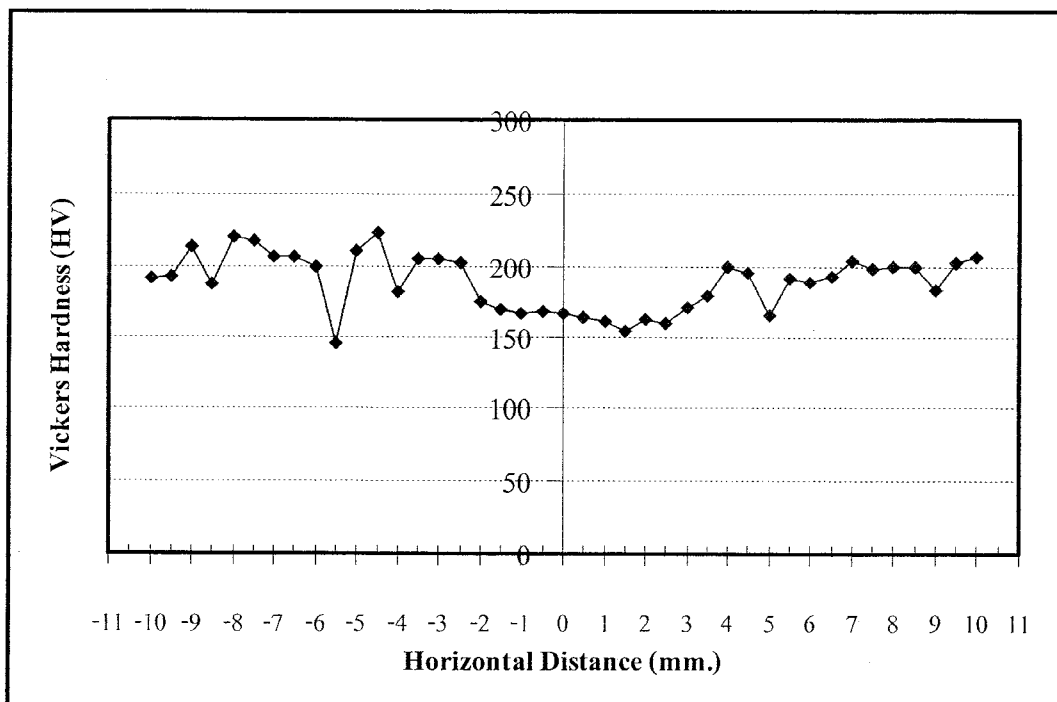
+ X mm.	แรงดันเสียดทาน 10 Bar	แรงดันเสียดทาน 15 Bar	แรงดันเสียดทาน 20 Bar	แรงดันเสียดทาน 25 Bar	แรงดันเสียดทาน 30 Bar	- X mm.	แรงดันเสียดทาน 10 Bar	แรงดันเสียดทาน 15 Bar	แรงดันเสียดทาน 20 Bar	แรงดันเสียดทาน 25 Bar	แรงดันเสียดทาน 30 Bar
10	212	207	207	-	222	0	189	185	166	176	193
9.5	224	202	202	-	221	-0.5	175	183	168	165	183
9	216	212	183	-	217	-1	193	180	165	161	175
8.5	213	214	200	-	218	-1.5	182	176	169	164	182
8	215	219	200	-	220	-2	195	183	175	172	180
7.5	205	214	198	215	224	-2.5	198	188	203	183	182
7	210	206	204	205	221	-3	217	172	206	194	194
6.5	221	206	193	190	215	-3.5	214	181	205	191	202
6	219	207	188	201	223	-4	207	197	182	191	200
5.5	208	212	192	208	219	-4.5	195	197	223	195	195
5	214	201	165	205	226	-5	212	206	210	212	215
4.5	209	209	195	198	208	-5.5	216	192	145	199	203
4	205	189	199	199	216	-6	219	199	200	198	204
3.5	200	192	179	193	206	-6.5	214	207	207	209	201
3	178	189	171	200	221	-7	208	193	207	203	201
2.5	178	186	159	186	213	-7.5	207	201	218	220	202
2	171	181	162	182	196	-8	221	200	220	-	223
1.5	175	168	154	177	190	-8.5	208	208	186	-	213
1	187	171	160	185	183	-9	221	201	214	-	224
0.5	187	171	163	181	180	-9.5	215	205	193	-	219
0	189	185	166	176	193	-10	-	-	192	-	207



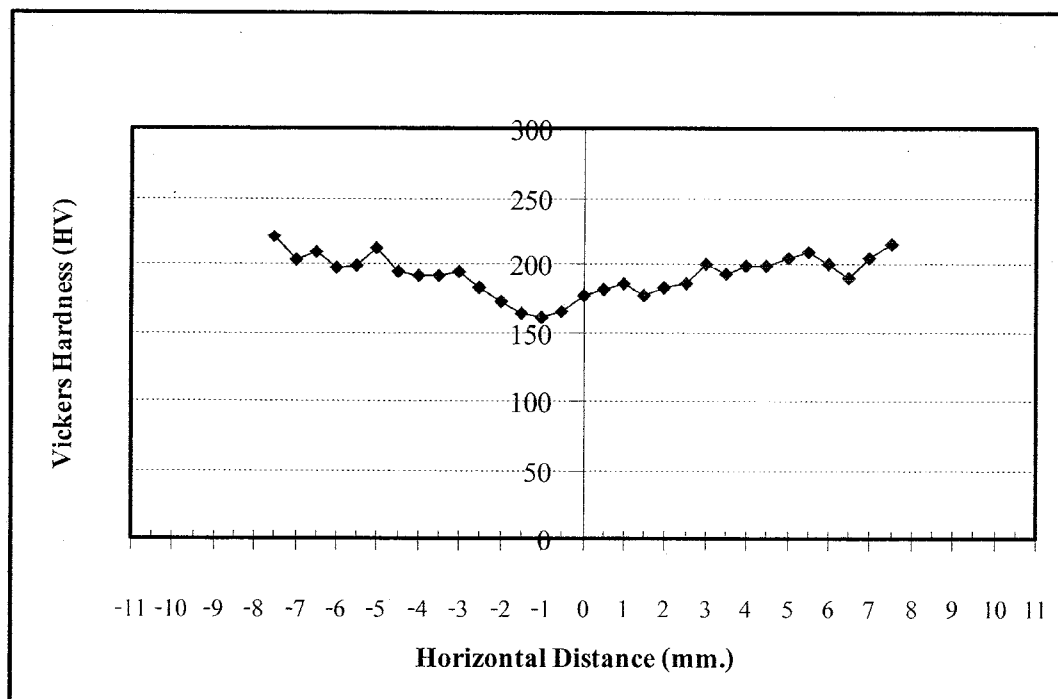
ภาพที่ 5.4 กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 10 Bar



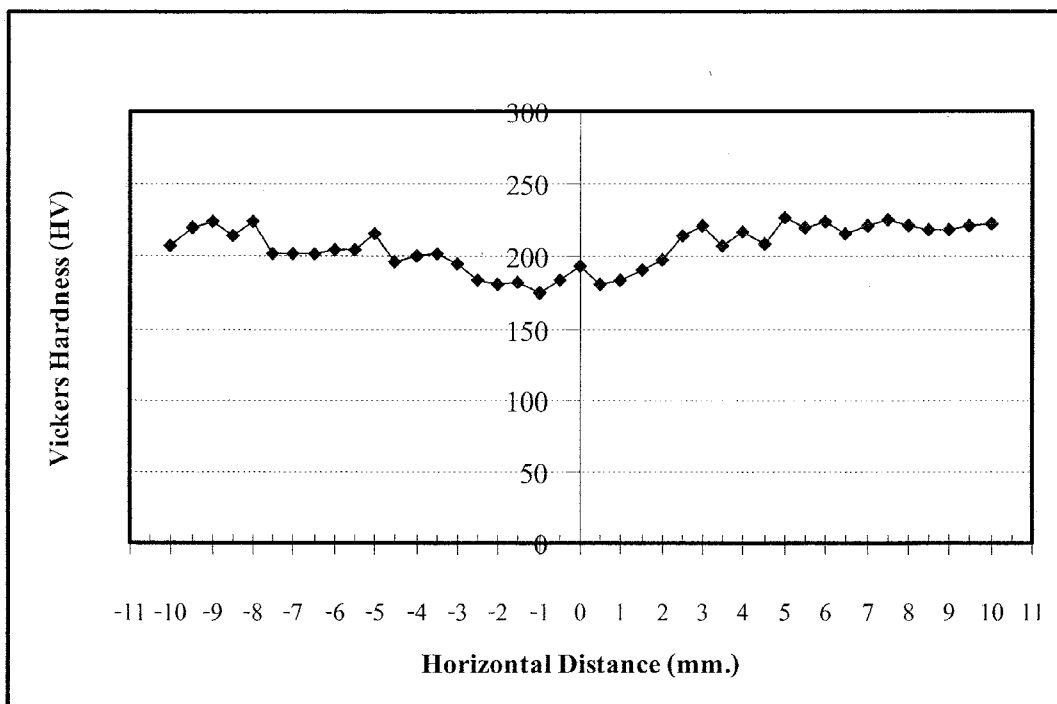
ภาพที่ 5.5 กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 15 Bar



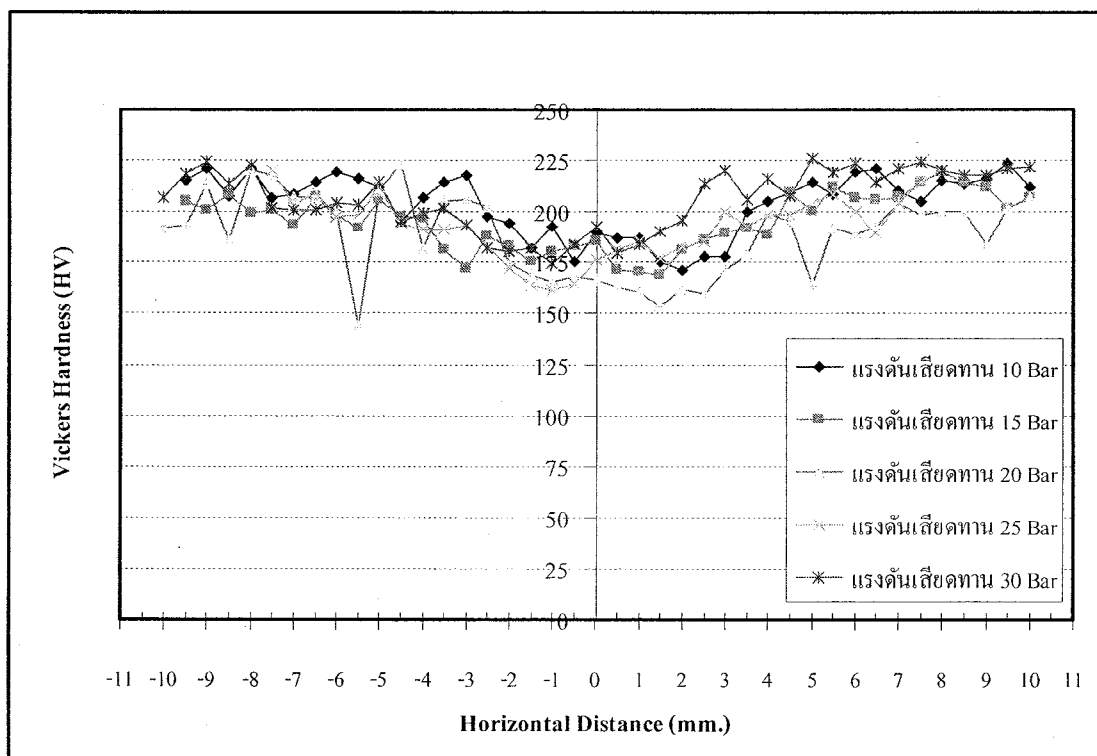
ภาพที่ 5.6 กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 20 Bar



ภาพที่ 5.7 กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 25 Bar



ภาพที่ 5.8 กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเลี้ยว 30 Bar



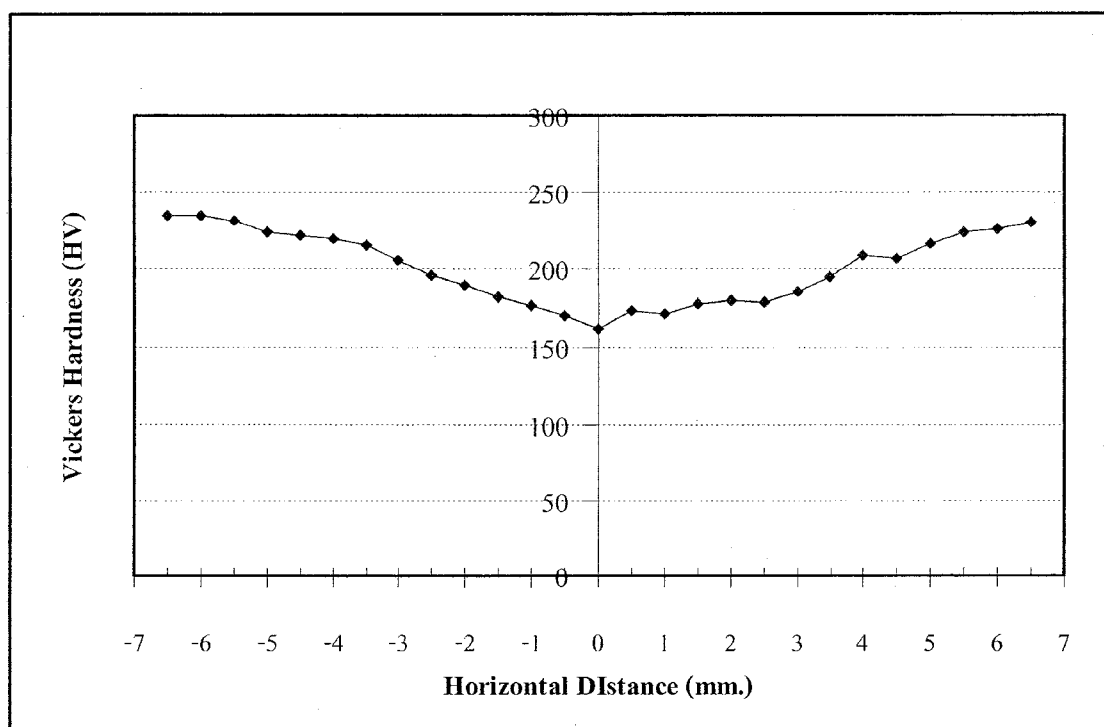
ภาพที่ 5.9 กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเลี้ยว 10, 15, 20, 25 และ 30 Bar

5.3.2 ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันและเวลาในการเสียดทานที่เหมาะสม

จากการทดสอบหาเงื่อนไขของแรงดันในการเสียดทานและเวลาในการเสียดทานที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 5.2 พบว่าแรงดันในการเสียดทาน 10 Bar เวลาในการเสียดทาน 3 Sec. แรงดันในการอัด 60 Bar เวลาในการอัด 3 Sec. และความเร็วในการหมุนชิ้นงานเชื่อม 1,200 rpm เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้ จึงได้นำเงื่อนไขที่เหมาะสมนี้มาทำการเชื่อมชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้นงาน และนำชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นงานมาทำการทดสอบหาค่าความแข็งของรอยเชื่อมในแนวแกน X ตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้ว ผลที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อมนำมาเฉลี่ยทั้ง 5 ชิ้นงานได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5.8 และภาพที่ 5.10 และพบว่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ตำแหน่งที่ชิ้นงานชนสัมผัสกันความแข็งมีค่าต่ำกว่าตำแหน่งอื่น เนื่องจากที่รอยเชื่อมมีเฟสของ Pearlite ที่มีความแข็งมากกว่า Ferrite สดลงโดยมีลักษณะคล้ายแอ่งกระทะหงาย ที่ตำแหน่งไกลจากจุดชนสัมผัสนี้ออกไปค่าความแข็งจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่าคงที่เท่ากับชิ้นงานเดิม

ตารางที่ 5.8 ค่าความแข็งที่เงื่อนไข แรงดันการเสียดทาน 10 Bar เวลาการเสียดทาน 9 Sec.

ระยะ (mm.)	ชิ้นงานเชื่อมที่					ค่าเฉลี่ย (HV)	ระยะ (mm.)	ชิ้นงานเชื่อมที่					ค่าเฉลี่ย (HV)
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
6.5	230	225	233	240	226	231	0	162	157	159	165	164	162
6	244	223	220	238	205	226	-0.5	176	160	151	181	183	170
5.5	225	242	220	220	214	224	-1	172	166	158	182	205	177
5	223	216	232	201	210	217	-1.5	172	158	189	195	198	182
4.5	220	210	218	200	186	207	-2	169	174	190	188	228	190
4	230	204	213	201	197	209	-2.5	164	178	214	200	225	196
3.5	224	191	187	183	189	195	-3	192	200	199	219	222	206
3	214	183	173	173	185	186	-3.5	214	217	211	219	218	216
2.5	196	173	170	177	178	179	-4	234	221	210	191	241	220
2	181	163	176	193	186	180	-4.5	211	225	212	235	228	222
1.5	177	170	165	190	187	178	-5	214	230	211	-	241	224
1	178	157	168	182	169	171	-5.5	224	233	239	-	-	232
0.5	179	160	173	171	183	173	-6	235	241	229	-	-	235
0	162	157	159	165	164	162	-6.5	250	232	223	-	-	235

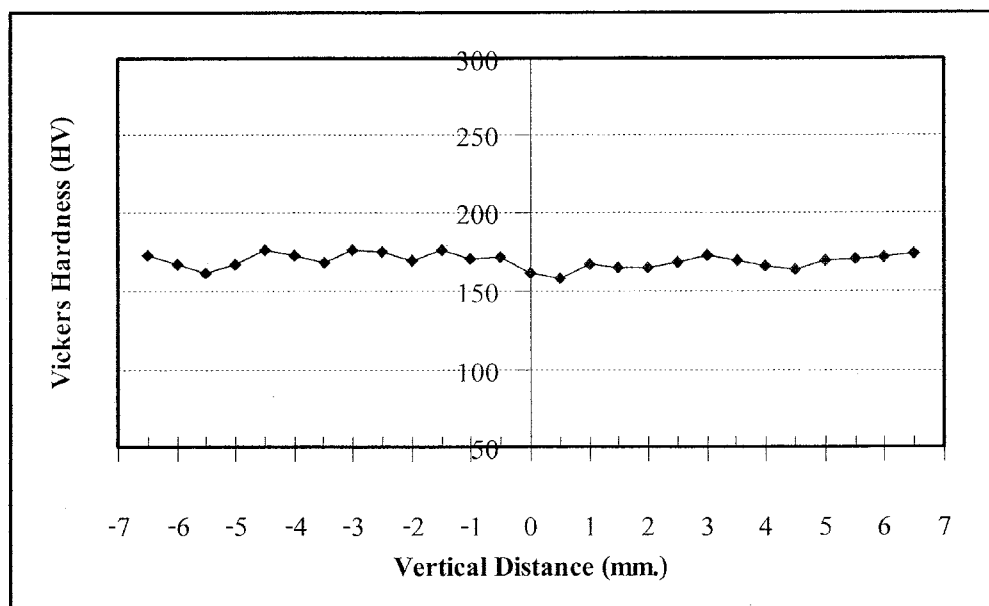


ภาพที่ 5.10 กราฟค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 10 Bar เวลาในการเสียดทาน 9 Sec. (เฉลี่ยจากชิ้นงาน 5 ชิ้น)

จากตารางที่ 5.8 และภาพที่ 5.10 ได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งในแนวแกน X ซึ่งพบว่าจุดเชื่อมต่อหรือจุดที่ชิ้นงานเชื่อมทั้งสองชนสัมผัสกันนั้น มีค่าความแข็งต่ำกว่าจุดอื่นๆ จึงทำการทดสอบหาค่าความแข็งของจุดเชื่อมต่อในแกน Y ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ง) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อแนวเชื่อมต่อของหน้าสัมผัสทั้งสองของชิ้นงานเชื่อมต่อกัน โดยการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบค่าความแข็งในแนวแกน Y ด้วยการวัดค่าความแข็งตลอดทั้งหน้าสัมผัสของชิ้นงาน 3 ชิ้นงาน และใช้เงื่อนไขการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เหมาะสมที่สุดดังที่ได้อธิบายมาแล้วในข้อที่ 5.2 ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 5.9 และภาพที่ 5.11 จากลักษณะของการเชื่อมด้วยความเสียดทานแนวเชื่อมต่อจะมีขนาดกว้างมากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม เนื่องจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นใช้แรงดันในการอัดเชื่อมชิ้นงานสูงทำให้แนวเชื่อมต่อของชิ้นงานบานออกดังภาพที่ 4.8 เมื่อนำชิ้นงานมาทำการทดสอบค่าความแข็งจะพบว่าระยะที่ทำการวัดมีความกว้างมากกว่าชิ้นงานเดิม (ชิ้นงานเดิมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm.) ผลที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็งในแนวแกน Y พบว่าค่าความแข็งตลอดแนวแกน Y มีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งของวัสดุเดิม (เหล็กชนิด AISI 1015)

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบค่าความแข็งของจุดเชื่อมต่อในแนวแกน Y

ระยะ (mm.)	ชั้นงานเชื่อมที่			ค่าเฉลี่ย (HV)	ระยะ (mm.)	ชั้นงานเชื่อมที่			ค่าเฉลี่ย (HV)
	1	2	3			1	2	3	
-6.5	171	165	183	173	0	158	159	168	162
-6	159	171	169	167	0.5	159	160	156	158
-5.5	161	165	160	162	1	167	163	172	167
-5	164	169	167	167	1.5	167	166	164	165
-4.5	175	176	178	176	2	168	161	167	165
-4	175	165	179	173	2.5	170	167	167	168
-3.5	169	165	172	168	3	171	177	170	172
-3	165	168	194	176	3.5	174	169	165	169
-2.5	172	171	183	175	4	172	162	163	166
-2	179	158	171	169	4.5	162	166	163	163
-1.5	172	176	180	176	5	166	171	171	169
-1	175	168	169	171	5.5	165	174	172	170
-0.5	173	172	168	171	6	173	176	167	172
0	158	159	168	162	6.5	185	170	169	174

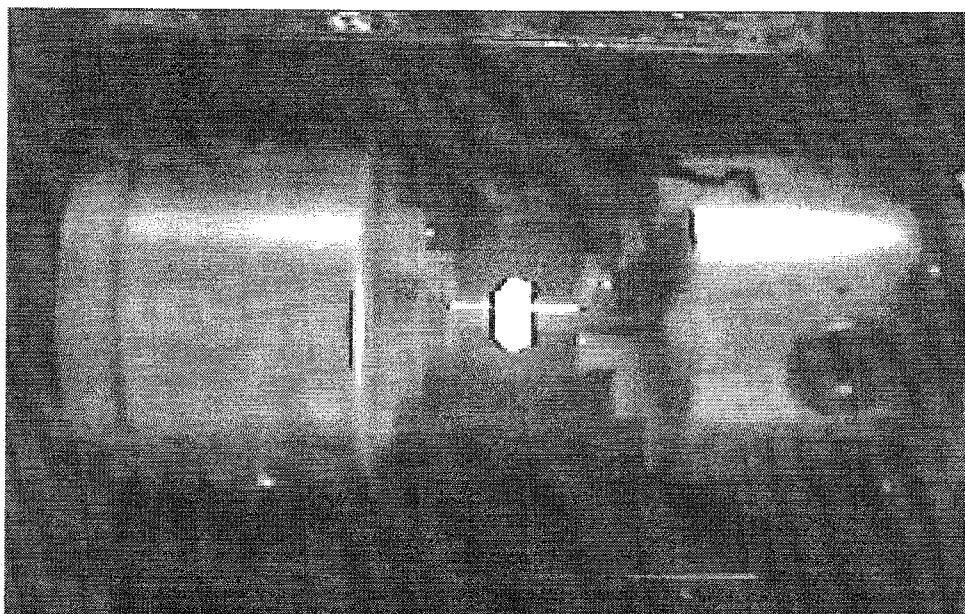


ภาพที่ 5.11 กราฟค่าความแข็งในแนวแกน Y

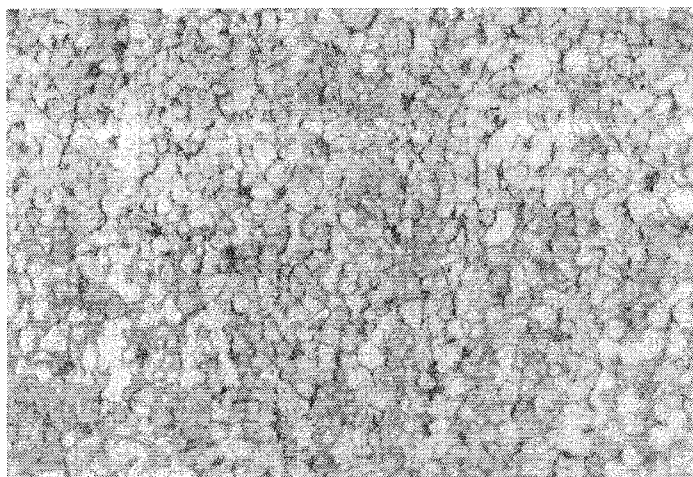
5.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุดภาค.

5.4.1 การวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุดภาค

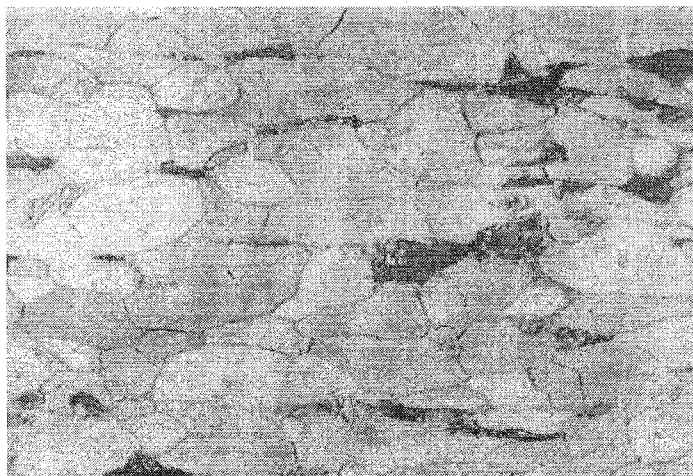
จากผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่าที่ตำแหน่งรอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงขึ้น แต่มีค่าความแข็งลดลง เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุดภาคของรอยเชื่อมด้วยการนำชิ้นงานส่วนที่เชื่อมต่อกัน มาถ่ายภาพเพื่อทำการวิเคราะห์จากภาพถ่ายในเบื้องต้น ก่อนผลการวิเคราะห์จากภาพที่ 5.13 ซึ่งเป็นภาพถ่ายที่จุดเชื่อมต่อของชิ้นงานเชื่อมทั้งสอง พบว่าเกรนของเหล็กหลังการเชื่อมด้วยความเสียดทานมีความละเอียดมากกว่าเกรนที่แสดงในภาพที่ 5.14 ซึ่งเป็นภาพถ่ายของเกรนเหล็กเดิมก่อนนำมาทดลองเชื่อมด้วยความเสียดทาน และจากการวิเคราะห์จากภาพที่ 5.13 และภาพที่ 5.14 สามารถอธิบายถึงค่าความแข็งแรงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่แนวเชื่อมได้ดังนี้คือ การเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นในระหว่างการเชื่อมได้ให้แรงดันในการเสียดทานจนกระทั่งหน้าสัมผัสของชิ้นงานเชื่อมทั้งสองเกิดความร้อนใกล้หลอมละลายดังภาพที่ 5.12 จากนั้นจึงให้แรงดันที่สูงมากอัดให้ชิ้นงานทั้งสองเชื่อมติดกัน ซึ่งในขบวนการเชื่อมนี้จะดันให้เกรนของเหล็กที่เสียดสีกันจนใกล้หลอมละลายถูกอัดเข้าหากันเป็นผลให้เกรนของเหล็กที่แนวเชื่อมถูกอัดแน่นจนมีขนาดที่ละเอียดมากขึ้นกว่าเดิม และจากเกรนที่ละเอียดมากขึ้นกว่าเดิมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงที่รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิมดังผลการทดลองที่ได้



ภาพที่ 5.12 ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเสียดสีกันก่อนการดันอัดให้เชื่อมต่อกัน



ภาพที่ 5.13 เกรนที่จุดเชื่อมต่อถ่ายที่กำลังขยาย 50 X และลดขนาดลง 50 %



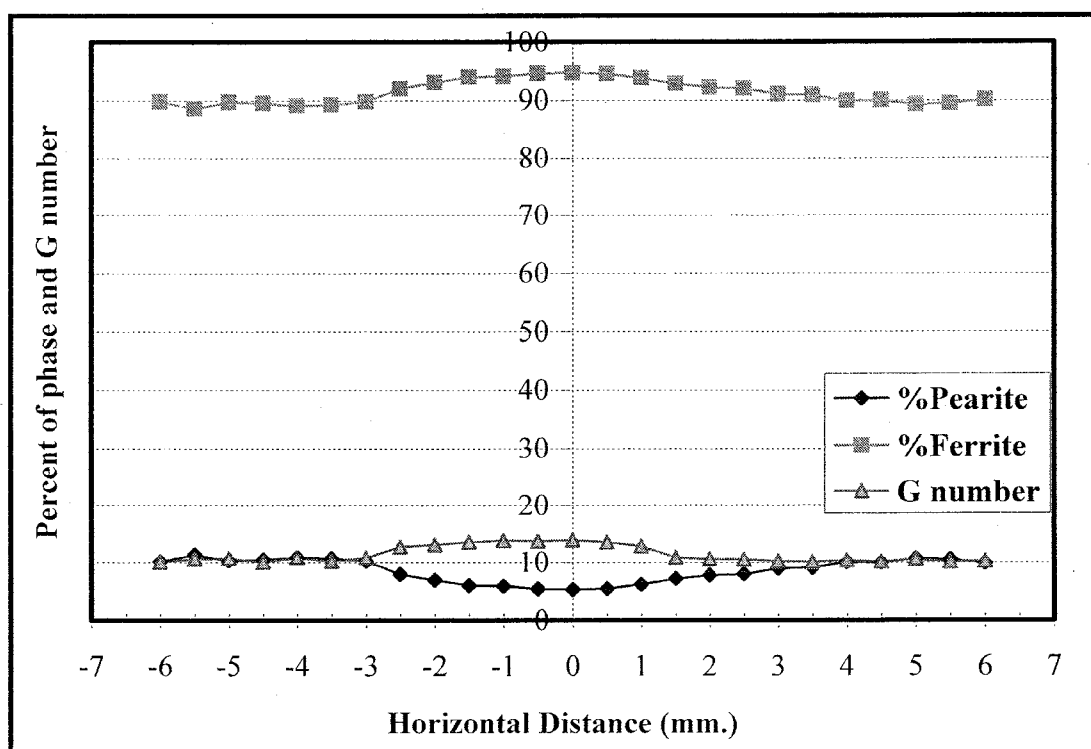
ภาพที่ 5.14 เกรนของเหล็ก AISI 1015 ก่อนการเชื่อมถ่ายที่กำลังขยาย 50 X และลดขนาดลง 50%

5.4.2 การวิเคราะห์เฟสและขนาดของเกรน (G number)

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงที่รอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเสียดทานมีค่าความแข็งแรงมากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม แต่กลับพบว่าค่าความแข็งแรงที่รอยเชื่อมมีค่าลดลง จึงนำภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่รอยเชื่อมมาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Image Analyser เพื่อหาอัตราส่วนความแตกต่างกันของโครงสร้างภายในชิ้นงานเชื่อม ในแนวแกน X ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค พบว่าที่รอยเชื่อมมีเฟสของ Pearlite และ ferrite เป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้าง และพบว่าที่รอยเชื่อมจะมีปริมาณของ Pearlite น้อยกว่าจุดที่ห่างออกไป ดังแสดงผลในตารางที่ 5.10 และกราฟในภาพที่ 5.15

ตารางที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของ Pearlite และ Ferrite รวมถึงขนาดของเกรน (G number) ที่ระยะต่างๆ

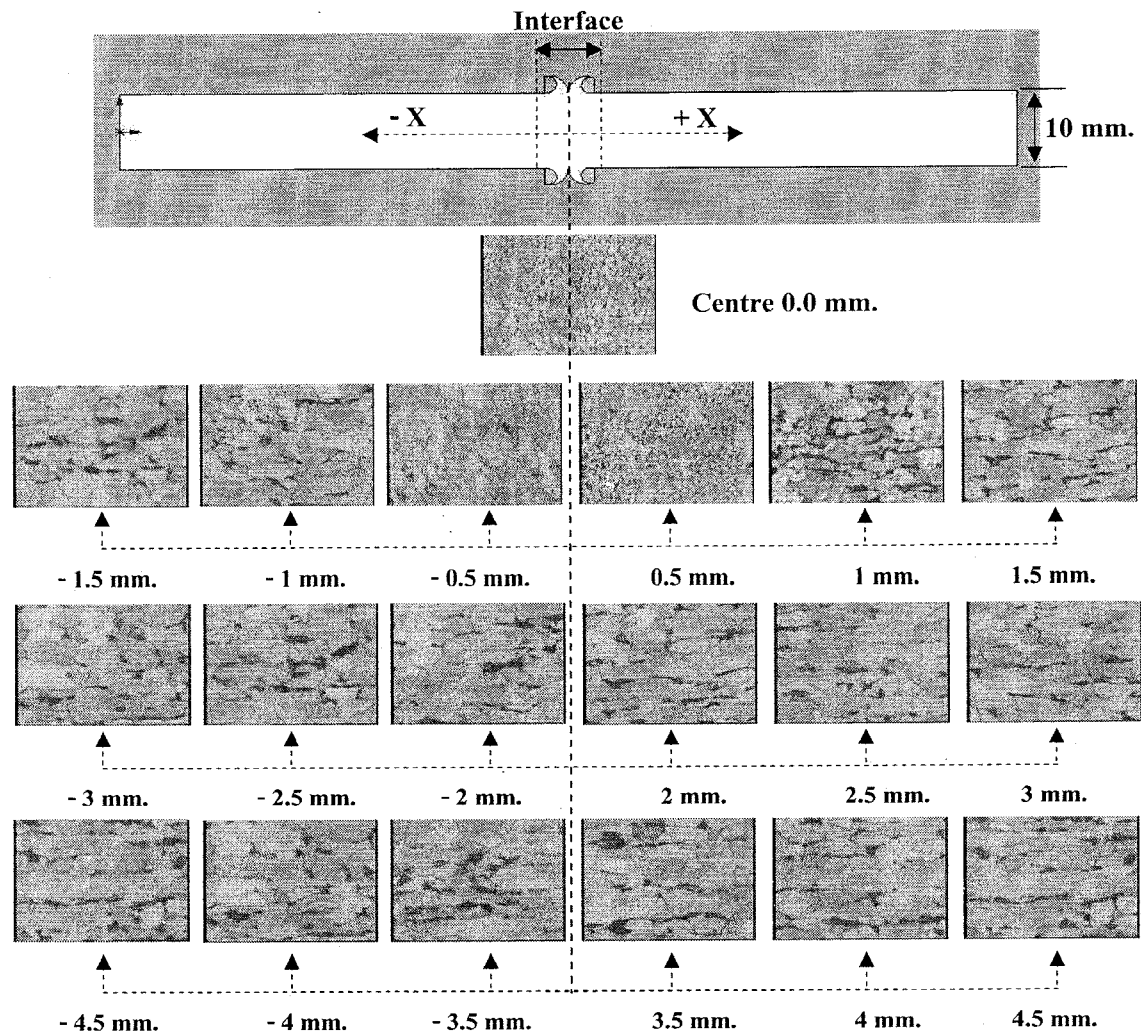
- X mm.	- 6	- 5.5	- 5	- 4.5	- 4	- 3.5	- 3	- 2.5	- 2	- 1.5	- 1	- 0.5	0
%Pearlite	10.13	11.34	10.23	10.50	10.84	10.68	10.18	7.92	6.92	5.99	5.88	5.42	5.27
%Ferrite	89.87	88.66	89.77	89.50	89.16	89.32	89.82	92.08	93.08	94.01	94.12	94.58	94.73
Gnumber	10.05	10.58	10.71	10.05	10.87	10.18	10.78	12.72	13.08	13.58	13.85	13.71	13.87
+ Xmm.	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
%Pearlite	5.27	5.45	6.17	7.19	7.78	7.99	8.91	9.11	10.03	9.98	10.72	10.53	9.86
%Ferrite	94.73	94.55	93.85	92.81	92.22	92.01	91.09	90.89	89.97	90.02	89.28	89.47	90.14
Gnumber	13.87	13.56	12.85	10.88	10.61	10.53	10.23	10.09	10.34	10.17	10.56	10.08	10.28



ภาพที่ 5.15 กราฟการเปลี่ยนแปลงของ Pearlite, Ferrite และ G number บริเวณแนวเชื่อมต่อและ ส่วนที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม

ผลที่ได้จากการทดสอบในตารางที่ 5.10 และภาพที่ 5.15 แสดงให้เห็นว่าบริเวณรอยเชื่อมมี ferrite มากขึ้นและ Pearlite ลดลง ซึ่งโดยทฤษฎีแล้ว Pearlite จะมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 175 - 370 BHN และ ferrite มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 70 - 150 BHN เมื่อปริมาณของ Pearlite ลดลงก็

จะส่งผลให้รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงลดลงไปด้วยดังแสดงในภาพที่ 5.10 เมื่อห่างไกลออกไปจากรอยเชื่อมอิทธิพลของการเสียดทานเริ่มลดลง เป็นผลให้ค่าความแข็งแรงเข้าใกล้ชิ้นงานเดิมมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่แสดงถึงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของขนาดเกรน และระยะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ดังแสดงไว้ในภาพที่ 5.16



ภาพที่ 5.16 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ระยะต่างๆ โดยภาพขยายขนาด 50 X

จากภาพที่ 5.16 จะสังเกตเห็นได้ว่าในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่จุดกึ่งกลางของรอยเชื่อมจะมีเกรนที่เล็ก หรือละเอียดมากกว่าเกรนในภาพถ่ายที่อยู่ห่างออกไปจากรอยเชื่อม ซึ่งจะสามารถเปรียบเทียบได้จากค่า G number ในตารางที่ 5.9 และกราฟแสดงผลในภาพที่ 5.15 โดยค่าตัวเลข G number จะบ่งบอกถึงขนาดของเกรนจากตารางที่กล่าวมาค่าตัวเลขมากแสดงว่าเกรนมีขนาดเล็กและค่าตัวเลขน้อยเกรนจะมีขนาดใหญ่ ในส่วนของเฟสที่เกิดขึ้นจากภาพถ่ายโครงสร้าง

จุลภาค พบว่า Pearlite ซึ่งจะมองเห็นเป็นสีดำ และ ferrite ที่จะมองเห็นเป็นสีขาวหรือเทา มีความแตกต่างให้เห็นอย่างชัดเจน โดยภาพที่จุดกึ่งกลางของรอยเชื่อมมีเกรนที่ละเอียดและเป็นสีเทา - ขาว ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณของ Pearlite น้อย และเมื่อออกห่างจากจุดกึ่งกลางไปเรื่อยๆ จะเห็นว่ามีเกรนที่เป็นสีดำปะปนอยู่ แสดงว่ามีปริมาณของ Pearlite เพิ่มมากขึ้น โดยเทียบจากตารางที่ 5.9 และกราฟแสดงผลในภาพที่ 5.15 จากผลการทดลองที่ผ่านเกรนที่รอยเชื่อมมีความละเอียดมากกว่าจุดอื่นๆ ที่ห่างออกไปส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม และการที่ปริมาณของ Pearlite ที่รอยเชื่อมมีน้อยลงจะส่งผลให้ค่าความแข็งที่รอยเชื่อมมีค่าลดลง ดังแสดงในผลการทดลองที่ผ่านมา

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

6.1.1 ผลจากการพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

จากการพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าเครื่องเชื่อมที่ทำการพัฒนาใหม่ สามารถทำงานได้ดีตามเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งขั้นตอนการทำงานต่างๆ ที่เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถทำงานได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.14

อนึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมานี้ยังสามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า หรือเล็กกว่าขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองนี้ (ชิ้นที่ใช้ในการทดลองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm.) และสามารถนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ ที่จะมีผลกระทบต่อการเชื่อมวัสดุชนิดต่างๆ ต่อไปได้

6.1.2 ผลการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน

6.1.2.1 จากการทดลองเชื่อมเหล็กชนิด AISI 1015 พบว่ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน ตามเงื่อนไขการเชื่อมที่แรงดันในการเสียดทาน 10 Bar เวลาในการเสียดทาน 9 Sec. แรงดันในการอัด 60 Bar เวลาในการอัด 3 Sec. และความเร็วรอบในการหมุนชิ้นเชื่อมที่ 1,200 rpm ให้ผลการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุดคือ มีค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ 913 MPa ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงที่มากกว่าชิ้นงานเดิม 17.09 % (ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเดิม 780 MPa) และผลของค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม ที่ได้จากการเชื่อมด้วยวิธีการนี้ เกิดจากแรงดันในการอัดเชื่อมชิ้นงานอัดให้เกรนบริเวณรอยเชื่อมมีความละเอียด หรือมีจำนวนมากขึ้นจึงส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม

6.1.2.2 ผลจากทดสอบค่าความแข็งที่เกิดขึ้นที่รอยเชื่อมด้วยเครื่อง Vickers Hardness (HV) พบว่าค่าความแข็งที่รอยเชื่อมมีค่าความแข็งลดลง ซึ่งค่าความแข็งที่ลดลงนี้ เกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมทำให้เปอร์เซ็นต์ของ Pearlite ลดน้อยลง และมี Ferrite เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะห่างออกมาจากรอยเชื่อม ผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมไม่ส่งอิทธิพลถึง จึงส่งผลค่าความแข็งกลับเข้าใกล้ค่าความแข็งเดิมของวัสดุ

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ในส่วนของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนา

6.2.1.1 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่พัฒนา ยังมีอาการสั่นของเครื่องในขณะที่เครื่องทำการเชื่อมอยู่ ควรมีการแก้ไขในส่วนของ โครงสร้างให้มีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม

6.2.1.2 ในส่วนของหัวจับชิ้นงานเชื่อมที่มีขนาดเล็ก และเป็นหัวจับแบบ 3 ทาง ทำให้การจับชิ้นงานเชื่อมได้ไม่แน่น และจับชิ้นงานทรงกลมได้ลักษณะเดียว ซึ่งเป็นส่วนที่น่าจะแก้ไขให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และเป็นหัวจับแบบ 4 ทิศทาง เพื่อที่จะสามารถจับงาน ได้อย่างแน่นอนหนาและชิ้นงานเชื่อมที่มีรูปทรงลักษณะอื่นๆ ได้

6.2.1.3 ระยะห่างของหัวจับชิ้นงานเชื่อมทั้ง 2 ด้าน มีระยะห่างน้อยเนื่องจากกระบอกไฮดรอลิกส์มีระยะชักสั้น ควรมีการแก้ไขให้มีระยะชักที่ยาวมากกว่า เพื่อที่จะสามารถนำชิ้นงานเข้าออกได้ง่าย

6.2.2 ในส่วนของผลการทดลอง

6.2.2.1 จากผลการทดลองหาค่าความแข็งแรงที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ มาจากการทดสอบในเบื้องต้นของตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงเพียง 2 ตัวแปรเท่านั้นคือ แรงดันในการเสียดทานที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 Bar และเวลาในการเสียดทานที่ 7, 9, 11, 13 และ 15 Bar ซึ่งผลที่ได้ถือว่าเป็นผลที่ได้จากเงื่อนไขที่เหมาะสมของ 2 ตัวแปรนี้เท่านั้น ควรที่จะทำการศึกษาผลการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ในเชิงสถิติจากเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆ เช่น แรงดันในการอัด เวลาในการอัด และความเร็รรอบในการหมุนชิ้นงานเชื่อม

6.2.2.2 จากผลการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อมสิ่งที่พบคือ ค่าความแข็งที่รอยเชื่อมลดลงนั้น ควรที่จะมีศึกษาถึงอุณหภูมิที่รอยเชื่อม ซึ่งเป็นตัวแปรที่อาจส่งผลถึงคุณสมบัติของวัสดุ และวิธีการที่จะทำให้ค่าความแข็งที่รอยเชื่อมเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่น่าจะทำการศึกษาวิจัยต่อไป

6.2.2.3 จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่แรงดันเสียดทาน 10 Bar ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด แต่ยังคงแสดงแนวโน้มที่อาจจะสูงขึ้นได้อีก ดังนั้นจึงอาจทำการศึกษาที่แรงดันเสียดทานน้อยกว่า 10 Bar เพิ่มเติม เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนขึ้น

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sahin, M. and Akata, H.E. “Joining with friction welding of plastically deformed steel”, Journal of Materials Processing Technology. 142: 239-246, 2003.
- [2] Sahin, M. (a) “Evaluation of the joint – interface properties of austenitic – stainless steels (AISI304) joined by friction welding”, Materials and Design. 28: 2244-2250, 2007.
- [3] Ates, H., Turker, M. and Kurt, A. “Effect of friction pressure on the friction-welded MA956 iron-based superalloy”, Materials and Design. 28: 948-953, 2007.
- [4] Ozdemir, N., Sarsilmaz, F. and Hascalik, A. “Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welding AISI 304L to 4340 steel”, (Short communication) Materials and Design. 28: 301-307, 2007.
- [5] Sathiya, P., Aravindan S. and Haq, A.N. “Some experimental investigation on friction welded stainless steel joints”, Materials and Design. 29: 1099-1109, 2008.
- [6] Hascalik A. and Orhan, N. “Effect of particle size on friction welding of Al₂O₃ reinforced 6160 Al alloy composite and SAE 1020 steel”, Materials and Design. 28: 313-317, 2007.
- [7] Jayabharath, K., and et al. “Investigations on the continuous drive friction welding of sintered powder metallurgical (P/M) steel and wrought copper parts”, Materials Science and Engineering. 454-455: 114-123, 2007.
- [8] Meshram, S.D., Mohandas T. and Reddy, G.M. “Friction welding of dissimilar pure metals”, Journal of Materials Processing Technology. 184: 330-337, 2007.
- [9] Ma, T.J., Li, w.-Y. and Yang, S.Y. “Impact toughness and fracture analysis of linear friction welded Ti – 6Al – 4V alloy joints”, Materials and Design. 2008.
- [10] Noh, M.Z., Hussain, L.B. and Ahmad, Z.A. “Alumina – mild steel friction welded at lower rotational speed”, Journal of Materials Processing Technology. 204: 279-283, 2008.
- [11] Shin, H.S., Jeong, Y.J. and Choi, H.Y. “Joining of Zr-based bulk metallic glasses using the friction welding method.”, Journal of Alloys and Compounds. 434-435: 102-105, 2007.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

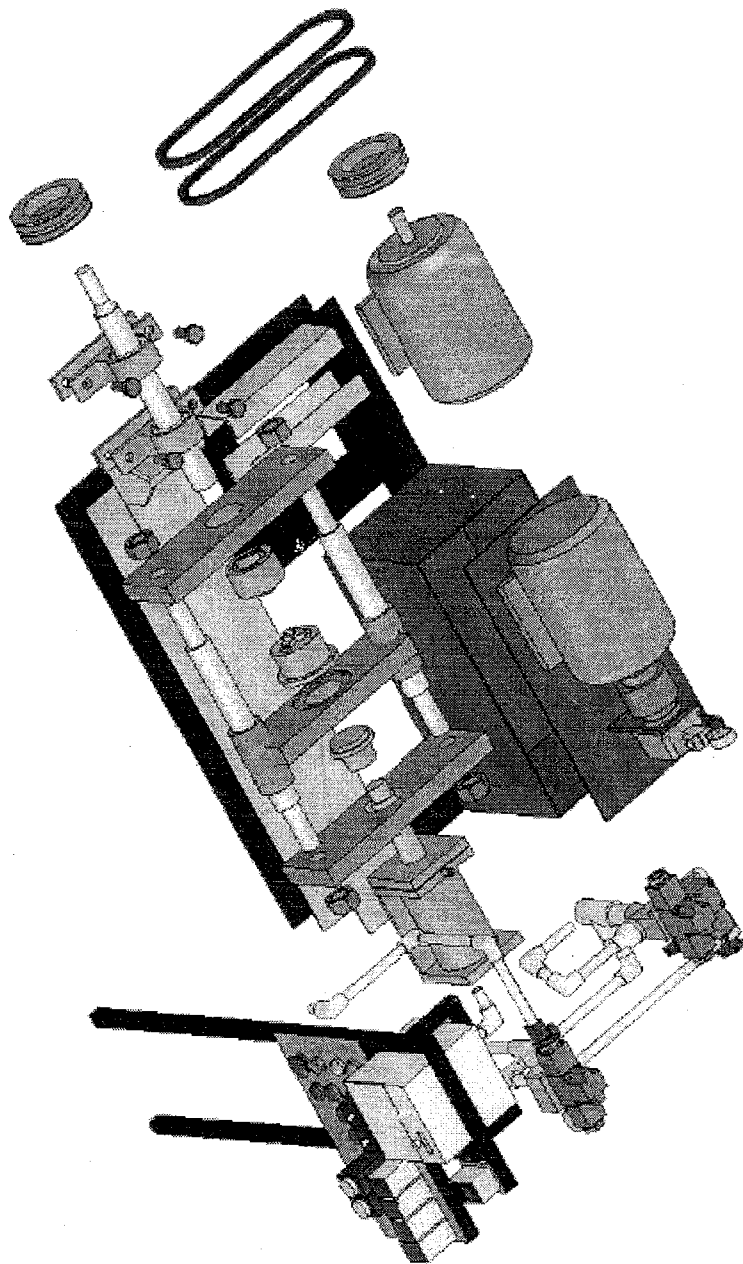
- [12] Uwada, T., and et al. “Properties of friction welds between 9Cr-ODS martensitic and ferritic-martensitic steel”, Journal of Nuclear Materials. 367-370: 1213-1217, 2007.
- [13] Sahin, M. (b) “Characterization of properties in plastically deformed austenitic – stainless steels joined by friction welding”, Materials and Design. 30: 135-144, 2009.
- [14] Luo, J., and et al. “A new mixed – integrated approach to control welded flashes forming process of damping – tube – gland in continuous drive friction welding”, Materials and Design. 30: 353-358, 2009.
- [15] Li, W.-Y., and et al. “Effect of friction time on flash shape and axial shortening of linear friction welded 45 steel”, Materials Letters. 62: 293-296, 2008.
- [16] Karadge, M., and et al. “Texture development in ti-6Al-4V linear friction welds”, Materials Science and Engineering. A459: 182-191, 2007.
- [17] Balasubramanian, V. “Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters”, Materials Science and Engineering. 480 : 163-175, 2008.
- [18] G.Precision Engineering Ltd.,Part. www.gprecision.net/steel-Ternary-System.html. 18 พฤศจิกายน, 2551.
- [19] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2549.
- [20] วีระบุษย์ นนทพันธ์ และอำนาจ บุญยะวัน. การศึกษาและออกแบบเบื้องต้นสำหรับระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2550.

ภาคผนวก

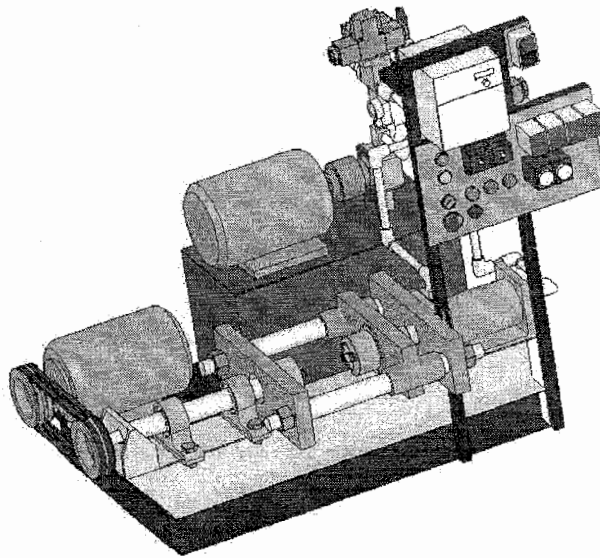
ภาคผนวก ก
แบบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

ภาคผนวก ก
แบบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

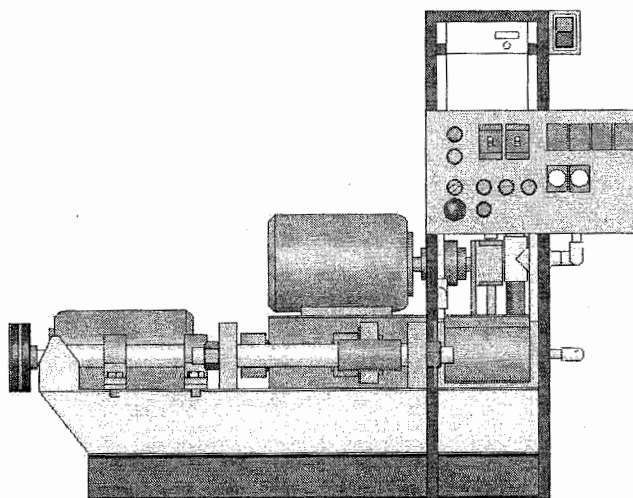
1. ภาพแบบของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา



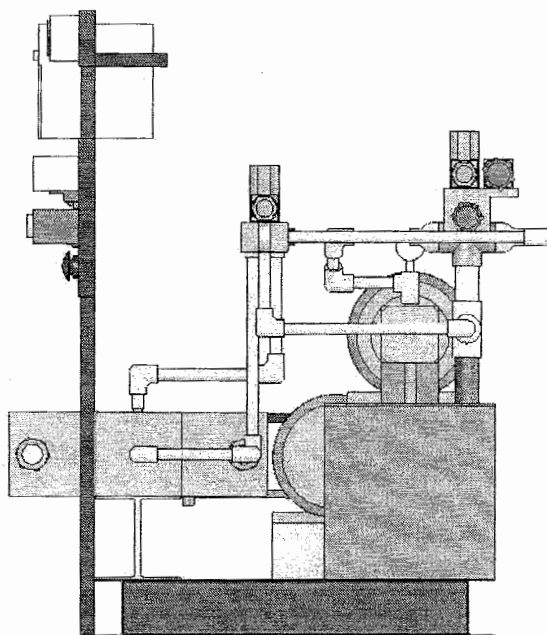
ภาพที่ ก.1 ภาพแยกชิ้นส่วนของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา



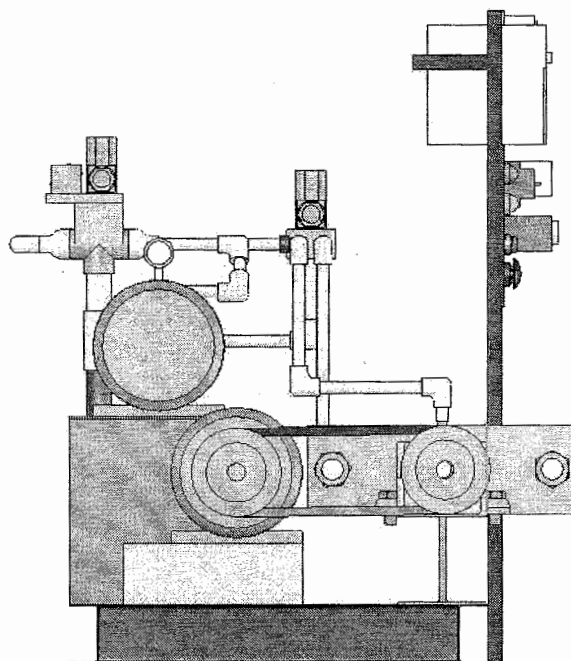
ภาพที่ ก.2 ภาพมุมมองของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา



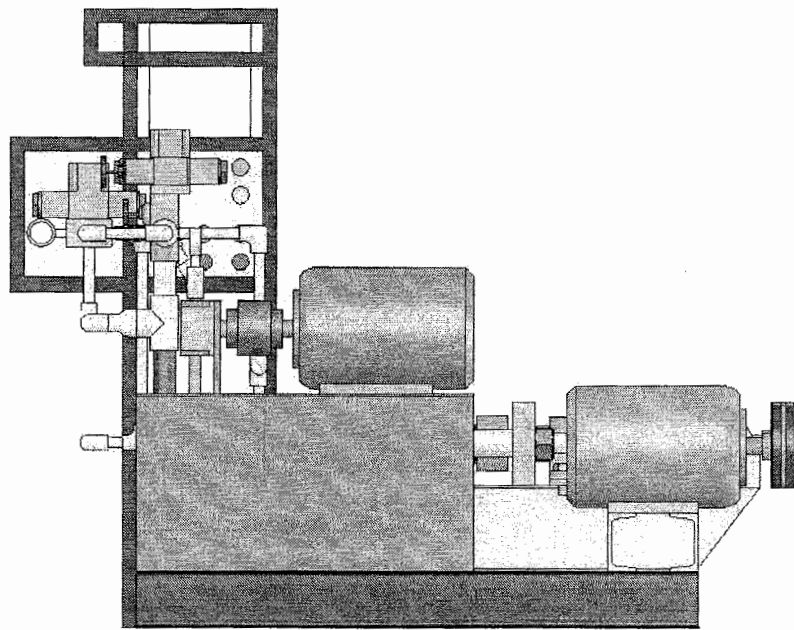
ภาพที่ ก.3 ภาพด้านหน้าของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา



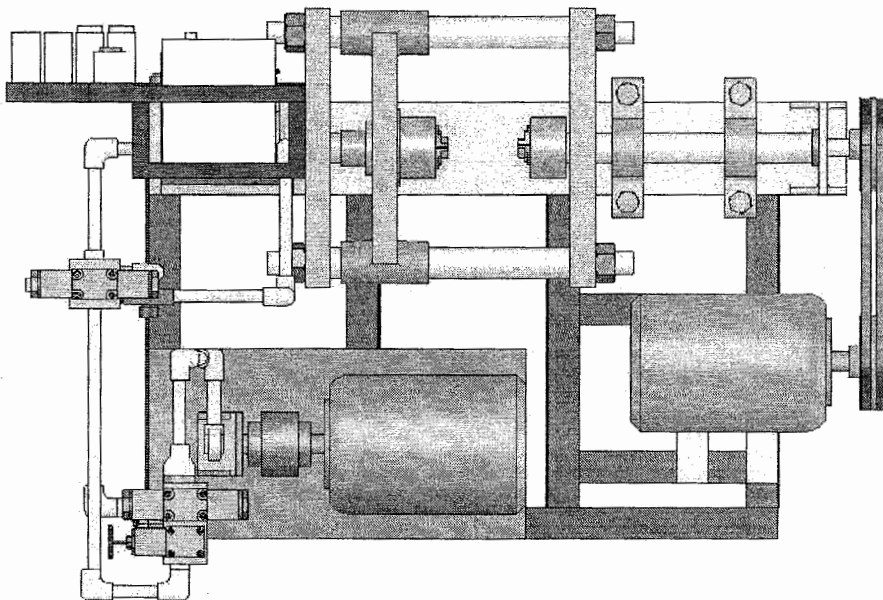
ภาพที่ ก.4 ภาพด้านข้าง (ขวา) ของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา



ภาพที่ ก.5 ภาพด้านข้าง (ซ้าย) ของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา



ภาพที่ ก.6 ภาพด้านหลังของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา



ภาพที่ ก.7 ภาพด้านบนของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่ได้รับการพัฒนา

ภาคผนวก ข

ตารางวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานก่อนการเชื่อมและหลังการเชื่อม

ภาคผนวก ข

ตารางวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานก่อนการเชื่อมและหลังการเชื่อม

1. ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุก่อนทำการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีชิ้นงานเดิมชิ้นที่ 1 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง

ผลการ Spectrometer ชิ้นงานเดิมที่ 1 (Base Iron 1)							
ครั้งที่	% C2	% Si1	% S	% P1	% Mn3	% Ni2	% Cr1
1	0.12887	0.16183	0.02212	0.01884	0.37911	0.01723	0.02259
2	0.12468	0.16429	0.02277	0.01919	0.38284	0.01771	0.02307
3	0.13353	0.15994	0.02138	0.01866	0.38002	0.01800	0.02249
4	0.14200	0.16663	0.02272	0.01907	0.38025	0.01722	0.02257
5	0.15211	0.17902	0.02251	0.01714	0.39498	0.01723	0.02400
เฉลี่ย	0.13624	0.16634	0.02230	0.01858	0.38344	0.01748	0.02294

ครั้งที่	% Mo2	% V3	% Cu5	% W	% Ti4	% Sn2	% Co1
1	0.00391	0.00255	0.13929	0.00806	0.00054	0.00241	0.00566
2	0.00409	0.00261	0.14377	0.00855	0.00058	0.00250	0.00571
3	0.03397	0.00236	0.14280	0.00816	0.00050	0.00264	0.00561
4	0.00420	0.00278	0.14705	0.00857	0.00062	0.00255	0.00571
5	0.00577	0.00392	0.18667	0.01038	0.00098	0.00311	0.00608
เฉลี่ย	0.01039	0.00284	0.15192	0.00874	0.00064	0.00264	0.00575

ครั้งที่	% AL7	% Ph6	% B1	% Nb	% Zn5	% N1	% FE
1	0.00324	0.00494	0.00045	0.00655	0.00356	0.00591	99.0623
2	0.00331	0.00497	0.00044	0.00679	0.00363	0.00837	99.0501
3	0.00318	0.00424	0.00046	0.00636	0.00309	0.00164	99.0610
4	0.00359	0.00550	0.00043	0.00703	0.00402	0.17185	98.8656
5	0.00529	0.00865	0.00060	0.01048	0.00610	0.02702	98.9180
เฉลี่ย	0.00372	0.00566	0.00048	0.00744	0.00408	0.04296	98.9914

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีชิ้นงานเดิมชิ้นที่ 2 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง

ผลการ Spectrometer ชิ้นงานเดิมที่ 2 (Base Iron 2)							
ครั้งที่	% C2	% Si1	% S	% P1	% Mn3	% Ni2	% Cr1
1	0.14716	0.17901	0.02303	0.02604	0.43234	0.00988	0.01270
2	0.13801	0.16452	0.02176	0.02628	0.41554	0.01000	0.01160
3	0.15467	0.16872	0.02115	0.02349	0.41473	0.00937	0.01144
4	0.15451	0.17157	0.02200	0.02555	0.42077	0.00953	0.01171
5	0.15664	0.16941	0.02246	0.02563	0.41626	0.00962	0.01145
เฉลี่ย	0.15020	0.17065	0.02208	0.02540	0.41993	0.00968	0.01178

ครั้งที่	% Mo2	% V3	% Cu5	% W	% Ti4	% Sn2	% Co1
1	0.00363	0.00231	0.13331	0.00762	0.00050	0.00239	0.00466
2	0.00240	0.00119	0.10574	0.00483	0.00023	0.00181	0.00422
3	0.00219	0.00125	0.09488	0.00426	0.00027	0.00172	0.00410
4	0.00261	0.00151	0.10603	0.00437	0.00035	0.00184	0.00432
5	0.00225	0.00118	0.10018	0.00456	0.00025	0.00167	0.00415
เฉลี่ย	0.00262	0.00149	0.10803	0.00513	0.00032	0.00189	0.00429

ครั้งที่	% AL7	% Ph6	% B1	% Nb	% Zn5	% N1	% FE
1	0.00254	0.00408	0.00046	0.00584	0.00328	0.00808	98.9911
2	0.00118	0.00140	0.00031	0.00279	0.00154	0.01715	99.0675
3	0.00173	0.00144	0.00028	0.00276	0.00158	0.03619	99.0438
4	0.00212	0.00207	0.00031	0.00339	0.00211	0.07601	98.9773
5	0.00224	0.00142	0.00032	0.00264	0.00151	0.16656	98.8996
เฉลี่ย	0.00196	0.00208	0.00034	0.00348	0.00200	0.06080	98.9959

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีชิ้นงานเดิมชั้นที่ 3 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง

ผลการ Spectrometer ชิ้นงานเดิมที่ 3 (Base Iron 3)							
ครั้งที่	% C2	% Si1	% S	% P1	% Mn3	% Ni2	% Cr1
1	0.13426	0.16651	0.02126	0.01801	0.38626	0.01715	0.02312
2	0.13624	0.17230	0.02166	0.01885	0.39149	0.01742	0.02336
3	0.15359	0.18138	0.02083	0.01655	0.39795	0.01730	0.02408
4	0.13318	0.16476	0.01958	0.01870	0.38410	0.01742	0.02278
5	0.17032	0.17266	0.02213	0.02530	0.41892	0.01010	0.01172
เฉลี่ย	0.14552	0.17152	0.02109	0.01948	0.39574	0.01588	0.02101

ครั้งที่	% Mo2	% V3	% Cu5	% W	% Ti4	% Sn2	% Co1
1	0.00459	0.00290	0.15464	0.00828	0.00067	0.00261	0.00566
2	0.00481	0.00307	0.16573	0.00930	0.00079	0.00274	0.00571
3	0.00612	0.00406	0.19775	0.01171	0.00113	0.00332	0.00611
4	0.00472	0.00295	0.16344	0.00860	0.00068	0.00283	0.00575
5	0.00254	0.00135	0.10971	0.00544	0.00035	0.00186	0.00424
เฉลี่ย	0.00456	0.00287	0.15825	0.00867	0.00072	0.00267	0.00549

ครั้งที่	% AL7	% Ph6	% B1	% Nb	% Zn5	% N1	% FE
1	0.00375	0.00570	0.00048	0.00776	0.00433	0.00475	99.0273
2	0.00483	0.00634	0.00054	0.00821	0.00457	0.00172	99.0003
3	0.00648	0.00928	0.00061	0.01113	0.00657	0.00042	98.9236
4	0.00393	0.00610	0.00052	0.00804	0.00435	-0.00014	99.0277
5	0.00307	0.00205	0.00034	0.00315	0.00201	0.00000	98.2035
เฉลี่ย	0.00441	0.00589	0.00050	0.00766	0.00437	0.00135	98.8365

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีชิ้นงานเดิมชิ้นทั้ง 3 ชิ้น โดยนำผลที่ได้จากตาราง
ที่ ข.1 – 3 มาทำการเฉลี่ย

ผลการเฉลี่ยส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานเดิมทั้ง 3 ชิ้นงาน							
ชิ้นที่	% C2	% Si1	% S	% P1	% Mn3	% Ni2	% Cr1
1	0.13624	0.16634	0.0223	0.01858	0.38344	0.01748	0.02294
2	0.1502	0.17065	0.02208	0.0254	0.41993	0.00968	0.01178
3	0.14552	0.17152	0.02109	0.01948	0.39574	0.01588	0.02101
เฉลี่ย	0.14399	0.16950	0.02182	0.02115	0.39970	0.01435	0.01858

ชิ้นที่	% Mo2	% V3	% Cu5	% W	% Ti4	% Sn2	% Co1
1	0.01039	0.00284	0.15192	0.00874	0.00064	0.00264	0.00575
2	0.00262	0.00149	0.10803	0.00513	0.00032	0.00189	0.00429
3	0.00456	0.00287	0.15825	0.00867	0.00072	0.00267	0.00549
เฉลี่ย	0.00586	0.00240	0.13940	0.00751	0.00056	0.00240	0.00518

ชิ้นที่	% AL7	% Ph6	% B1	% Nb	% Zn5	% N1	% FE
1	0.00372	0.00566	0.00048	0.00744	0.00408	0.04296	98.9914
2	0.00196	0.00208	0.00034	0.00348	0.002	0.0608	98.9959
3	0.00441	0.00589	0.0005	0.00766	0.00437	0.00135	98.8365
เฉลี่ย	0.00336	0.00454	0.00044	0.00619	0.00348	0.03504	98.9413

2. ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของรอยเชื่อม

ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของรอยเชื่อมชั้นที่ 1 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง

ผลการ Spectrometer ที่รอยเชื่อมของชิ้นงานที่ 1 (Welding 1)							
ครั้งที่	% C2	% Si1	% S	% P1	% Mn3	% Ni2	% Cr1
1	0.12572	0.15029	0.01904	0.02019	0.36910	0.01625	0.01991
2	0.10948	0.15206	0.01854	0.02198	0.37971	0.01521	0.01890
3	0.13199	0.16534	0.01752	0.02648	0.40838	0.01261	0.01594
4	0.10918	0.15297	0.01875	0.02202	0.38151	0.01526	0.01894
5	0.12508	0.15720	0.01790	0.02310	0.38935	0.01444	0.01796
เฉลี่ย	0.12029	0.15557	0.01835	0.02275	0.38561	0.01475	0.01833

ครั้งที่	% Mo2	% V3	% Cu5	% W	% Ti4	% Sn2	% Co1
1	0.00235	0.00112	0.09500	0.00525	0.00031	0.00170	0.00489
2	0.00218	0.00105	0.09254	0.00509	0.00028	0.00169	0.00467
3	0.00216	0.00112	0.09393	0.00488	0.00045	0.00170	0.00440
4	0.00233	0.00113	0.09833	0.00536	0.00032	0.00181	0.00466
5	0.00233	0.00113	0.09743	0.00586	0.00037	0.00172	0.00460
เฉลี่ย	0.00227	0.00111	0.09545	0.00529	0.00035	0.00172	0.00464

ครั้งที่	% AL7	% Ph6	% B1	% Nb	% Zn5	% N1	% FE
1	0.00256	0.00152	0.00029	0.00245	0.00163	0.03682	99.1236
2	0.00198	0.00117	0.00028	0.00223	0.00140	0.01991	99.1496
3	0.00293	0.00107	0.00032	0.00232	0.00142	0.01726	99.0878
4	0.00204	0.00139	0.00030	0.00260	0.00165	0.01954	99.1399
5	0.00231	0.00149	0.00030	0.00246	0.00167	0.01695	99.1163
เฉลี่ย	0.00236	0.00133	0.00030	0.00241	0.00155	0.02210	99.1234

ตารางที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของรอยเชื่อมชั้นที่ 2 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง

ผลการ Spectrometer ที่รอยเชื่อมของชิ้นงานที่ 2 (Welding 2)							
ครั้งที่	% C2	% Si1	% S	% P1	% Mn3	% Ni2	% Cr1
1	0.12451	0.14881	0.02123	0.01860	0.36118	0.01732	0.02066
2	0.13633	0.15066	0.02003	0.01749	0.36368	0.01707	0.02065
3	0.10950	0.15191	0.01997	0.01792	0.36596	0.01689	0.02141
4	0.11011	0.15041	0.02013	0.01811	0.36546	0.01707	0.02096
5	0.10957	0.14969	0.02013	0.01812	0.36323	0.01767	0.02061
เฉลี่ย	0.11800	0.15030	0.02030	0.01805	0.36390	0.01720	0.02086

ครั้งที่	% Mo2	% V3	% Cu5	% W	% Ti4	% Sn2	% Co1
1	0.00248	0.00116	0.09924	0.00549	0.00027	0.00187	0.00503
2	0.00266	0.00133	0.10484	0.00516	0.00032	0.00187	0.00503
3	0.00289	0.00151	0.10858	0.00603	0.00038	0.00193	0.00512
4	0.00286	0.00146	0.11112	0.00653	0.00033	0.00200	0.00514
5	0.00291	0.00144	0.11018	0.00616	0.00028	0.00208	0.00517
เฉลี่ย	0.00276	0.00138	0.10679	0.00587	0.00032	0.00195	0.00510

ครั้งที่	% AL7	% Ph6	% B1	% Nb	% Zn5	% N1	% FE
1	0.00257	0.00163	0.00030	0.00260	0.00178	0.03397	99.1293
2	0.00311	0.00203	0.00034	0.00322	0.00189	0.01942	99.1229
3	0.00268	0.00245	0.00034	0.00374	0.00217	0.01638	99.1422
4	0.00256	0.00233	0.00034	0.00355	0.00219	0.01628	99.1411
5	0.00235	0.00233	0.00034	0.00338	0.00205	0.01796	99.1443
เฉลี่ย	0.00265	0.00215	0.00033	0.00330	0.00202	0.02080	99.1360

ตารางที่ ข.7 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของรอยเชื่อมชั้นที่ 3 โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง

ผลการ Spectrometer ที่รอยเชื่อมของชั้นงานที่ 3 (Welding 3)							
ครั้งที่	% C2	% Si1	% S	% P1	% Mn3	% Ni2	% Cr1
1	0.12544	0.16164	0.02425	0.02752	0.46843	0.06234	0.05700
2	0.12801	0.16286	0.02505	0.02845	0.47557	0.06736	0.06190
3	0.12881	0.16101	0.02565	0.02868	0.47770	0.07020	0.06422
4	0.12900	0.16106	0.02575	0.02851	0.47492	0.06844	0.06200
5	0.12969	0.16243	0.02512	0.02835	0.48065	0.06983	0.06410
เฉลี่ย	0.12819	0.16180	0.02516	0.02830	0.47545	0.06763	0.06184

ครั้งที่	% Mo2	% V3	% Cu5	% W	% Ti4	% Sn2	% Co1
1	0.01145	0.00201	2.49653	0.00787	0.00052	0.01475	0.00803
2	0.01246	0.00215	2.79210	0.00797	0.00059	0.01614	0.00843
3	0.01295	0.00211	2.95280	0.00832	0.00058	0.01703	0.00866
4	0.01263	0.00207	2.83793	0.00791	0.00058	0.01656	0.00849
5	0.01299	0.00224	2.94780	0.00785	0.00060	0.01692	0.00860
เฉลี่ย	0.01250	0.00212	2.80543	0.00798	0.00057	0.01628	0.00844

ครั้งที่	% AL7	% Ph6	% B1	% Nb	% Zn5	% N1	% FE
1	0.00290	0.00258	0.00040	0.00397	0.00334	0.01714	96.5019
2	0.00305	0.00286	0.00039	0.00416	0.00383	0.02043	96.1762
3	0.00320	0.00281	0.00039	0.00396	0.00379	0.02255	96.0046
4	0.00306	0.00285	0.00039	0.00387	0.00374	0.02282	96.1274
5	0.00307	0.00300	0.00041	0.00439	0.00385	0.02009	96.008
เฉลี่ย	0.00306	0.00282	0.00040	0.00407	0.00371	0.02061	96.16362

ตารางที่ ข.8 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของรอยเชื่อมทั้ง 3 ชั้น โดยนำผลที่ได้จากตาราง
ที่ ข.5 – 7 มาทำการเฉลี่ย

ผลการเฉลี่ยส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานเชื่อมทั้ง 3 ชิ้นงาน							
ชั้นที่	% C2	% Si1	% S	% P1	% Mn3	% Ni2	% Cr1
1	0.12029	0.15557	0.01835	0.02275	0.38561	0.01475	0.01833
2	0.11800	0.15030	0.02030	0.01805	0.36390	0.01720	0.02086
3	0.12819	0.16180	0.02516	0.02830	0.47545	0.06763	0.06184
เฉลี่ย	0.12216	0.15589	0.02127	0.02303	0.40832	0.03319	0.03368

ชั้นที่	% Mo2	% V3	% Cu5	% W	% Ti4	% Sn2	% Co1
1	0.00227	0.00111	0.09545	0.00529	0.00035	0.00172	0.00464
2	0.00276	0.00138	0.10679	0.00587	0.00032	0.00195	0.00510
3	0.01250	0.00212	2.80543	0.00798	0.00057	0.01628	0.00844
เฉลี่ย	0.00584	0.00154	1.00256	0.00638	0.00041	0.00665	0.00606

ชั้นที่	% AL7	% Ph6	% B1	% Nb	% Zn5	% N1	% FE
1	0.00236	0.00133	0.00030	0.00241	0.00155	0.02210	99.1234
2	0.00265	0.00215	0.00033	0.00330	0.00202	0.02080	99.1360
3	0.00306	0.00282	0.00040	0.00407	0.00371	0.02061	96.1636
เฉลี่ย	0.00269	0.00210	0.00034	0.00326	0.00243	0.02117	98.1410

ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ (ฉบับเต็ม)

ผลงานตีพิมพ์เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้

- [1] สุรสิงห์ อารยางกูร, อติศักดิ์ บุตรวงษ์ และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. 2551. การศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมของเหล็กกล้าที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน. วารสารวิชาการ ม.อบ. ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม – เมษายน 2552. หน้า 83-98.
- [2] สุรสิงห์ อารยางกูร, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ อติศักดิ์ บุตรวงษ์. 2551. การเชื่อมเหล็กกล้าด้วยความเสียดทาน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22; 15-17 ตุลาคม 2551; ปทุมธานี. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. Paper no. AMM024
- [3] สุรสิงห์ อารยางกูร และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. อิทธิพลของแรงดันเสียดทานต่อคุณสมบัติของเหล็กที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน. 2551. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ครั้งที่ 2; 28-29 กรกฎาคม 2551; หน้า 153-161
- [4] สุรสิงห์ อารยางกูร, กฤษดา ะหาโร, ภาณุวัฒน์ วงศ์ประทุม และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. 2551. อิทธิพลของเวลาและแรงดันในการเชื่อมเหล็กกล้าด้วยความเสียดทาน. การประชุมวิชาการระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ครั้งที่ 1; 13-14 กุมภาพันธ์ 2551

การศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมของเหล็กกลมที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน

The study on properties of joint of round steel rods welded by friction welding

สุรสิงห์ อารยางกูร อติศักดิ์ บุตรวงษ์ และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์
 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
 Surasing Arayangkun, Adisak Bootarawong, and Chawalit Thinwongpituk
 Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

บทคัดย่อ

การเชื่อมด้วยความเสียดทาน เป็นการเชื่อมที่กำลังได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลาย และกำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น สร้างรอยเชื่อมที่มีคุณภาพดี ความแข็งแรงสูง มีรอยเชื่อมเต็มพื้นที่ ไม่มีฟองอากาศ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในขบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้น จะเกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัส ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กขึ้นและส่งผลต่อค่าความแข็งของรอยเชื่อม การศึกษานี้มุ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมของเหล็กที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งและความแข็งแรงของรอยเชื่อม ในการศึกษาได้ทำการสร้างและพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานขึ้น และทำการทดลองเชื่อมเหล็กกลมชนิด AISI 1015 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. โดยทดลองเชื่อมภายใต้เงื่อนไขการทดลองคือ แรงดันในการเสียดทาน 10 บาร์ เวลาในการเสียดทาน 9 วินาที แรงดันในการอัด 60 บาร์ เวลาในการอัด 3 วินาที และความเร็วยรอบในการหมุน 1,200 รอบต่อนาที แล้วนำมาศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อม พบว่ารอยเชื่อมที่ได้มีค่าความแข็งแรง (Strength) เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็ง (Hardness) นั้นลดลง นอกจากนี้การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมยังพบว่าที่บริเวณกลางรอยเชื่อมมีสัดส่วนของ เพลิลไลต์ (Pearlite) ลดลง แต่สัดส่วนของ เฟอร์ไรต์ (Ferrite) กลับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งของรอยเชื่อมลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าจำนวนเกรนที่บริเวณกลางของรอยเชื่อมมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงขึ้น

คำสำคัญ การเชื่อมด้วยความเสียดทาน โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

Abstract

Friction welding is a welding technique that has been studied and developed continuously. This is due to its advantages, such as it provides high quality of joint, high strength of joint. It can make welded zone through out the whole section without any bubbles. However, there is heat generated in the welding process that can change the phase of materials. Hence, the hardness and strength of joint are affected. This paper is aimed to investigate

the property of joint welded by friction welding. In order to explain the variation of strength and hardness of joint. The welding machine was constructed for this study. The experiment was conducted with AISI 1015 steel rods of 10 mm. diameter. The testing conditions used in this study were friction pressure of 10 bar, friction time of 9 sec, upset pressure of 60 bar, upset time of 3 sec and speed of 1,200 rpm. The welded specimens were tested for strength, hardness and microstructure. It was revealed that the strength of welded element is higher but the hardness is lower. The microstructure investigation found that, at the center of welded section, number of pearlite was decreased while the number of ferrite was increased. This was the reason of hardness reduction in welded zone. In addition, it was also found that number of grain at the center of welded zone was higher and, hence, increasing in the strength of welded element.

Keywords: *friction welding, micro structure of joint*

บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยความเสียดทานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย เนื่องจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีคุณภาพมีความแข็งแรงสูง สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ การเชื่อมด้วยความเสียดทานมีข้อดีหลายประการเช่น ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างฝีมือ ชิ้นงานที่เชื่อมมีการผสมผสานทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม ไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุช่วยผสม ซึ่งเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยไฟฟ้าโดยใช้รูปเชื่อมเป็นคิ้วเชื่อมผสมผสานพบว่าการใช้รูปเชื่อมนั้นมีลักษณะเหมือนการพอก เพราะเป็นการเชื่อมติดบริเวณผิวด้านนอกของชิ้นงานมากกว่าโดยเฉพาะเมื่อชิ้นงานมีพื้นหน้าตัดมากขึ้น ความแข็งแรงของแนวเชื่อมยังน้อยลง ซึ่งต่างจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานเป็นอย่างมาก เพราะการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นให้คุณภาพของชิ้นงานที่เชื่อมทั่วทั้งหน้าตัดของแนวเชื่อม ด้วยข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงได้มีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมแบบนี้อย่างต่อเนื่องและกว้างขวาง ได้แก่ การศึกษาทดลองเชื่อมเหล็กเพลลาขาวที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.17 – 0.23 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้วัสดุที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันและต่างขนาดกัน ซึ่งพบว่าการใช้แรงดันเสียดทาน 30 เมกะปาสคัล และ เวลาเสียดทาน 5 วินาที ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากที่สุด (Sahin and Akata, 2003) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ Austenitic-Stainless steels (AISI304) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. จากการศึกษาพบว่าการใช้แรงดันเสียดทานที่ 60 เมกะปาสคัล และเวลาเสียดทานที่ 9 วินาที ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากที่สุด และค่าความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมมีค่าลดลง (Sahin, 2007) ในการศึกษาความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงานเชื่อมซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้างของรอยเชื่อม และความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมต่างชนิดกันระหว่างเหล็กเบอร์ AISI 304L และเหล็กเบอร์ AISI 4340 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. จากการศึกษาพบว่าการใช้ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อ นาที มีผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยที่สุด และค่าความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมค้อมีค่ามากขึ้นกว่าเดิม (Ozdemir, et

al., 2007) ในส่วนของการศึกษาแรงดันในการเสียดทานของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยใช้โลหะชุเปอร์อัลลอยด์ชนิด MA956 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มม. เป็นวัสดุในการศึกษาวิจัย พบว่าแรงดันในการเสียดทานที่ 50-100 เมกะปาสคัล เป็นค่าแปรที่เหมาะสมในการเสียดทาน (Aics, et al., 2007) ในการศึกษาการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันระหว่างเหล็กแอสตนเลสชนิด AISI 304L และชนิด AISI 430 ด้วยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน พบว่าชิ้นงานเชื่อมมีค่าความแข็งแรงโดยเฉลี่ยต่ำกว่าชิ้นเดิม โดยได้ความแข็งแรงประมาณ 95.52 เปอร์เซ็นต์ ของความแข็งแรงเดิม (Sathiya, et al., 2008) ในการศึกษาการเชื่อมด้วยวิธีการเสียดทานด้วยการสันเข็งเส้น (Linear friction welding (LFW)) ที่มีผลต่อชิ้นงานเชื่อมที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยม พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฟสของโครงสร้างจุลภาคในแต่ละส่วนของแนวเชื่อมต่อเนื่องไม่เหมือนกัน (Li, et al., 2008) ในกรณีของอัลลอยด์มีการศึกษาด้วยการทดสอบผสม Al_2O_3 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ผสมกับอะลูมิเนียมอัลลอยด์ เบอร์ 6160 จากนั้นนำมาเชื่อมกับเหล็ก AISI 1020 ด้วยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าบริเวณรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันนี้ทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Hascalik and Orhan, 2007) ในการศึกษาชิ้นแก้วโครงสร้างของวัสดุ Sintered ที่เชื่อมกับทองแดง (Cu) ชิ้นรูป ด้วยการเชื่อมด้วยความเสียดทาน พบว่าสามารถเชื่อมต่อไปให้ติดกันได้และเกิดโครงสร้างจุลภาคใหม่ที่ทำให้ค่าความแข็งที่รอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้น (Jayabharath, et al., 2007) ในการศึกษาความเร็วรอบและความเร็วในการเคลื่อนของหัวหมุนเชื่อมที่เชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแบบ Friction Stir Welding โดยการทดลองเชื่อมชิ้นงานด้วยการเปรียบเทียบการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยด์ชนิดเบอร์ AA 1050, AA 6061, AA 2024, AA7039 และ AA 7075 พบว่าต้องใช้ความเร็วรอบในการหมุนและเวลาในการเคลื่อนที่เชื่อมแตกต่างกัน เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่สมบูรณ์ (Balasubramanian, 2008) ในการศึกษาชิ้นงานด้วยการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของ Oxide-Dispersion-Strengthened-Steel (ODS) ที่เชื่อมต่อกับวัสดุที่มีเกรน Ferritic-Martensitic-Steel (PNC-FMS) ด้วยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทาน พบว่าช่วงเวลาที่การหล่อเย็นของชิ้นงานเชื่อมที่ช่วงเวลาที่แตกต่างกันส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของชิ้นงานเชื่อมที่บริเวณรอยเชื่อม (Uwada, et al., 2007) และในการศึกษาชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานกับวัสดุต่างชนิดกัน โดยทำการทดลองเชื่อมเหล็ก (Fe), ไททานเนียม (Ti), ทองแดง (Cu) และนิกเกิล (Ni) ด้วยวิธีการเชื่อมสลับวัสดุที่แตกต่างกัน พบว่าวัสดุที่ต่างกันเมื่อนำมาเชื่อมด้วยความเสียดทานก็จะได้รอยเชื่อมที่มีโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่แตกต่างกันไป (Meshrama, et al., 2007)

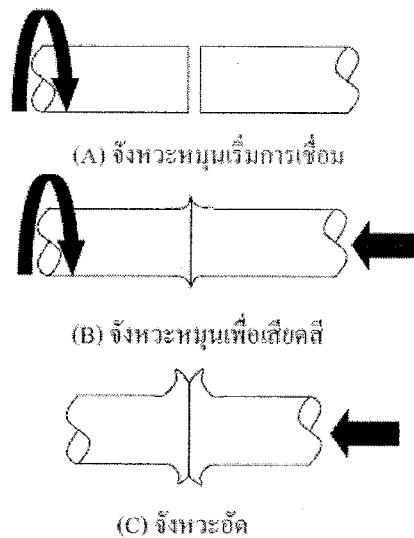
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงความแข็ง และความแข็งแรงของรอยเชื่อม ทั้งนี้ในการศึกษาเรื่องนี้ไม่ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่อาจมีผลกระทบต่อการศึกษา

เครื่องมือและวิธีการศึกษา

แนวคิดเบื้องต้นของระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

ระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน อาศัยหลักการเปลี่ยนแรงเสียดทานเป็นพลังงานความร้อนในการเชื่อมชิ้นงานให้ติดกัน ในการเชื่อมนั้นทำได้โดยการหมุนชิ้นงานหนึ่งด้วยความเร็ว และแรงบิดค่าหนึ่งดังภาพที่ 1 (A)

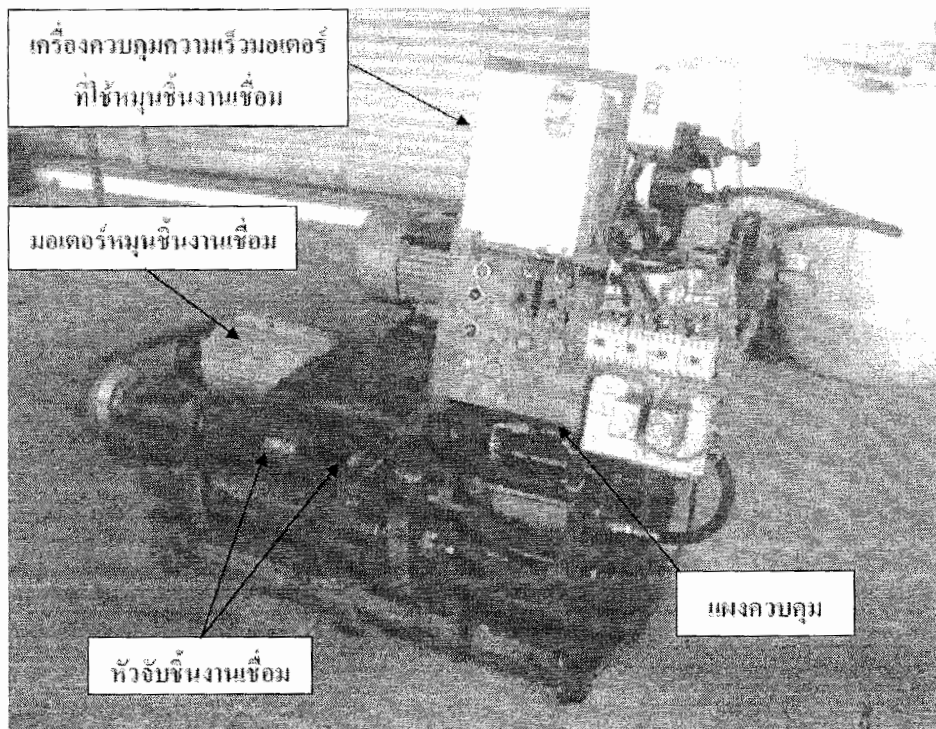
จากนั้นสร้างแรงดันผลักดันให้ชิ้นงาน ไปสัมผัสและหมุนเสียดสีกับชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่ยึดติดกับที่ไว้ที่กำหนดเวลาในการเสียดทานให้เกิดการเสียดสีกันจนเกิดความร้อนหลอมให้หน้าสัมผัสทั้งสองเข้าสู่สภาวะหนืด ดังภาพที่ 1 (B) จึงให้แรงดันอัดภายในเวลาอันรวดเร็วเพื่ออัดชิ้นงานให้ติดกัน ดังภาพที่ 1 (C) โดยหลังงานความร้อนที่ชิ้นงานทั้งสองได้รับนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว ได้แก่ แรงบิด ความเร็วรอบ ระยะเวลาในการให้แรงในแนวแกนและค่าของแรงดันในแนวแกนในแต่ละช่วงของการเชื่อม เป็นต้น



ภาพที่ 1 การเชื่อมด้วยการหมุนเสียดทานในแนวระนาบให้แรงดันอัดด้านเดียว

เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

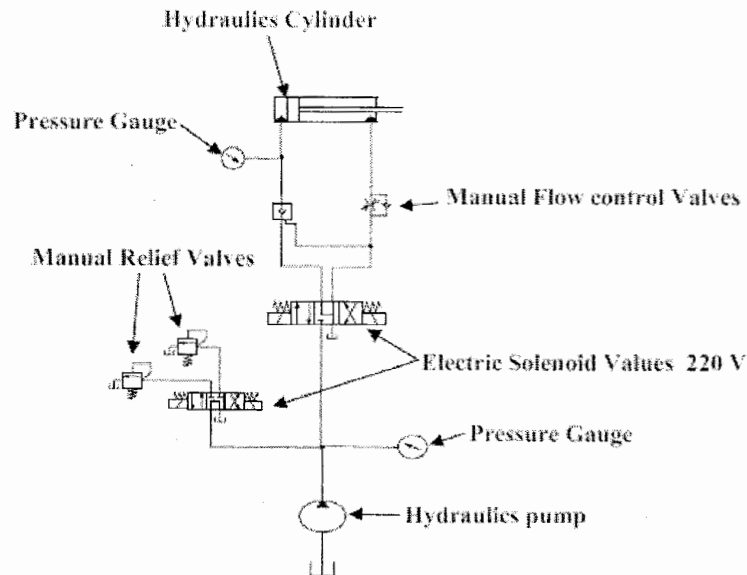
เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบได้ถูกสร้างขึ้นตามแนวคิดข้างต้นโดยมีมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า เป็นต้นกำลังในการหมุนชิ้นงาน ในส่วนของการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมนั้นใช้ เครื่องควบคุมความเร็วรอบ (Inverter) ขนาด 7.5 แรงม้า ในการควบคุมความเร็วรอบการทำงาน โครงสร้างทั้งหมดของเครื่องเชื่อมสร้างบนฐานเหล็กทรงตัวยาวเพื่อลดปัญหาการสั่นสะเทือนดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งแสดงเครื่องเชื่อมต้นแบบที่สร้างสำเร็จแล้วและใช้ในการทดลอง ส่วนตารางที่ 1 แสดงรายการอุปกรณ์และคุณสมบัติของอุปกรณ์ประกอบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ และในภาพที่ 3 แสดงวงจรของระบบไฮดรอลิกสำหรับการสร้างแรงดันอัดชิ้นงานเพื่อเชื่อม เครื่องเชื่อมนี้ทำงานโดยใช้ระบบ Electric Solenoid Valve ควบคุมแรงดัน ส่วนของการปรับค่าแรงดันใช้ Manual Relief Valves และใช้ Timer ควบคุมเวลาการทำงาน ซึ่งสามารถปรับตามค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามที่กำหนด



ภาพที่ 2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน (Friction Welding Machine) ที่สร้างขึ้นเพื่อการทดลอง

ตารางที่ 1 อุปกรณ์และคุณสมบัติของอุปกรณ์ประกอบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

รายการ	อุปกรณ์/คุณสมบัติ
มอเตอร์ปั๊มไฮดรอลิกส์	220 V / 3 Hp
มอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	380 V / 5 Hp
ระบบวาล์วควบคุมไฮดรอลิกส์	Manual Relief Valves
ระบบวาล์วควบคุมการ เปิด-ปิด ไฮดรอลิกส์	Electric Solenoid Valves 220 V.
กระบอกไฮดรอลิกส์	Diameter 4 inches
ระบบควบคุมความเร็วของกระบอกไฮดรอลิกส์	Manual Flow control Valves
ระบบควบคุมเวลาในการทำงาน	Timer
แรงดันปั๊มไฮดรอลิกส์	100 Bar
ระบบควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ในการเชื่อม	Inverter 7.5 Hp



ภาพที่ 3 วงจรควบคุมการทำงานด้วยไฮดรอลิกส์ (Hydraulics Control) ของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่สร้างขึ้นเพื่อการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้เหล็กคาร์บอนต่ำที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งเรียกว่าเหล็กเพลทขาว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. ยาว 100 มม. โดยได้นำชิ้นงานไปทดสอบเพื่อหาส่วนประกอบทางเคมี ตามมาตรฐานของระบบ AISI (American Iron and Steel Institute) และจากการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีพบว่า เป็นเหล็กชนิด AISI 1015 มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

Material	%C	%P	%S	%Mn	%Si	%Cr	Tensile Strength (MPa)
AISI 1015	0.15	0.03	0.01	0.47	0.17	0.01	195

วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่แสดงในภาพที่ 2 ทำการเชื่อมชิ้นงานกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. ยาว 100 มม. จำนวน 2 ท่อน ให้ติดกันโดยอาศัยหลักการเชื่อมดังที่ได้อธิบายมาแล้ว โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นนำชิ้นงานที่เชื่อมตามเงื่อนไขที่กำหนดไปทดสอบหาความแข็งแรง และนำชิ้นงานที่เชื่อมไปทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมและส่วนอื่นๆของชิ้นงานที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม โดยใช้เครื่อง Micro Hardness Test และถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคเพื่อ

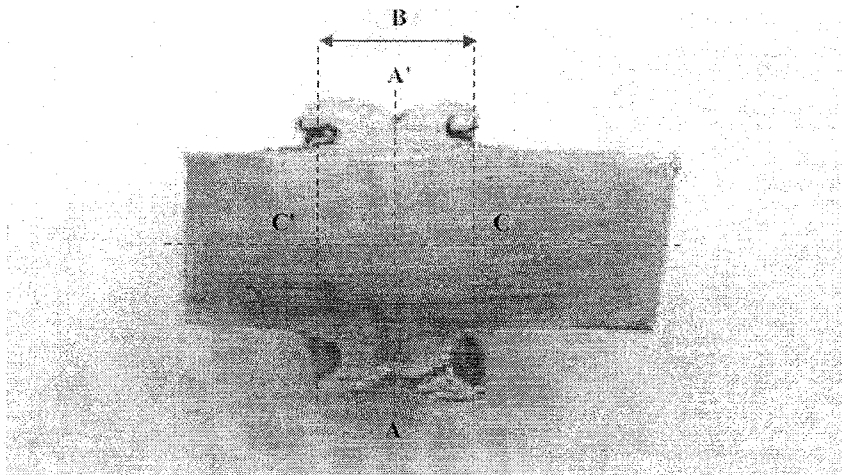
นำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง (Image analysis) เพื่อหาส่วนประกอบของโครงสร้าง
จุดภาคและหาจำนวนเกรน

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดลอง

รายการ	คุณสมบัติ
1. แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure)	10 Bar
2. เวลาในการเสียดทาน (Friction Time)	9 sec.
3. แรงดันในการอัด (Upset Pressure)	60 Bar
4. เวลาในการอัด (Upset Time)	3 sec.
5. ความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed)	1200 rpm

การทดสอบหาค่าความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างจุดภาค

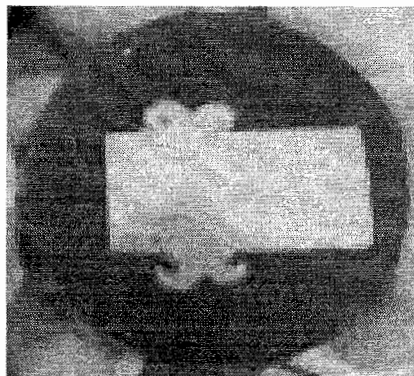
ในการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อมทำได้โดยนำชิ้นงานบริเวณส่วนที่เชื่อมติดกับความยาว 20 มม. มา
ผ่าตามแนวแกนเพื่อให้เห็นรอยเชื่อมตลอดหน้าตัดดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ชิ้นงานเชื่อมที่ผ่าเพื่อทดสอบความแข็ง A A' คือ แนวเชื่อมต่อของชิ้นงาน B คือ บริเวณพื้นที่ได้รับ
ผลกระทบจากการเชื่อม C C' คือ แนวเส้นที่วัดค่าความแข็งและถ่ายภาพวิเคราะห์โครงสร้าง
จุดภาค

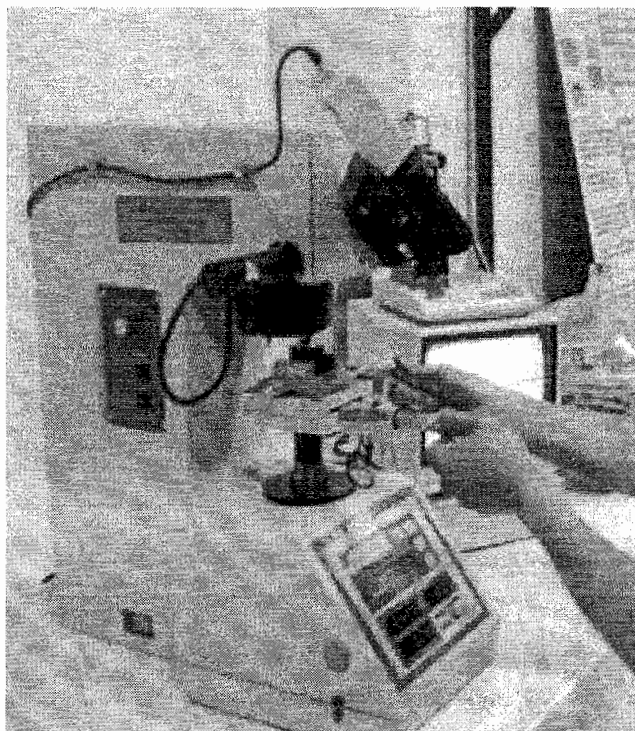
เมื่อนำชิ้นงานที่จะทดสอบเสร็จแล้ว ต้องนำชิ้นงานไปทำเรือนหุ้มเพื่อความสะดวกในการเตรียมพื้นผิว
รวมทั้งการวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยเรือนหุ้มจะมีความหนามากกว่าความหนาของชิ้นทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้

เพื่อที่จะสามารถยึดชิ้นงานได้ดี จากนั้นจะนำชิ้นงานไปขัดเตรียมผิวจนมัน โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำเรือนหุ้มและขัดผิวแล้วจะมีลักษณะดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ชิ้นงานที่ผ่านการทำเรือนหุ้มแล้ว

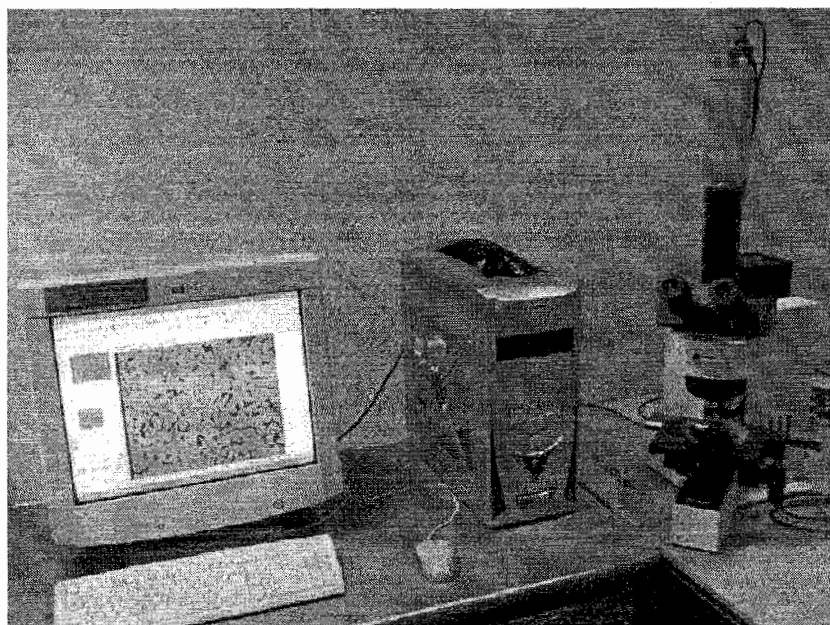
เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานไปตรวจดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แล้วบันทึกภาพที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคให้มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งที่จะวัดความแข็ง จากนั้นนำไปวัดค่าความแข็ง (Hardness Test) โดยใช้เครื่อง Micro Hardness ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เครื่องวัดความแข็ง ของ Multitoyo รุ่น MVK-H1 Micro Hardness Test

การวิเคราะห์โครงสร้าง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยาได้ใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ (Image Analysis) ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก และมีประสิทธิภาพ โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ได้แก่ การหาขนาดเกรน (Grain Size Number) การวิเคราะห์เฟอไรต์เฟส Ferrite และ Pearlite เป็นต้น ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างยี่ห้อ Olympus รุ่น Olysia M3 ดังแสดงในภาพที่ 7

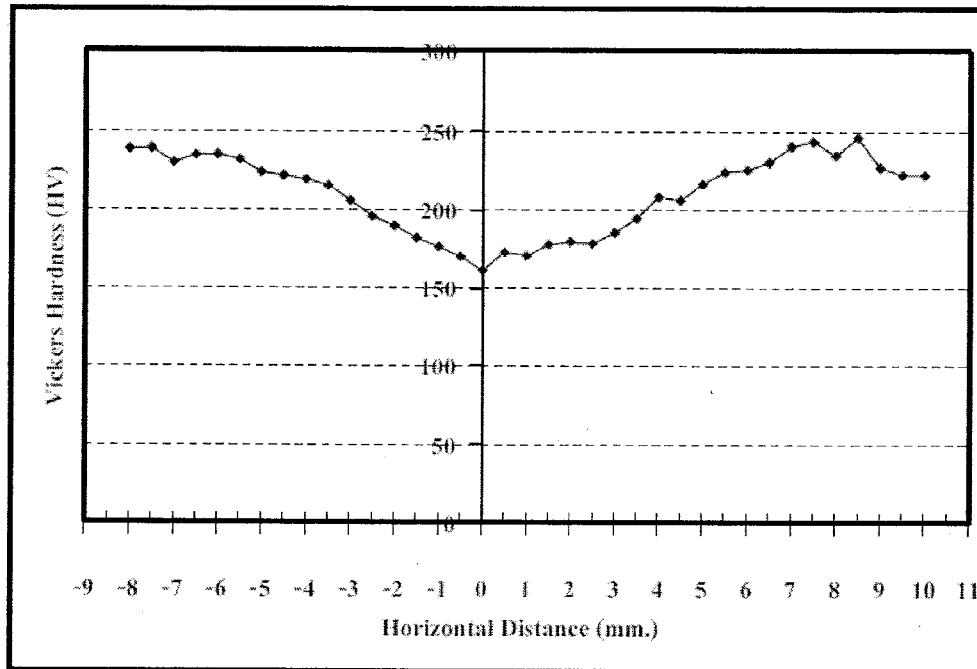


ภาพที่ 7 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง (Image Analysis) ยี่ห้อ Olympus รุ่น Olysia M3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ความแข็งแรงและค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆของรอยเชื่อม

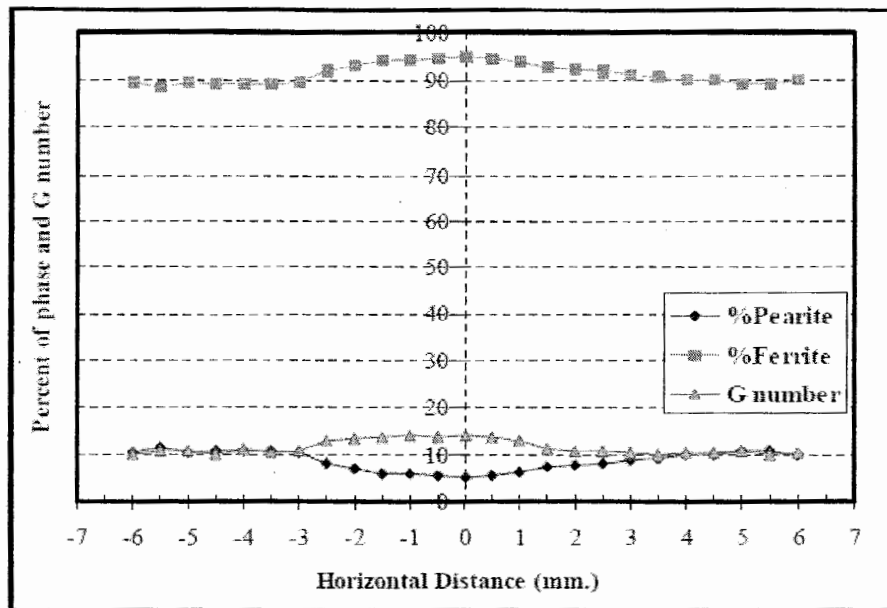
ในการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อม ทำได้โดยการดึงชิ้นงานเชื่อมให้ขาดบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งจากการทดลอง พบว่ารอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรง 228 เมกะปาสคัล ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 17 เปอรเซ็นต์ (เดิมมีค่าความแข็งแรง 195 เมกะปาสคัล) ส่วนในการทดสอบความแข็งที่บริเวณต่างๆของรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers Hardness วัดความแข็งจากตำแหน่งกึ่งกลางของรอยเชื่อม หรือตำแหน่งที่ชิ้นงานชนสัมผัสกัน และวัดตามแนวแกนของชิ้นงานไปทางด้านขวา และซ้ายของแนวเชื่อม โดยมีระยะห่างจุดละ 0.5 มม. และทำการทดสอบความแข็งด้วยการเฉลี่ยจาก 5 ชิ้นงาน ผลการทดสอบได้ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ค่าความแข็งของชิ้นงานโดยเฉลี่ยภายใต้เงื่อนไขการเชื่อมที่กำหนดเหมือนกัน 5 ชิ้นงาน

จากภาพที่ 8 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งรอยเชื่อมที่ชิ้นงานสัมผัสกันนั้นความแข็งของรอยเชื่อมมีค่าต่ำกว่าตำแหน่งอื่น โดยมีลักษณะคล้ายๆ แอ่งกระทะหงาย ที่ตำแหน่งไกลจากจุดเชื่อมนี้ออกไปค่าความแข็งจะค่อยๆ สูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับเมื่อเข้าสู่ชิ้นงานเดิม ผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมต้องมีค่าลดลงเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงนำชิ้นงานไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเพื่อหาสาเหตุด้วยเครื่อง Image Analysis จากกรณีวิเคราะห์ได้จำนวนเกรน และสัดส่วนของ Pearlite และ Ferrite ดังแสดงในตารางที่ 4 และแสดงเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณกึ่งกลางรอยเชื่อมสัดส่วนของ Pearlite มีค่าน้อยลง ในขณะที่สัดส่วนของ Ferrite กลับมีค่ามากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความแข็งของรอยเชื่อมลดลง (เนื่องจากเกรนของ Pearlite มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 184 – 390 HV ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งของ Ferrite ที่มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 74 – 158 HV) ส่วนสาเหตุที่สัดส่วนของ Pearlite ลดลงนั้นอาจเกิดจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นเป็นการเชื่อมทั้งหน้าตัด ดังนั้นการเย็นตัวของรอยเชื่อมจึงเกิดอย่างช้าๆ โดยเฉพาะบริเวณแกนกลางซึ่งเป็นตำแหน่งที่วัดความแข็ง จึงส่งผลให้จำนวนของ Pearlite ลดลง และจำนวนของ Ferrite มีจำนวนมากขึ้น

นอกจากนี้ข้อมูลในภาพที่ 9 ยังแสดงให้เห็นว่าจำนวนเกรน (G number) ที่รอยเชื่อมมีจำนวนมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากแรงดันในขณะอัดทำให้เกรนมีจำนวนมากยิ่งขึ้น การที่จำนวนของเกรนมีมากขึ้นนี้ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีค่าสูงขึ้น

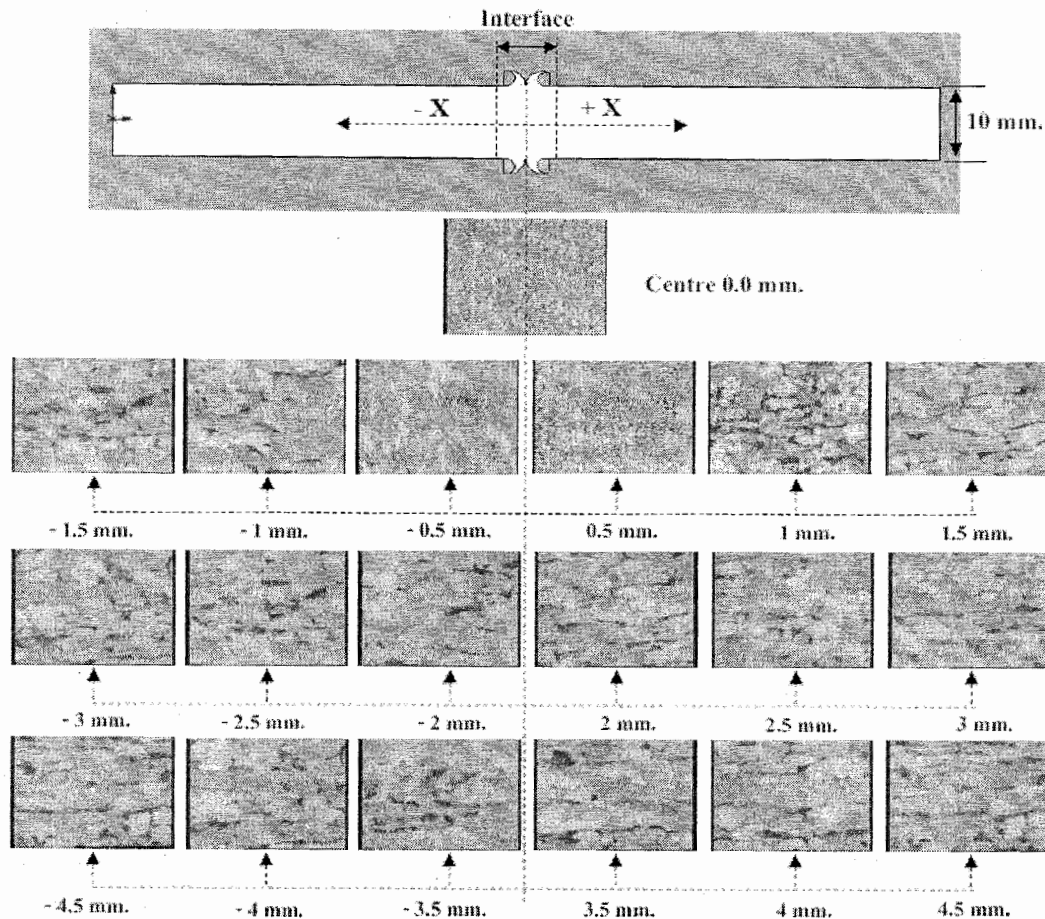


ภาพที่ 9 กราฟการเปลี่ยนแปลงของ Pearite, Ferrite และ G number บริเวณแนวเชื่อมต่อและส่วนที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของ Pearite และ Ferrite รวมถึงขนาดของเกรน (G number) ที่ระยะต่างๆ

- X mm.	-6	-5.5	-5	-4.5	-4	-3.5	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0
%Pearite	10.13	11.34	10.23	10.50	10.84	10.68	10.18	7.92	6.92	5.99	5.88	5.42	5.27
%Ferrite	89.87	88.66	89.77	89.50	89.16	89.32	89.82	92.08	93.08	94.01	94.12	94.58	94.73
G number	10.05	10.58	10.71	10.05	10.87	10.18	10.78	12.72	13.08	13.58	13.85	13.71	13.87
+ X mm.	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
%Pearite	5.27	5.45	6.17	7.19	7.78	7.99	8.91	9.11	10.03	9.98	10.72	10.53	9.86
%Ferrite	94.73	94.55	93.85	92.81	92.22	92.01	91.09	90.89	89.97	90.02	89.28	89.47	90.14
G number	13.87	13.56	12.85	10.88	10.61	10.53	10.23	10.09	10.34	10.17	10.56	10.08	10.28

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆของรอยเชื่อม



ภาพที่ 10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ระยะต่างๆ โดยภาพขยายขนาด 50 X

จากภาพที่ 10 ซึ่งแสดงรูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่าบริเวณรอยเชื่อม (Interface) มีลักษณะเกรนที่ละเอียดมากกว่าเกรนที่เกิดขึ้นนอกบริเวณรอยเชื่อม ลักษณะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมนี้เกิดจากการให้แรงดันในการอัด (Upset Pressure) เพื่อเชื่อมชิ้นงานให้ต่อกัน ซึ่งการที่เกรนมีความละเอียดมากขึ้นจะส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าวัสดุเดิม นอกจากนี้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของเฟส Pearlite และ Ferrite โดยบริเวณรอยเชื่อมจะเห็นว่าเกรนของเหล็กมีสีขาวมากขึ้น ซึ่งเป็นเฟสของ Ferrite ส่วนเฟสของ Pearlite ซึ่งมีลักษณะเป็นสีดำ และมีจำนวนลดลงส่งผลให้รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงลดลง เนื่องจาก Ferrite มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่า Pearlite

สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่สร้างสามารถทำงานได้ดีและสามารถนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆที่จะมีผลกระทบต่อการเชื่อมวัสดุชนิดต่างๆ ต่อไปได้
2. ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่กำหนด มีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุเดิมประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเกิดจากแรงดันในการอัดทำให้เกรนบริเวณรอยเชื่อมมีความละเอียด และมีจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้บริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม
3. ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่กำหนด พบว่าบริเวณกลางของรอยเชื่อมมีค่าความแข็งลดลง ซึ่งการที่ค่าความแข็งของรอยเชื่อมมีค่าลดลงนั้น เกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมทำให้เปอร์เซ็นต์ของ Pearlite ลดน้อยลง และมี Ferrite เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้บริเวณแนวเชื่อมตอมมีความนุ่มมากขึ้นกว่าเดิม
4. ในการศึกษาวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ เช่น แรงดัน เวลา ในการเสียดทาน และในการอัด ความเร็วรอบในการหมุน และอุณหภูมิจุดเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นตัวแปรที่อาจส่งผลถึงคุณสมบัติของวัสดุ และเป็นเงื่อนไขที่นำมาจะทำการศึกษาวิจัยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ ผศ.สุริยา โชคสวัสดิ์ และ ผศ.ดร.สุชังภมา ดี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และคำแนะนำต่องานวิจัย

บรรณานุกรม

- Ates, H., Turker, M. and Kurt, A. 2007. "Effect of friction pressure on the friction-welded MA956 iron-based superalloy" *Materials and Design* 28 : 948-953
- Balasubramanian, V. 2008. "Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters" *Materials Science and Engineering* 480 : 163-175
- Hascalik A. and Orhan, N. 2007. "Effect of particle size on friction welding of Al₂O₃ reinforced 6160 Al alloy composite and SAE 1020 steel" *Materials and Design* 28 : 313-317
- Jayabharath, K., Ashfaq, M., Venugopal, P. and Achar, D.R.G. 2007. "Investigations on the continuous drive friction welding of sintered powder metallurgical (P/M) steel and wrought copper parts" *Materials Science and Engineering* 454-455 : 114-123

- Li, W.-Y., Ma, T.J., Xu, S.Q., Zhang, Y., Li J.L. and Liao, H.L. 2008. "Effect of friction time on flash shape and axial shortening of linear friction welded 45 steel" *Materials Letters* 62 : 293-296
- Mesbaram, S.D., Mohandas T. and Reddy, G.M. 2007, "Friction welding of dissimilar pure metals" *Journal of Materials Processing Technology* 184 : 330-337
- Ozdemir, N., Sarsilmaz, F. and Hascalik, A. 2007. "Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welding AISI 304L to 4340 steel" (*Short communication*) *Materials and Design* 28 : 301-307
- Sahin, M. and Akata, H.E. 2003. "Joining with friction welding of plastically deformed steel" *Journal of Materials Processing Technology* 142 : 239-246
- Sahin, M. 2007. "Evaluation of the joint – interface properties of austenitic – stainless steels (AISI304) joined by friction welding" *Materials and Design* 28 : 2244-2250
- Sathiya, P., Aravindan S. and Haq, A.N. 2008. "Some experimental investigation on friction welded stainless steel joints" *Materials and Design* 29 : 1099-1109
- Uwada, T., Ukai, S., Nakai, T. and Fujiwara, M. 2007. "Properties of friction welds between 9Cr-ODS martensitic and ferritic-martensitic steel" *Journal of Nuclear Materials* 367-370 : 1213-1217

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22
15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

การเชื่อมเหล็กกลมด้วยความเสียดทาน Friction Welding for Round Steel Rods

สุรสิงห์ อารยางกูร, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ อติศักดิ์ บุตรวงษ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ
จ.อุบลราชธานี 34190
โทรศัพท์ 045-353381-2 โทรสาร 045-353333, email: nok_arayangkooor@hotmail.com

บทคัดย่อ

การเชื่อมด้วยความเสียดทานเป็นวิธีการเชื่อมอีกวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจศึกษาในวงกว้าง และเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับใช้ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถเชื่อมได้ตลอดทั้งหน้าตัด ไม่เกิดฟองอากาศ และความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูง ซึ่งต่างจากการเชื่อมแบบปกติทั่วไปซึ่งเชื่อมได้เฉพาะรอบๆรอยต่อเท่านั้น นอกจากนี้การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานยังใช้เวลาในการเชื่อมที่สั้นมากและคุณภาพรอยเชื่อมคงที่ เนื่องจากไม่ขึ้นกับฝีมือช่างเชื่อม ด้วยข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมแบบนี้อย่างต่อเนื่องและกว้างขวาง ทั้งในแง่ของความเร็วรอบในการเชื่อม ความดันที่ใช้ในการเชื่อม เวลาที่เหมาะสมในการเชื่อม และคุณสมบัติของรอยเชื่อม ทั้งในระดับจุลภาค และมหภาค เป็นต้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานขึ้น และทำการทดลองเพื่อหาคุณลักษณะของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น ทั้งในแง่ของโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรง

การศึกษานี้ได้สร้างและพัฒนาเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานโดยอาศัยหลักการหมุนชิ้นงานให้ขัดสีกันภายใต้แรงดัน เวลาที่เหมาะสมจนเกิดความร้อนใกล้จุดหลอมเหลว แล้วอัดให้ชิ้นงานเชื่อมติดกัน โดยใช้หม้อเคลือบขนาด 5 แรงม้า เป็นตัวขับ(หมุนชิ้นงาน) และระบบไฮดรอลิกส์ เป็นต้นกำลังในการอัดชิ้นงาน ซึ่งได้ทำการทดลองเชื่อมแท่งเหล็กกลมตัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว ที่เงื่อนไขการเชื่อมต่างๆกัน จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบหาค่าความแข็งแรง และค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ผลการทดลองพบว่าเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถสร้างรอยเชื่อมต่อที่มีคุณภาพดี เมื่อวัสดุเกิดการหลอมติดกันตลอดหน้าตัดอย่างสม่ำเสมอ ความแข็งแรงของแนวเชื่อมต่อมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานเดิม ผลการทดสอบความแข็งพบว่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมต่อมีค่าลดลง หรือมีความนุ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความร้อนในระหว่างการเสียดทาน อย่างไรก็ตามผลของความร้อนนี้มีระยะไม่ไกลจากหน้าตัดของรอยเชื่อมมากนัก (ผลการศึกษพบว่าระยะไม่เกิน 5 mm.) นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนและหลังเชื่อมอีกด้วย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22
15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

การเชื่อมเหล็กกลมด้วยความเสียดทาน Friction Welding for Round Steel Rods

สุวิงษ์ อารยางกูร¹ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ อติศักดิ์ บุตรวงษ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

โทรศัพท์ 045-353381-2 โทรสาร 045-353333, email: nok_arayangkoo@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการศึกษาวิจัยเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมีการพัฒนาเทคนิคการเชื่อมด้วยความเสียดทานได้หลายวิธีการ ซึ่งหลักเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นอาศัยการเสียดสีกันของชิ้นที่จะทำการเชื่อมต่อ เพื่อให้ทำให้อุณหภูมิที่หน้าสัมผัสเกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วให้แรงดันอัดให้ชิ้นงานนั้นติดต่อกัน ซึ่งผลที่ได้จากการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นมีข้อดีหลายอย่าง เช่น สามารถเชื่อมได้ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเชื่อมและมีความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงจากพื้นฐานแนวความคิดดังกล่าว จึงเป็นที่มาของการพัฒนาสร้างเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยกำหนดให้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบต้องสามารถเชื่อมชิ้นงานที่เป็นเหล็กกลมชนิด AISI 1015 ได้ และต้องทำงานได้อย่างต่อเนื่องในช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆ

จากการศึกษาวิจัยและพัฒนาเครื่องเชื่อมต้นแบบ พบว่าเครื่องเชื่อมต้นแบบสามารถทำงานและเชื่อมต่อชิ้นงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆที่เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบทำได้อคือ สามารถปรับตั้งค่าแรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ตั้งแต่ 10-80 บาร์ แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ตั้งแต่ 20-100 บาร์ ความเร็วรอบในการหมุน (Friction Speed) ตั้งแต่ 0-2500 รอบต่อนาที และสามารถปรับตั้งเวลาในการเสียดทาน (Friction Time) เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ได้ จากการทดลองเชื่อมเหล็กกลมชนิด AISI 1015 พบว่าค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมต่อมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม (Base Iron) ในส่วนของการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นพบว่าความแข็งแรงบริเวณแนวเชื่อมต่อมีค่าความแข็งแรงลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมทำให้เปอร์เซ็นต์ของ pearlite ลดลง ในส่วนของความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นนั้นจากการวิเคราะห์โครงสร้างของเกรนเหล็กด้วย Microphotograph พบว่าบริเวณแนวเชื่อมต่อมีเกรนของเหล็กที่ละเอียดมากกว่าบริเวณอื่นที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม ส่งผลให้บริเวณแนวเชื่อมต่อมีความแข็งแรงมากขึ้น

Abstract

Friction welding is an alternative welding technique which has been developed for decades. It forms the joint by frictional force between the interface of specimens. In the welding process, the specimens are in contact and rotated, so that, heat is generated until the contact faces are in semi-solid state. Subsequently, the specimens are pushed to bond together. Friction welding provides many advantages such as the joint is speeded through the whole section and high strength of joint.

In this paper, a friction welding machine was constructed to freetform a study on welding of round steel rods of AISI 1015. The machine was designed to work with friction pressure from 10-60 bar, upset pressure from 20-100 bar and friction speed from 0-1550 rpm. Friction time and upset time can also be varied as desired. The machine was tested to weld AISI 1015 round steel rods under some conditions. It was found that the strength of welded specimen is higher than the base iron. This is because the finer gains of welded some after welding.

It addition, it was also found that, the hardness of the welding zone is decreased, especially in the center of joint. This is due to the percentage of pearlite is decreased while the percentage of ferrite is increased in the heating process of friction.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยความเสียดทานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างหลากหลายเนื่องจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีคุณสมบัติความแข็งแรงสูง สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ การเชื่อมด้วยความเสียดทานมีข้อดีหลายประการเช่น ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างฝีมือ ชิ้นงานที่เชื่อมมีการผสมผสานทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม ไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุช่วยประสาน ซึ่งเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยไฟฟ้าโดยใช้รูปเชื่อม

เป็นตัวเชื่อมประสานพบว่าการใช้รูปเชื่อมนั้นมีลักษณะเหมือนการพอก เพราะเป็นการเชื่อมติดบริเวณผิวด้านนอกของชิ้นงานมากกว่า โดยเฉพาะเมื่อชิ้นงานมีพื้นผิวด้านนอกที่มีความแข็งแรงของแนวเชื่อม ยิ่งน้อยลง ซึ่งต่างจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานเป็นอย่างมาก เพราะการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นให้คุณภาพของชิ้นงานที่เชื่อมทั่วทั้งหน้าตัดของแนวเชื่อม ด้วยข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมแบบนี้อีกอย่างต่อเนื่องและกว้างขวาง ได้แก่ Mumin Sahin และ H. Erol Akata [1] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมเหล็กเพลลาขาวที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.17 – 0.23 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้วัสดุที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันและต่างขนาดกัน จากการศึกษาพบว่าการใช้แรงดันเสียดทาน 30 MPa และ เวลาเสียดทาน 5 วินาที มีผลทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากที่สุด นอกจากนี้ Mumin Sahin [2] ยังได้ทำการศึกษารอยเชื่อมต่อที่มีผลต่อความแข็งแรงและโครงสร้างของวัสดุในระดับจุลภาค ของวัสดุ austenitic – stainless steels (AISI304) N. Ozdemir, F. Sarsilmaz และ A. Hascalik [3] ทำการศึกษาความเร็วยวอบในการหมุนชิ้นงานเชื่อมซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้าง ความแข็ง และความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมต่างชนิดกัน ระหว่างเหล็ก AISI 304L และเหล็ก AISI 4340 Hakan Ates, Mehmet Turker และ Adem Kurt [4] ทำการศึกษาแรงดันในการเสียดทานของชิ้นงานเชื่อมซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้าง ความแข็ง และความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อม โดยใช้ MA956 Iron – Based Superalloy เป็นวัสดุในการศึกษาวิจัย และ P. Sathiya, S. Aravindan, A. Noorul Haq [5] ยังได้ทำการศึกษาเชิงสถิติของชิ้นงาน AISI 304L และ AISI 430 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทานซึ่งรอยเชื่อมต่อที่มีผลต่อโครงสร้างของวัสดุในระดับจุลภาค

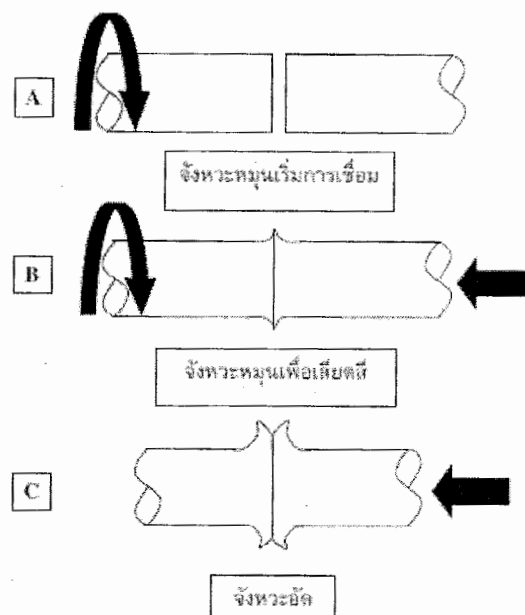
ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสร้างเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่สามารถปรับตั้งค่าได้และทำงานได้อย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานโดยมุ่งความสนใจไปที่การเปลี่ยนแปลงความแข็งของบริเวณพื้นที่แนวเชื่อมต่อและโครงสร้างจุลภาคเป็นหลัก การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่อง Micro Hardness (HV) และทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การหาขนาดเกรน (Grain Size Number) การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เฟส ferrite และ pearlite อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรอื่นๆอีกหลายตัวที่อาจมีผลกระทบต่อการศึกษาความเสียดทาน เช่น แรงดันและเวลาในการเชื่อมในช่วงต่างๆ ความยาวของชิ้นงานที่หายไป และลักษณะของผิวสัมผัสชิ้นงาน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

2. เครื่องมือและวิธีการศึกษา

2.1 แนวคิดเบื้องต้นของระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

ระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้น อาศัยหลักการเปลี่ยนแรงเสียดทานเป็นพลังงานความร้อนในการเชื่อมชิ้นงานให้ติดกัน ในการเชื่อมนั้นทำได้โดยการหมุนชิ้นงานหนึ่งด้วยความเร็ว และแรงบิดตัวหนึ่งดังรูปที่ 1 A จากนั้นสร้างแรงดันๆให้ชิ้นงานนั้นไปสัมผัสและหมุนเสียดสีกับชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่ยึดติดกับที่แล้วกำหนดเวลาในการเสียดทานให้เกิดการเสียดสีก็จะเกิดความร้อนหลอมให้หน้าสัมผัสทั้งสอง

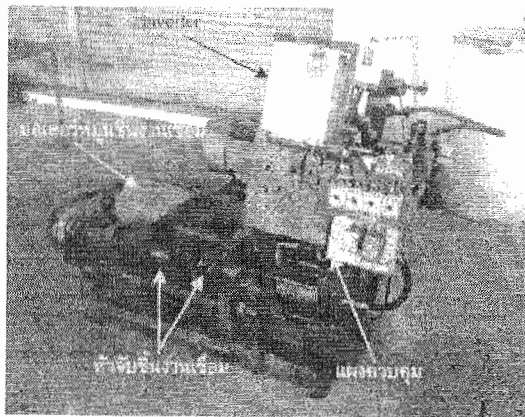
เข้าสู่ภาวะหนึ่งดังรูปที่ 1 B จึงให้แรงดันอัดภายในเวลาอันรวดเร็วเพื่ออัดชิ้นงานให้ติดกันดังรูปที่ 1 C โดยพลังงานความร้อนที่ชิ้นงานทั้งสองได้รับนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว ได้แก่ แรงบิด ความเร็วรอบ ระยะเวลาในการให้แรงในแนวแกน ค่าของแรงดันในแนวแกนในแต่ละช่วงของการเชื่อม เป็นต้น



รูปที่ 1 การเชื่อมด้วยการหมุนเสียดทานในแนวระนาบให้แรงดันอัดด้านเดียว

2.2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

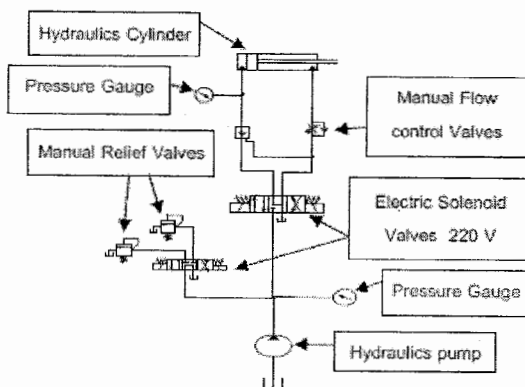
เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบได้ถูกสร้างขึ้นตามแนวคิดข้างต้นโดยมีมอเตอร์ขนาด 5 Hp เป็นต้นกำลังในการหมุนชิ้นงาน ในส่วนของควบคุมความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานที่จะทำการเชื่อมนั้นใช้ Inverter ขนาด 7.5 Hp ในการควบคุมความเร็วรอบการทำงาน โครงสร้างทั้งหมดของเครื่องเชื่อมสร้างบนฐานเหล็กทรงด้วยอย่างเพื่อลดปัญหาการสั่นสะเทือนดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงเครื่องเชื่อมต้นแบบที่สร้างสำเร็จแล้วและใช้ในการทดลอง ส่วนตารางที่ 1 แสดงรายการอุปกรณ์และคุณสมบัติของอุปกรณ์ประกอบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ และใช้ระบบไฮดรอลิกส์ในการสร้างแรงดันอัดชิ้นงานเพื่อเชื่อม เครื่องเชื่อมนี้ทำงานโดยใช้ระบบ Electric Solenoid Valve ควบคุมแรงดัน ส่วนของการปรับค่าแรงดันนี้ใช้ Manual Relief Valves และใช้ Timer ควบคุมเวลาการทำงาน ซึ่งสามารถปรับตามค่าตัวแปรต่างๆ ตามที่กำหนดได้ รูปที่ 3 แสดงวงจรควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิกส์ของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่สร้างขึ้นเพื่อการทดลอง



รูปที่ 2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน (Friction Welding Machine) ที่สร้างขึ้นเพื่อการทดลอง

ตารางที่ 1 อุปกรณ์และคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

รายการ	อุปกรณ์/คุณสมบัติ
มอเตอร์ปั๊มไฮดรอลิกส์	220 V / 3 Hp
มอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	380 V / 5 Hp
ระบบวาล์วควบคุมไฮดรอลิกส์	Manual Relief Valves
ระบบวาล์วควบคุมการ เปิด-ปิด ไฮดรอลิกส์	Electric Solenoid Valves 220 V
กระบอกไฮดรอลิกส์ ๘	4 inches
ระบบควบคุมความเร็วของ กระบอกไฮดรอลิกส์	Manual Flow control Valves
ระบบควบคุมเวลาในการทำงาน	Timer
แรงดันปั๊มไฮดรอลิกส์	100 Bar
ระบบควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	Inverter 7.5 Hp



รูปที่ 3 วงจรควบคุมการทำงานด้วยไฮดรอลิกส์ (Hydraulics Control) ของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานที่สร้างขึ้นเพื่อการทดลอง

2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามท้องตลาด เรียกว่าเหล็กเพลทขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร และได้นำชิ้นงานไปทดสอบเพื่อหาส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้มาตรฐานของระบบ SAE-AISI (American Iron and Steel Institute) และจากการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีพบว่าเหล็กชนิด AISI 1015 มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

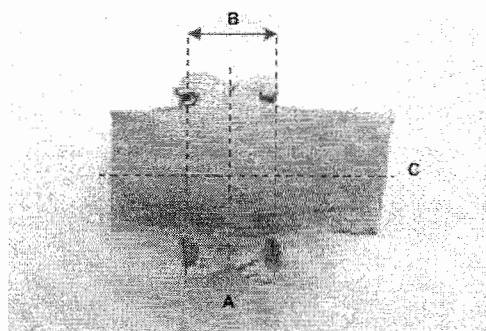
Material	%C	%P	%S	%Mn	%Si	%Cr
AISI 1015	0.15	0.03	0.01	0.47	0.17	0.01

2.4 การทดสอบเครื่องเชื่อมต้นแบบ

เพื่อเป็นการทดสอบเครื่องเชื่อมต้นแบบ จึงได้ใช้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานทำการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาวท่อนละ 100 มิลลิเมตร ให้ติดกันโดยอาศัยหลักการเชื่อมดังที่ได้อธิบายมาแล้ว โดยในเบื้องต้นได้ใช้เงื่อนไขการเชื่อมเพียง 1 เงื่อนไขดังนี้ ให้แรงดันในการเสียดทาน 10 บาร์ เวลาในการเสียดทาน 9 วินาที แรงดันในการเชื่อม 60 บาร์ เวลาในการเชื่อม 3 วินาที ความเร็วรอบในการหมุน 1200 รอบต่อนาที เป็นเงื่อนไขในการทดลอง จากนั้นนำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วไปทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของแนวเชื่อมและส่วนอื่น ๆ ของชิ้นงานที่ได้ผลกระทบจากการเชื่อม โดยใช้เครื่อง Micro Hardness Test และถ่ายภาพ Microphotograph ไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง (image analysis) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันของเฟส ferrite และ pearlite

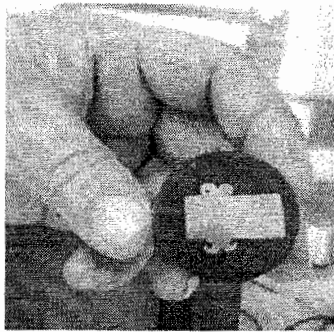
2.5 การทดสอบหาค่าความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ในการทดสอบความแข็งทำได้โดยนำชิ้นงานเฉพาะส่วนที่เชื่อมติดกันมาผ่าตามแนวแกนเพื่อให้เห็นรอยเชื่อมตลอดหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 4



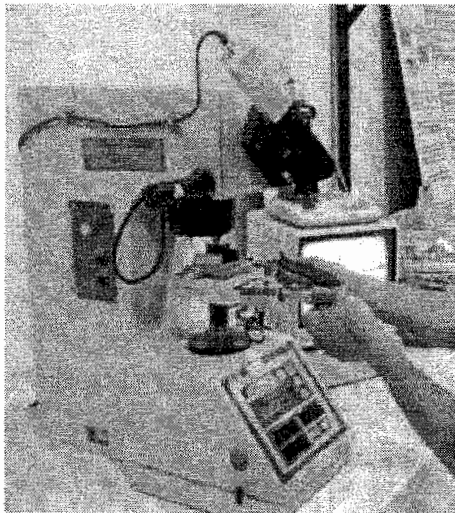
รูปที่ 4 ชิ้นงานเชื่อมที่ผ่าเพื่อทดสอบความแข็ง A คือแนวเชื่อมต่อของชิ้นงาน B คือบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม C คือแนวที่วัดค่าความแข็งและถ่ายภาพวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

เมื่อผ่าชิ้นงานที่จะทดสอบเสร็จแล้ว ต้องนำชิ้นงานไปทำเว็ทเท็ม เพื่อความสะดวกในการเตรียมพื้นผิว รวมถึงการวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยเว็ทเท็มจะมีความหนามากกว่าความหนาของชิ้นทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถยึดชิ้นงานได้ดี จากนั้นจะนำชิ้นงานไปขัดเตรียมผิวจนมัน โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำเว็ทเท็มและขัดผิวแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ชิ้นงานที่ผ่านการทำเว็ทเท็มแล้ว

เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จะนำไปตรวจดูโครงสร้างเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์ แล้วบันทึกภาพที่ตำแหน่งต่างๆ ให้ความสัมพันธ์กับตำแหน่งที่จะวัดความแข็ง จากนั้นนำไปวัดค่าความแข็ง (Hardness Test) โดยใช้เครื่อง Micro Hardness ดังรูปที่ 6

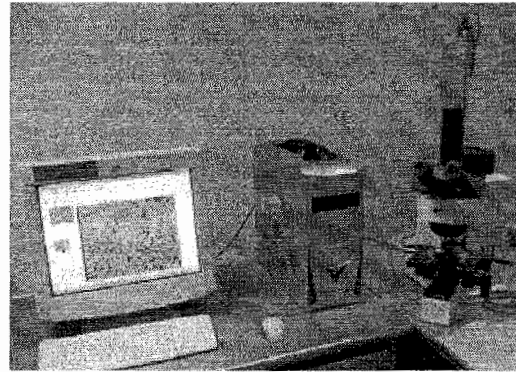


รูปที่ 6 เครื่องวัดความแข็ง ของ Multitoyo รุ่น MVK-H1 Micro Hardness Test

2.7 การวิเคราะห์โครงสร้าง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยาปัจจุบันได้ใช้ Software ทางคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ (Image analysis) ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและมีประสิทธิภาพ ฉะนั้น Image analysis จึงเป็นกระบวนการที่จะใช้

ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ได้แก่ การหาขนาดเกรน (Grain Size Number) การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์เฟส ferrite และ pearlite เป็นต้น ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างยี่ห้อ Olympus รุ่น Olysia M3 ดังแสดงในรูปที่ 7

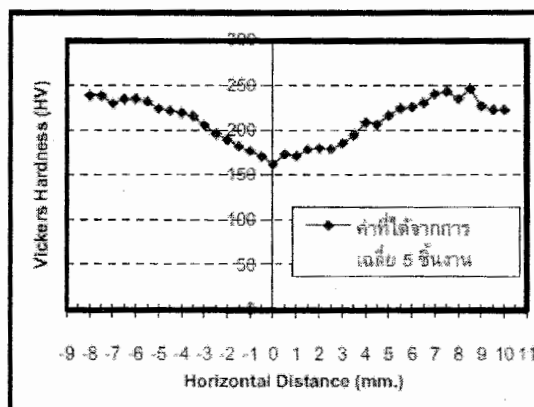


รูปที่ 7 เครื่อง Image Analysis ยี่ห้อ Olympus รุ่น Olysia M3

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ ของรอยเชื่อม

ในการทดสอบความแข็งที่บริเวณต่างๆ ของรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers Hardness วัดความแข็งจากตำแหน่งกึ่งกลางของรอยเชื่อม หรือตำแหน่งที่ชิ้นงานชนตัวฟิล์มกันและวัดตามแนวแกนของชิ้นงานไปทางซ้ายขวาและซ้ายของแนวเชื่อม โดยทำการทดสอบความแข็งด้วยการเฉลี่ยจาก 5 ชิ้นงาน ผลการทดลองได้ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 8 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคได้สัดส่วนองค์ประกอบของชิ้นงานเชื่อมเทียบกับชิ้นงานเดิม ดังแสดงในตารางที่ 3 นอกจากนี้ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนและหลังการเชื่อมยังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ

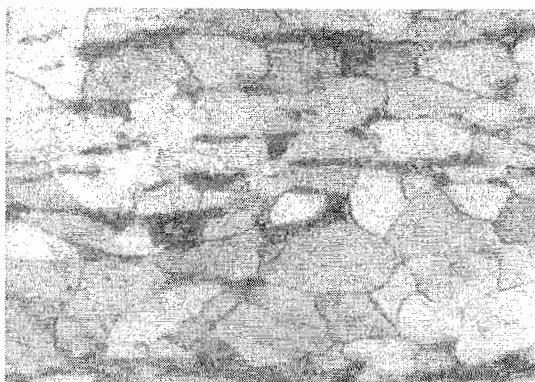


รูปที่ 8 กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานภายใต้แรงดันในการเสียดทาน 10 บาร์ เวลาในการเสียดทาน 9 วินาที แรงดันในการเชื่อม 60 บาร์ เวลาในการเชื่อม 3 วินาที ความเร็วรอบในการหมุน 1200 รอบต่อนาที

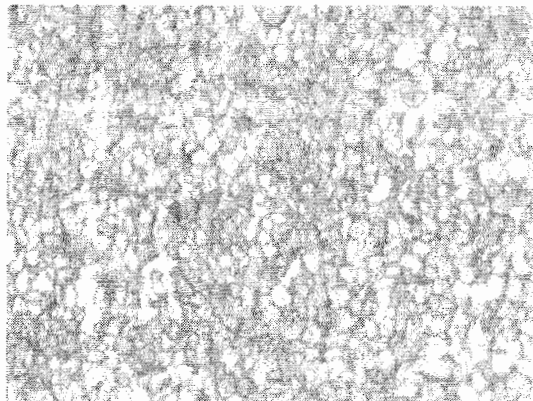
จากรูปที่ 8 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งรอยเชื่อมที่ขึ้นงานล้มก็สังเกตเห็นความแข็งจะต่ำกว่าตำแหน่งอื่น โดยมีลักษณะคล้ายๆ ณะกะทะหอบที่ตำแหน่งไกลจากจุดเชื่อมนี้ออกไปค่าความแข็งจะค่อยๆ สูงขึ้นจนมีค่าคงที่เมื่อเข้าสู่ชิ้นงานเดิม ผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมตอลดลง จึงต้องวิเคราะห์หาผลที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Image Analysis พบว่าการที่ความแข็งที่ตำแหน่งรอยเชื่อมมีค่าต่ำกว่านั้น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีกันในขณะที่เครื่องทำการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ผลจากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง พบว่าเปอร์เซ็นต์ของ Pearlite ที่บริเวณแนวเชื่อมลดลง และเปอร์เซ็นต์ของ Ferrite เพิ่มขึ้นตั้งแต่ระยะในตารางที่ 3 และรูปที่ 9 - 10 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความแข็งของ Ferrite (เกรนของ Ferrite มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 74 - 159 HV) มีค่าความแข็งน้อยกว่าค่าความแข็งของ Pearlite (เกรนของ Pearlite มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 184 - 390 HV) การลดลงของจำนวน Pearlite ดังกล่าวเกิดจากบริเวณแกนกลางของรอยเชื่อม มีการเป็นตัวซ้ำ (การเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นเป็นการเชื่อมชิ้นงานทั้งหน้าตัดไม่ได้เชื่อมเฉพาะบริเวณผิวเหมือนการเชื่อมทั่วไป) จึงส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงและเมื่อห่างไกลจากรอยเชื่อมออกไปอิทธิพลของอุณหภูมิเริ่มลดน้อยลง เป็นผลให้ค่าความแข็งจึงมีค่าเข้าใกล้ชิ้นงานเดิมมากขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนเกรน (G number) ของแนวเชื่อมต่อมีจำนวนมากขึ้นหรือมีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้แนวเชื่อมต่อมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม

ตารางที่ 3 คุณสมบัติโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เชื่อมเทียบกับชิ้นงานเดิม (Base Iron) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงขนาดของเกรน (G number) และการแยกเปอร์เซ็นต์ของ Pearlite และ Ferrite

Materials	G number	%Pearlite	%Ferrite
Base Iron	10.19	10.68	89.32
After Welding	13.31	5.27	94.73



รูปที่ 8 เกรนเหล็กก่อนทำการเชื่อม (Base Iron) ซึ่งจะพบว่ามีขนาดของเกรนใหญ่กว่า และมีเปอร์เซ็นต์ Pearlite มากกว่าบริเวณแนวเชื่อม ดังที่แสดงในรูปที่ 10 (ขยาย 50 X)



รูปที่ 10 เกรนเหล็กบริเวณแนวเชื่อมต่อ ซึ่งมีเกรนที่ละเอียด และมีเปอร์เซ็นต์ของ Pearlite ลดน้อยลง (ขยาย 50 X)

4. สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากการพัฒนาสร้างเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานและผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองพบว่าเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบที่สร้างขึ้นมานี้สามารถทำงานได้ดีและสามารถนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับชิ้นปฏต่างๆที่จะมีผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อมวัสดุชนิดต่างๆ ได้

ในส่วนของ การเชื่อมเหล็กชนิด AISI 1015 ที่ใช้ในกรณีทดลองนี้พบว่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมต่อที่มีค่าความแข็งต่ำกว่านั้นเกิดมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่งการเชื่อมทำให้เปอร์เซ็นต์ของ Pearlite ลดน้อยลง ซึ่งส่งผลให้บริเวณแนวเชื่อมต่อมีความนุ่มมากขึ้นกว่าเดิม นอกจากนี้จากภาพถ่ายพบว่าเกรนของเหล็กที่บริเวณแนวเชื่อมต่อนั้นมีความละเอียดขึ้นกว่าเดิมมาก หรือมีจำนวนเกรนมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้แนวเชื่อมต่อมีความแข็งแรงสูงขึ้นด้วย

ในการศึกษาวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการศึกษาดังอิทธิพลของแรงดันและเวลาในการเชื่อมและการอัด ความเร็วรอบในการหมุน และอุณหภูมิจุดเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นตัวแปรที่อาจส่งผลถึงคุณสมบัติของวัสดุ และเป็นเงื่อนไขที่นำจะทำการศึกษาวิจัยต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยนี้ ขอขอบคุณ ผศ.สุริยา ไชยสวัสดิ์ และ ผศ.ดร.สุธงคณา ธี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และคำแนะนำต่องานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Mumin Sahin and H. Erol Akata "Joining with friction welding of plastically deformed steel" Journal of Materials Processing Technology 142 (2003), pp. 239-248

- [2] Mumin Sahin "Evaluation of the joint – interface properties of austenitic – stainless steels (AISI304) joined by friction welding" *Materials and Design* (2006).
- [3] N. Ozdemir, F. Sarsilmaz, A. Hascalik "Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welding AISI 304L to 4340 steel" (Short communication) *Materials and Design* 28 (2007), pp. 301-307
- [4] Hakan Ates, Mehmet Turker, Adem Kurt "Effect of friction pressure on the friction-welded MA956 iron – based superalloy" *Materials and Design* 28 (2007), pp. 948-953
- [5] P. Sathya, S. Aravindan, A. Noorul Haq "Some experimental investigation on friction welded stainless steel joints" *Materials and Design* (2007),

อิทธิพลของแรงดันเสียดทานต่อคุณสมบัติของเหล็กที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน

Effect of Friction Pressure on The Property of Round Steele Joined by Friction Welding

สุรสิงห์ อารยางกูร¹ และ ชวลิต กิ่งวงค์พิทักษ์²

¹ นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34100 โทรศัพท์ 045-353381-2 โทรสาร 045-353 333, email: surasing_1111@thaimail.com

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34100 โทรศัพท์ 045-353381-2 โทรสาร 045-353 333, email: chawalit@rocketmail.com

บทคัดย่อ

การเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นเป็นวิธีการเชื่อมอีกรูปหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมในวงกว้าง เนื่องจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถเชื่อมได้ตลอดทั้งหน้าตัด ในขณะที่การเชื่อมแบบปกติทั่วไปเชื่อมได้เฉพาะรอบรูรอยต่อเท่านั้น นอกจากนี้การเชื่อมด้วยความเสียดทานยังใช้เวลาในการเชื่อมที่สั้นมากและคุณภาพรอยเชื่อมสูงที่ เนื่องจากไม่ขึ้นกับฝีมือช่างเชื่อม ด้วยข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมแบบนี้อย่างต่อเนื่องและกว้างขวาง ทั้งในแง่ของความเร็วรอบในการเชื่อม ความดันที่ใช้ในการเชื่อม เวลาที่เหมาะสมในการเชื่อม และคุณสมบัติของรอยเชื่อม ทั้งในระดับจุลภาค และมหภาค งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาและแรงดันในการเชื่อมเหล็กกลม ซึ่งตัวแปรทั้งสองนี้มีผลต่อความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) ของรอยเชื่อม ตลอดจนโครงสร้างของเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดจากการเชื่อม

งานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมเหล็กกลมชนิด AISI 1015 โดยทำการทดลองเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆได้แก่ แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ที่ 10,15,20,25,30,35 และ 40 บาร์ ตามลำดับ โดยกำหนดค่าตัวแปรที่ได้แก่ เวลาในการเสียดทาน (Friction Time) ที่ 9 วินาที แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ที่ 60 บาร์ เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ที่ 3 วินาที ความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed) ที่ 1200 รอบต่อนาที เป็นเงื่อนไขในการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าแรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ที่ 10 บาร์ และเวลาในการเสียดทาน (Friction Time) ที่ 9 วินาที ให้ผลในการเชื่อมที่ดีที่สุด โดยรอยเชื่อมมีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 1826.67 Kg-f ซึ่งมากกว่าชิ้นงานเดิม 17.09 %

Abstract

Friction welding has been widely used in many engineering applications. This is because friction welding can join materials

through the whole cross section while the conventional welding can do only around the edge of section. Furthermore, friction welding requires shorter welding time and offer very constant welding quality because it is independent from human skill.

Therefore, this welding technique has been studied widely and continuously, focusing on many parameters such as friction speed, friction time, friction pressure, micro and macro structures of welding zone. This research is also aimed to investigate the influence of friction time and friction pressure on hardness and strength of welded elements as well as its micro structure.

A number of AISI 1015 round steels was welded by friction welding. Friction pressure was varied from 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 bar. Friction time 9 seconds. Upset pressure, Upset time and welding speed were fixed at 60 bar, 3 seconds and 1,200 rpm respectively.

The optimum condition obtained from this study is friction pressure at 10 bar, friction time of 9 seconds. Archived maximum tensile force is 1,826.67 Kg-f which is 17.09 % higher than the mother piece.

1. คำนำ

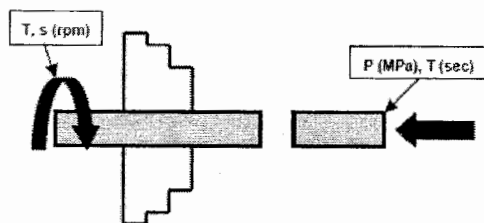
ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยความเสียดทานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างหลากหลายเนื่องจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีคุณภาพความแข็งแรงสูง สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ การเชื่อมด้วยความเสียดทานมีข้อดีหลายประการเช่น ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างฝีมือ ชิ้นงานที่เชื่อมมีการผสมผสานทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม ไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุช่วยประสาน ซึ่งเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยไฟฟ้าโดยใช้รูปเชื่อมเป็นตัวเชื่อมผสมผสานพบว่าการใช้รูปเชื่อมนี้มีลักษณะเหมือนการพอก

เพราะเป็นการเชื่อมที่บริเวณผิวด้านนอกของชิ้นงานมากกว่า โดยเฉพาะเมื่อชิ้นงานมีพื้นผิวที่ตื้นมากขึ้นความแข็งและของแนวเชื่อม ยิ่งน้อยลง ซึ่งต่างจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานเป็นอย่างมาก เพราะการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นให้คุณภาพของชิ้นงานที่เชื่อมทั่วทั้งหน้าตัดของแนวเชื่อม ด้วยข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีผู้วิจัย ศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมแบบนี้อีกอย่างต่อเนื่องและกว้างขวาง ได้แก่ Mumin Sahin และ H. Erol Akata [1] ได้ทำการศึกษากการเชื่อม เหล็กเพลลาขาวที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.17 - 0.23 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้วัสดุที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันและต่างขนาดกัน จากการศึกษา พบว่าการใช้แรงดันเสียดทาน 30 MPa และ เวลาเสียดทาน 5 วินาที มีผลทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากที่สุด นอกจากนี้ Mumin Sahin [2] ยังได้ทำการศึกษารอยเชื่อมต่อที่มีผลต่อความ แข็งแรงและโครงสร้างของวัสดุในระดับจุลภาค ของวัสดุ austenitic - stainless steels (AISI304) N. Ozdemir, F. Sarsilmaz และ A. Hascafi [3] ทำการศึกษาความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงานเชื่อมซึ่งมี ผลกระทบต่อโครงสร้าง ความแข็ง และความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อม ต่างชนิดกันระหว่างเหล็ก AISI 304L และเหล็ก AISI 4340 Hakan Ates, Mehmet Turker และ Adem Kurt [4] ทำการศึกษาแรงดันใน การเสียดทานของชิ้นงานเชื่อมซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้าง ความแข็ง และความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อม โดยใช้ MA956 Iron - Based Superalloy เป็นวัสดุในการศึกษาวิจัย และ P. Sathiya, S. Aravindan , A. Noorul Haq [5] ยังได้ทำการศึกษาเชิงสถิติของชิ้นงาน AISI 304L และ AISI 430 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทานซึ่งรอยเชื่อมต่อที่มีผล ต่อโครงสร้างของวัสดุในระดับจุลภาค

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของเวลาและ แรงดันในการเชื่อมเหล็กกล้าด้วยความเสียดทาน โดยทำการทดลอง เปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ แรงดันในการเสียดทาน(friction pressure) เวลาในการเสียดทาน(friction time) เพื่อให้ผลการเชื่อมที่ดี ที่สุด อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรอื่นๆอีกหลายตัวที่อาจมีผลต่อความ แข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยความเสียดทาน เช่น แรงดันในการเชื่อมช่วง แรงอัด ความยาวของชิ้นงานที่หายไป และลักษณะของผิวสัมผัสเป็น ต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะทำการศึกษาคือไปในอนาคต

2. เครื่องมือและวิธีการศึกษา

2.1 แนวคิดเบื้องต้นของระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

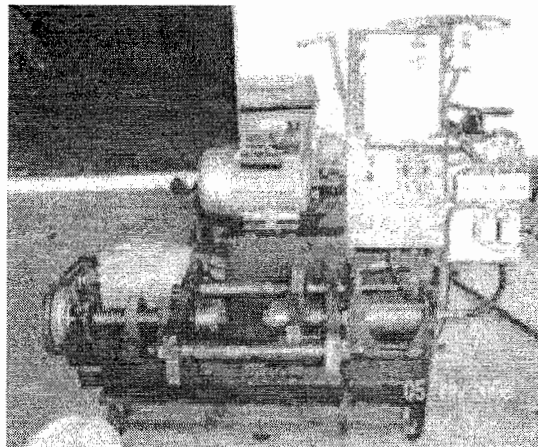


รูปที่ 1 ระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน

ระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้น อาศัยหลักการเปลี่ยนแรงเสียดทานเป็นพลังงานความร้อนในการเชื่อมชิ้นงานให้ติดกัน ในการเชื่อม นั้นทำได้โดยการหมุนชิ้นงานหนึ่งด้วยความเร็ว และแรงบีดค้ำหนึ่ง จากนั้นสร้างแรงดัน (Friction Pressure) ดันให้ชิ้นงานนั้นไปสัมผัส และหมุนเสียดสีกับชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่ยึดติดกับที่แล้วปล่อยให้เกิดการ เสียดสีกันจนเกิดความร้อนหลอมให้หน้าสัมผัสทั้งสองเข้าสู่สภาวะเหน็ด จึงให้แรงดันอัด (Upset Pressure) เพื่ออัดชิ้นงานให้ติดกัน รูปที่ 1 แสดงภาพระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยพลังงานความร้อนที่ ชิ้นงานทั้งสองได้รับนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว ได้แก่ แรงบีด ความเร็วรอบ ระยะเวลาในการให้แรงในแนวแกน ค่าแรงในแนวแกนใน แต่ละช่วงของการเชื่อม เป็นต้น

2.2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบได้ถูกสร้างขึ้นตามแนวคิด ข้างต้นโดยมีมอเตอร์ขนาด 5 Hp เป็นต้นกำเนิดในการหมุนชิ้นงาน และใช้ระบบไฮดรอลิกส์ในการสร้างแรงดันอัดชิ้นงานเพื่อเชื่อม เครื่อง เชื่อมนี้ควบคุมการทำงานโดยใช้ระบบ Solenoid Valve และมีระบบ ควบคุมเวลาเปิดเพื่อทำการทดลองให้ใช้ inverter ขนาด 5 Hp ในการควบคุมความเร็วรอบการทำงาน โครงสร้างทั้งหมดของเครื่อง เชื่อมสร้างบนฐานคอนกรีตเพื่อลดปัญหาการสั่นสะเทือน รูปที่ 2 แสดงรูปของเครื่องเชื่อมต้นแบบที่สร้างสำเร็จแล้วและใช้ในการทดลอง ส่วนตารางที่ 1 แสดงรายการอุปกรณ์และคุณสมบัติของอุปกรณ์ ประกอบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ



รูปที่ 2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน (Friction Welding Machine) ที่สร้างขึ้นเพื่อการทดลอง

ตารางที่ 1 อุปกรณ์และคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

รายการ	อุปกรณ์/คุณสมบัติ
มอเตอร์ปั๊มไฮดรอลิกส์	220 V / 3 Hp
มอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	380 V / 5 Hp
ระบบวาล์วควบคุมไฮดรอลิกส์	Manual Relief Valves
ระบบวาล์วควบคุมการ เปิด-ปิดไฮดรอลิกส์	Solenoid Valves 220 V
กระบอกไฮดรอลิกส์	4 inches
ระบบควบคุมความเร็วของกระบอกไฮดรอลิกส์	Manual Flow control Valves
ระบบควบคุมเวลาในการทำงาน	Timer
แรงดันปั๊มไฮดรอลิกส์	100 Bar
ระบบควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	Inverter

2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนตามท้องตลาดเรียกว่า เหล็กเพลทขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร และได้้นำชิ้นงานไปทดสอบเพื่อหาส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้มาตรฐานของระบบ SAE-AISI (American Iron and Steel Institute) และจากการตรวจหาส่วนประกอบทางเคมีพบว่า เป็นเหล็กชนิด AISI 1015 มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

Material	%C	%P	%S	%Mn	%Si	%Cr
AISI 1015	0.15	0.03	0.01	0.47	0.17	0.01

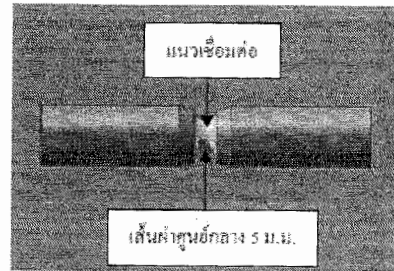
2.4 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ จะใช้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานดังที่แสดงในรูปที่ 2 ทำการเชื่อมชิ้นงานกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาวก่อนและ 100 มิลลิเมตร จำนวน 2 ท่อน ให้ติดกันโดยอาศัยหลักการเชื่อมดังที่ได้อธิบายมาแล้ว โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้ ให้แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) มี 7 ค่าคือ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 บาร์ ให้เวลาในการเสียดทาน (Friction Time) ที่ 9 วินาที และกำหนดค่าตัวคงที่ที่ได้นักแรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ที่ 60 บาร์ เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ที่ 3 วินาที ความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed) ที่ 1200 รอบต่อนาที เป็นเงื่อนไขในการทดลอง จากนั้นนำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วไปทดสอบ เพื่อหาค่าความแข็งแรงและค่าความแข็งของรอยเชื่อมต่อ

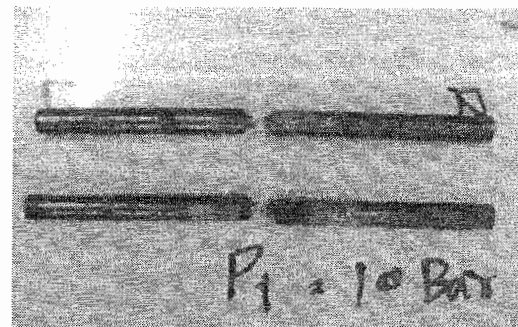
2.5 การทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยความเสียดทานแล้ว จะถูกนำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงโดยใช้เครื่องทดสอบการดึง อย่างไรก็ตาม

เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการขาดที่ตำแหน่งของรอยเชื่อมจริงๆ จึงจำเป็นต้องทำการกลึงบางชิ้นงานที่ตำแหน่งของรอยเชื่อม โดยทำการกลึงให้รอยบากมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรงโดยการดึง (Tensile Test) และตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการดึง ดังแสดงในรูปที่ 4



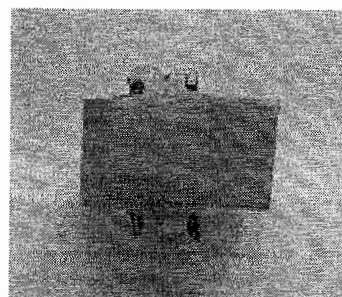
รูปที่ 3 แบบชิ้นงานที่นำไปกลึงบางตรงแนวเชื่อมต่อ



รูปที่ 4 ชิ้นงานที่กลึงบางแล้วเมื่อนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงพบว่าจุดที่ขาดจากกันเป็นจุดเชื่อมต่อจริง ซึ่งจะหาค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมต่อดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 8

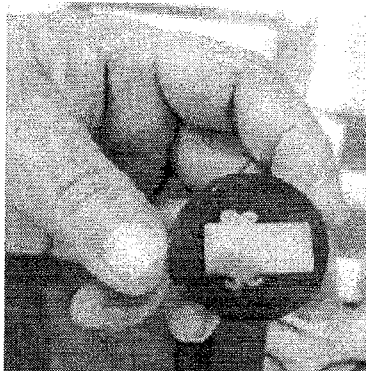
2.6 การทดสอบหาค่าความแข็ง

ชิ้นงานจะถูกนำมาทดสอบหาค่าความแข็งของรอยเชื่อม โดยนำชิ้นงานเฉพาะส่วนที่เชื่อมติดกันมาผ่าตามแนวแกนเพื่อให้เห็นรอยเชื่อมตลอดหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 5



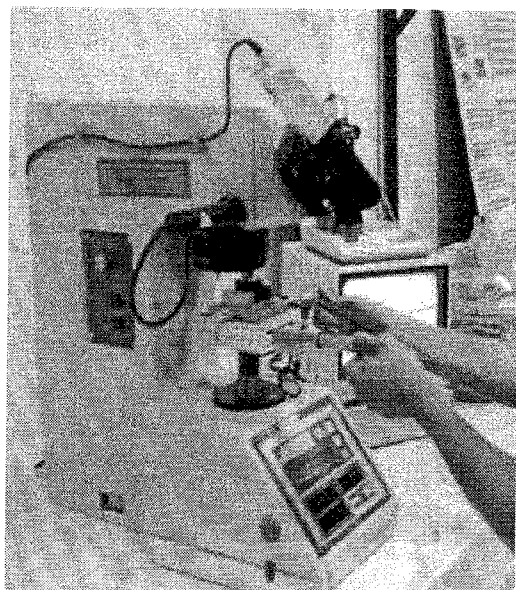
รูปที่ 5 แสดงชิ้นงานเชื่อมที่ผ่าเพื่อทดสอบความแข็ง

เมื่อผ้าชิ้นงานที่จะทดสอบเสร็จแล้ว ต้องนำชิ้นงานไปทำเรื่องหม้ม เพื่อความสะดวกในการเตรียมพื้นผิว รวมทั้งการวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยเรื่องหม้มจะมีความหนามากกว่าความหนาของชิ้นทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถยึดชิ้นงานได้ดี จากนั้นจะนำชิ้นงานไปขัดเตรียมผิวจนมัน โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำเรื่องหม้มและขัดผิวแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการทำเรื่องหม้มแล้ว

เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จะนำไปตรวจสอบดูโครงสร้างเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์ แล้วบันทึกภาพที่ตำแหน่งต่างๆ ให้มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งที่จะวัดความแข็ง จากนั้นนำไปวัดค่าความแข็ง(Hardness Test) โดยใช้เครื่อง Micro Hardness ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงเครื่องวัดความแข็งชนิด Micro Hardness Test ของ Multitoyo

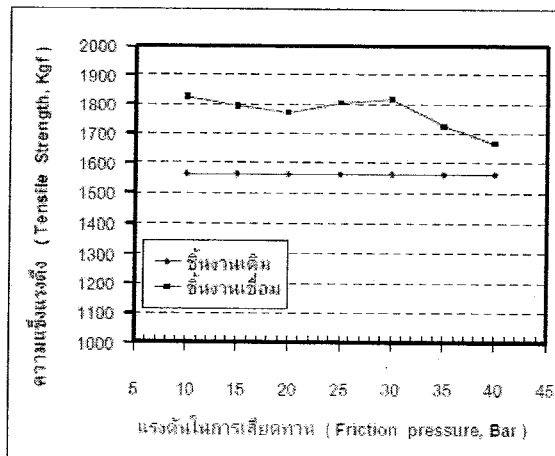
3. ผลการทดลองและอธิบายผลการทดลอง

3.1 อิทธิพลของแรงดันเสียดทาน (Friction Pressure) ต่อแรงต้านการดึงของรอยเชื่อม

ในงานวิจัยนี้ได้นำชิ้นงานมาทดลองเชื่อมตามขบวนการที่ได้ อธิบายมาแล้ว โดยในขั้นแรกได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแรงดันการเสียดทาน โดยทำการเชื่อมชิ้นงานที่แรงดันเสียดทานจาก 10 - 40 บาร์ และปรับเปลี่ยนแรงดันทุกๆ 5 บาร์ ในขณะที่เงื่อนไขอื่นๆคงที่ อธิบายแล้วนำชิ้นงานมาทดสอบแรงดึงดังได้อธิบายมาแล้ว ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 และนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 8

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองหาแรงต้านการดึงของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แรงดันเสียดทานต่างๆ

ตัวอย่างที่ Trial no.	แรงดันการเสียดสี Friction Pressure (Bar)	เวลาการเสียดสี Friction Time (วินาที)	แรงต้านการดึง Tensile Force (Kg-f)
1	10	9	1826
2	15	9	1792
3	20	9	1769
4	25	9	1803
5	30	9	1815
6	35	9	1724
7	40	9	1667

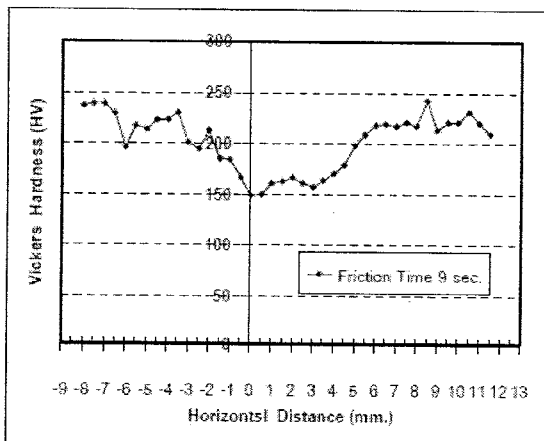


รูปที่ 8 กราฟแสดงค่าความต้านทานการดึงของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แรงดันในการเสียดทานในช่วงต่างๆ

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 และรูปที่ 8 จะเห็นว่าเมื่อใช้แรงดันเสียดทานในการเชื่อมสูงขึ้น แรงต้านการดึงของชิ้นงานที่ได้มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้แรงดันเสียดทานมากไปรอยเชื่อมอาจได้รับความร้อนมากขึ้น ทำให้โครงสร้างอ่อนตัวและความแข็งแรงลดลง จากผลการทดลองพบว่าที่แรงดันเสียดทาน 10 บาร์ เป็นแรงดันเสียดทานที่ทำให้รอยเชื่อมมีค่าความต้านทานการดึงสูงสุด

3.2 ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ ของรอยเชื่อม

นอกจากการทดสอบค่าความต้านทานการดึงแล้วชิ้นงานที่เชื่อมแล้วยังถูกนำไปทดสอบความแข็งที่บริเวณต่างๆ ของรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers โดยได้วัดความแข็งจากตำแหน่งกึ่งกลางของรอยเชื่อม หรือตำแหน่งที่ชิ้นงานชนสัมผัสกันและวัดความหนาแน่นของชิ้นงานไปทางด้านขวาและซ้ายของแนวเชื่อม ผลการทดสอบได้ค่าความแข็งแรงที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของ 3 ชิ้นงานภายใต้แรงดันในการเสียดทานที่ 10 บาร์และเวลาในการเสียดทานที่ 9 วินาที ซึ่งเป็นชิ้นที่มีค่าของแรงต้านการดึงที่แสดงในตารางที่ 3

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งรอยเชื่อมซึ่งชิ้นงานสัมผัสกันนั้นความแข็งจะต่ำกว่าตำแหน่งอื่นๆ โดยมีลักษณะคล้ายๆ แอ่งกระทะหงายที่ตำแหน่งใกล้จากจุดเชื่อมนี้ออกไปค่าความแข็งจะค่อยๆ สูงขึ้นจนมีค่าคงที่เมื่อเข้าสู่ชิ้นงานเดิม การที่ความแข็งที่ตำแหน่งรอยเชื่อมมีค่าต่ำ อาจเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่รอยเชื่อม ก่อให้เกิดขบวนการอบอ่อนขึ้นที่บริเวณรอยเชื่อมนั้น ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงและเมื่อห่างไกลจากรอยเชื่อมออกไปอิทธิพลของอุณหภูมิเริ่มลดน้อยลง เป็นผลให้ค่าความแข็งจึงมีค่าเข้าใกล้ชิ้นงานเดิมมากขึ้นเรื่อยๆ

4. สรุปผลการศึกษารวิจัย

เหล็กเพลลาขาว AISI 1015 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยใช้แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ที่ 10 บาร์ เวลาในการ

เสียดทาน (Friction Time) ที่ 9 วินาที แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ที่ 80 บาร์ เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ที่ 3 วินาที ความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed) ที่ 1200 รอบต่อนาที ให้ผลในการเชื่อมที่ดีที่สุด โดยรอยเชื่อมมีความแข็งแรงเท่ากับ 1826.67 Kg-f ซึ่งมากกว่าชิ้นงานเดิม 17.09 %

อย่างไรก็ตามในการศึกษารวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการศึกษาถึงแรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed) และอุณหภูมิจุดเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นตัวแปรที่อาจส่งผลถึงคุณสมบัติของวัสดุ และเป็นเงื่อนไขที่น่าจะทำการศึกษารวิจัยต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ผศ.สุริยา โชคสวัสดิ์ และ ผศ.ดร.สุชัญภิตตา ลี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และคำแนะนำต่องานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mumin Sahin and H. Erol Akata "Joining with friction welding of plastically deformed steel" Journal of Materials Processing Technology 142 (2003), pp. 239-246
- [2] Mumin Sahin "Evaluation of the joint - interface properties of austenitic - stainless steels (AISI304) joined by friction welding" Materials and Design (2006),
- [3] N. Ozdemir, F. Sarsilmaz, A. Hascalik "Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welding AISI 304L to 4340 steel" (Short communication) Materials and Design 28 (2007), pp. 301-307
- [4] Hakan Ates, Mehmet Turker, Adem Kurt "Effect of friction pressure on the friction-welded MA956 iron - based superalloy" Materials and Design 28 (2007), pp. 948-953
- [5] P. Sathiya , S. Aravindan , A. Noorul Haq "Some experimental investigation on friction welded stainless steel joints" Materials and Design (2007),

การประชุมวิชาการระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ครั้งที่ 1

อิทธิพลของเวลาและแรงดันในการเชื่อมเหล็กกลมด้วยความเสียดทาน

The influence of time and pressure on steel rod welded by friction welding

สุรสิงห์ อารยางกูร¹, กฤษดา วะหาโร², พันนวิวัฒน์ วงศ์ประทุม³, และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์¹

¹นักศึกษาระดับมหาบัณฑิต ²นักศึกษาระดับปริญญาตรี ³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

โทร. 045-353381-2 โทรสาร 045-353 333 *อีเมลล์ surasing_1111@thaimail.com

Surasing Arayangkoo¹, Kritzada Waharo², Panuwat Wongpratoom³, and Chawalit Thinvongpituk¹

¹Master Degree Student ²Bachelor Degree Student ³Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

Ubonratchathani University, Warin Chamrab Ubonratchathan, Thailand 34190

Tel: 045-353381-2, Fax: 045-353333 email: surasing_1111@thaimail.com

บทคัดย่อ

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานนั้นเป็นวิธีการเชื่อมอีกวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมสูงในวงกว้าง เนื่องจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถเชื่อมได้ตลอดทั้งหน้าตัด ในขณะที่การเชื่อมแบบปกติทั่วไปเชื่อมได้เฉพาะรอบๆรอยต่อเท่านั้น นอกจากนี้การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานยังใช้เวลาในการเชื่อมที่สั้นมากและคุณภาพรอยเชื่อมคงที่ เนื่องจากไม่ขึ้นกับฝีมือช่างเชื่อมด้วยข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมแบบนี้อย่างต่อเนื่องและกว้างขวาง ทั้งในแง่ของความเร็วรอบในการเชื่อม ความดันที่ใช้ในการเชื่อม เวลาที่เหมาะสมในการเชื่อม และคุณสมบัติของรอยเชื่อม ทั้งในระดับจุลภาค และมหภาค งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาและแรงดันในการเชื่อมเหล็กกลม ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีผลต่อความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) ของรอยเชื่อม ตลอดจนโครงสร้างของเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดจากการเชื่อม

งานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมเหล็กกลมชนิด AISI 1015 โดยทำการทดลองเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ที่ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 บาร์ เวลาในการเสียดทาน (Friction Time) ที่ 7, 9, 11, 13 และ 15 วินาที ตามลำดับ โดยกำหนดค่าตัวคงที่ ได้แก่ แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ที่ 60 บาร์ เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ที่ 3 วินาที ความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed) ที่ 1200 รอบต่อ นาที เป็นเงื่อนไขในการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าแรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ที่ 10 บาร์ และเวลาในการเสียดทาน (Friction Time) ที่ 9 วินาที ให้ผลในการเชื่อมที่ดีที่สุด โดยรอยเชื่อมมีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 1826.67 Kg-f ซึ่งมากกว่าชิ้นงานเดิม 17.09 %

Abstract

Friction welding has been widely used in many engineering applications. This is because friction welding can join materials through the whole cross section while the conventional welding can do only around the edge of section. Furthermore, friction welding requires shorter welding time and offer very constant welding quality because it is independent from human skill.

Therefore, this welding technique has been studied widely and continuously, focusing on many parameters such as friction speed, friction time, friction pressure, micro and macro structures of welding zone. This research is also aimed to investigate the influence of friction time and friction pressure on hardness and strength of welded elements as well as its micro structure.

A number of AISI 1015 round steels was welded by friction welding. Friction pressure was varied from 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 bar. Friction time was also varied from 7, 9, 11, 13 and 15 seconds. Upset pressure, Upset time and welding speed were fixed at 60 bar, 3 seconds and 1,200 rpm respectively.

The optimum condition obtained from this study is friction pressure at 10 bar, friction time of 9 seconds. Achieved maximum tensile force is 1,826.67 Kg-f which is 17.09 % higher than the mother piece.

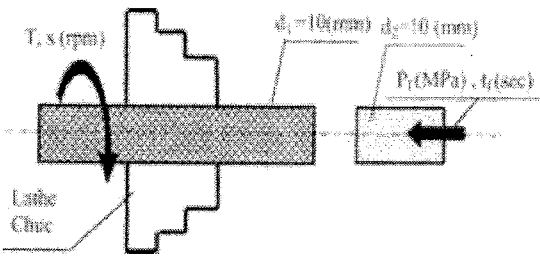
1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยความเสียดทานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างหลากหลายเนื่องจากเชื่อมด้วยความเสียดทานสามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีคุณภาพความแข็งแรงสูง สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ การเชื่อมด้วยความเสียดทานมีข้อดีหลายประการเช่น ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างฝีมือ ชิ้นงานที่เชื่อมมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งที่พื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม ไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุช่วยผสมผสาน ซึ่งเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยไฟฟ้าโดยใช้รูปเชื่อมเป็นคิ้วเชื่อมผสมผสานพบว่าการใช้รูปเชื่อมนี้มีลักษณะเหมือนการพอกเพราะเป็นการเชื่อมติดบริเวณผิวด้านนอกของชิ้นงานมากกว่าโดยเฉพาะเมื่อชิ้นงานมีพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นความแข็งแรงของแนวเชื่อมยิ่งน้อยลง ซึ่งต่างจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานเป็นอย่างมาก เพราะการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นให้คุณภาพของชิ้นงานที่เชื่อมทั่วทั้งหน้าตัดของแนวเชื่อม ด้วยข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงมีผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมแบบนี้อย่างต่อเนื่อง และกว้างขวาง ได้แก่ Mumia Sabin และ H. Erol Akara [1] ได้ทำการศึกษารายละเอียดของเหล็กพลาซมาที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.17-0.23 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้วัสดุที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันและต่างขนาดกัน จากการศึกษาพบว่าการใช้แรงดันเสียดทาน 30 MPa และเวลาเสียดทาน 5 วินาที มีผลทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากที่สุด นอกจากนี้ Mumia Sabina [2] ยังได้ทำการศึกษารอยเชื่อมต่อที่มีผลต่อความแข็งแรงและโครงสร้างของวัสดุในระดับลูกกลิ้ง ของวัสดุ austenitic - stainless steels (AISI304) N. Ozdemir, F. Sarsilmaz และ A. Hascelik [3] ทำการศึกษาความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงานเชื่อมซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้าง ความแข็งแรง และความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมต่างชนิดกันระหว่างเหล็ก AISI 304L และเหล็ก AISI 4340 Hakan Ates, Mehmet Tucker และ Adem Kurt [4] ทำการศึกษาแรงดันในการเสียดทานของชิ้นงานเชื่อมซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้าง ความแข็งแรง และความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อม โดยใช้ MA956 Iron - Based Superalloy เป็นวัสดุในการศึกษาวิจัย และ P. Sathiyaraj, S. Aravindan, A. Noorul Haq [5] ยังได้ทำการศึกษาเชิงสถิติของชิ้นงาน AISI 304L และ AISI 430 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทานซึ่งรอยเชื่อมต่อที่มีผลต่อโครงสร้างของวัสดุในระดับลูกกลิ้ง

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับอิทธิพลของเวลาและแรงดันในการเชื่อมเหล็กกล้าด้วยความเสียดทาน โดยทำการทดลองเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ แรงดันในการเสียดทาน(friction pressure) เวลาในการเสียดทาน(friction time) เพื่อให้ผลการเชื่อมที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามยังมีความแปรปรวนอีกหลายตัวที่อาจมีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยความเสียดทาน เช่น แรงดันในการเชื่อมช่วงแรจด์ ความยาวของชิ้นงานที่หายไป และลักษณะของผิวสัมผัสเป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ จะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

2. เครื่องมือและวิธีการศึกษา

2.1 แนวคิดเบื้องต้นของระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน



รูปที่ 1 ระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน [2]

ระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้น อาศัยหลักการเปลี่ยนแรงเสียดทานเป็นพลังงานความร้อนในการเชื่อมชิ้นงานให้ติดกัน ในการเชื่อมนี้ทำได้โดยการหมุนชิ้นงานหนึ่งด้วยความเร็ว และแรงบีบค้ำหนึ่ง จากนั้นสร้างแรงดัน (Friction Pressure) ดันให้ชิ้นงานนั้นไปสัมผัสและหมุนเสียดสีกับชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่ยึดติดกับที่แล้วปล่อยให้เกิดการเสียดสีกันจนเกิดความร้อนหลอมให้หน้าสัมผัสทั้งสองเข้าสู่สภาวะหนึ่งซึ่งให้แรงดันอัด (Upser Pressure) เพื่ออัดชิ้นงานให้ติดกัน รูปที่ 1 แสดงภาพระบบการเชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยพลังงานความร้อนที่ชิ้นงานทั้งสองได้รับนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว ได้แก่ แรงบิด ความเร็วรอบระยะเวลาในการให้แรงในแนวแกน ค่าแรงในแนวแกนในแต่ละช่วงของการเชื่อม เป็นต้น ซึ่งพลังงานความร้อนกับตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1

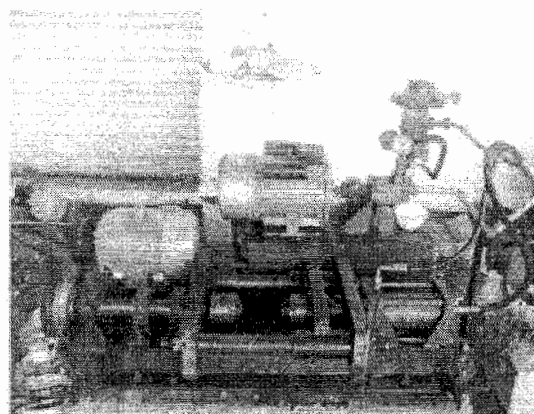
$$P = 2\pi nT \tag{2.1}$$

- โดยที่
- P คือกำลังความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม (Watt)
- n คือความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนในการเชื่อม (rpm)
- T คือค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการเอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น (N.m)

2.2 เครื่องมือเชื่อมด้วยความเสียดทาน

เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบได้ถูกสร้างขึ้นตามแนวคิดข้างต้นโดยมีมอเตอร์ขนาด 5 Hp เป็นต้นกำลังในการหมุนชิ้นงาน และใช้ระบบไฮดรอลิกในการสร้างแรงดันอัดชิ้นงานเพื่อเชื่อม เครื่องเชื่อมนี้ควบคุมการทำงานโดยใช้ระบบ Solenoid Valve และมีระบบควบคุมเวลาเปิดปิดเพื่อทำการทดลองได้ใช้ Inverter ขนาด 5 Hp ในการควบคุมความเร็วรอบการทำงาน โครงสร้างทั้งหมดของเครื่องเชื่อมสร้างบนฐานคอนกรีตเพื่อลดปัญหาการสั่นสะเทือน รูปที่ 2 แสดงรูปของเครื่องเชื่อมต้นแบบที่สร้างเสร็จแล้วและใช้ในการทดลอง ส่วนตารางที่ 1 แสดง

รายการอุปกรณ์และคุณสมบัติของอุปกรณ์ประกอบเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบ



รูปที่ 2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน (Friction Welding Machine) ที่สร้างขึ้นเพื่อการทดลอง

ตารางที่ 1 อุปกรณ์และคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

รายการ	อุปกรณ์/คุณสมบัติ
มอเตอร์ปั๊มไฮดรอลิกส์	220 V / 3 Hp
มอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	380 V / 5 Hp
ระบบวาล์วควบคุมไฮดรอลิกส์	Manual Relief Valves
ระบบวาล์วควบคุมการ เปิด-ปิด ไฮดรอลิกส์	Solenoid Valves 220 V
กระบอกไฮดรอลิกส์	4 inches
ระบบควบคุมความเร็วของกระบอกไฮดรอลิกส์	Manual Flow control Valves
ระบบควบคุมเวลาในการทำงาน	Timer
แรงดันปั๊มไฮดรอลิกส์	100 Bar
ระบบควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม	Inverter

2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนตามท้องตลาดเรียกว่า เหล็กเหลาขาวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร และได้นำชิ้นงานไปทดสอบเพื่อหาส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้มาตรฐานของระบบ SAE-AISI (American Iron and Steel Institute) และจากการตรวจหาส่วนประกอบทางเคมีพบว่า เป็นเหล็กชนิด AISI 1015 มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

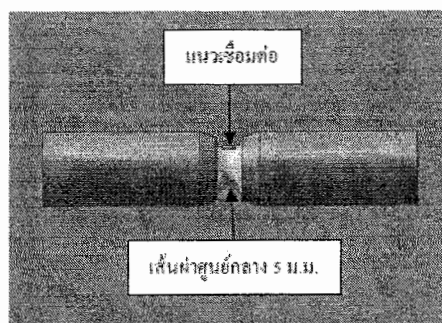
Material	%C	%P	%S	%Mn	%Si	%Cr	%Ni
AISI 1015	0.15	0.028	0.014	0.468	0.17	0.011	0.006

2.4 วิธีการทดลอง

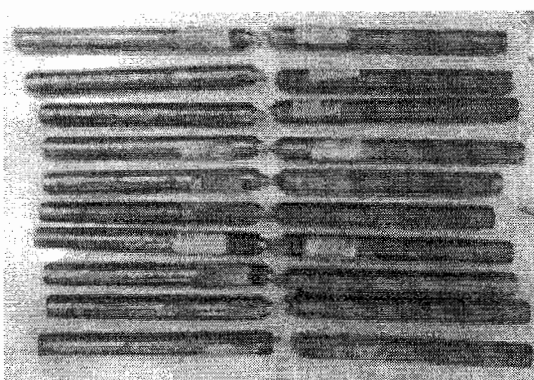
ในงานวิจัยนี้ จะใช้เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานดังที่แสดงในรูปที่ 2 ทำการเชื่อมชิ้นงานก่อนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร จำนวน 2 ท่อน ให้ติดกับโดยอาศัยหลักการเชื่อมดังที่ได้อธิบายมาแล้ว โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆดังต่อไปนี้ ให้แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) มี 7 ค่าคือ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 บาร์ ให้เวลาในการเสียดทาน (Friction Time) มี 5 ค่าคือ 7, 9, 11, 13 และ 15 วินาที และกำหนดค่าตัวแปรที่ให้แก่ แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ที่ 60 บาร์ เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ที่ 3 วินาที ความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed) ที่ 1200 รอบต่อนาที เย็นลงในไซในการทดลอง จากนั้นนำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วไปทดสอบ เพื่อหาค่าความแข็งแรงและค่าความแข็งของรอยเชื่อมต่อไป

2.5 การทดสอบหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยความเสียดทานแล้ว จะถูกนำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงโดยใช้เครื่องทดสอบการดึง อย่างไรก็ตามเพื่อให้ชิ้นงานเกิดการขาดที่ตำแหน่งของรอยเชื่อมจริง จึงจำเป็นต้องทำการกลึงบากชิ้นงานที่ตำแหน่งของรอยเชื่อม โดยทำการกลึงให้รอยบากมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรงโดยการดึง (Tensile Test) และตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการดึง ดังแสดงในรูปที่ 4



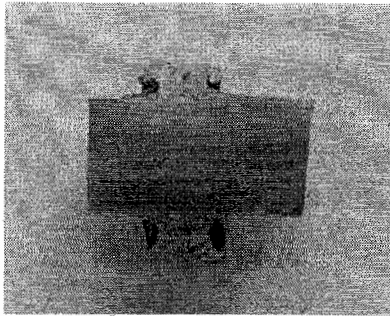
รูปที่ 3 เมฆบชิ้นงานที่นำไปกลึงบากตรงแนวเชื่อมต่อ



รูปที่ 4 ชิ้นงานที่กลึงบากแล้วเมื่อนำไปทดสอบ

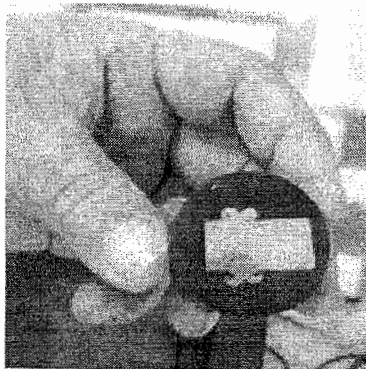
2.6 การทดสอบหาค่าความแข็ง

ชิ้นงานจะถูกนำมาทดสอบหาค่าความแข็งของรอยเชื่อม โดยนำชิ้นงานเฉพาะ ส่วนที่เชื่อมติดกันมาค่าความแนบจนเพื่อให้เห็นรอยเชื่อมตลอดหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 5



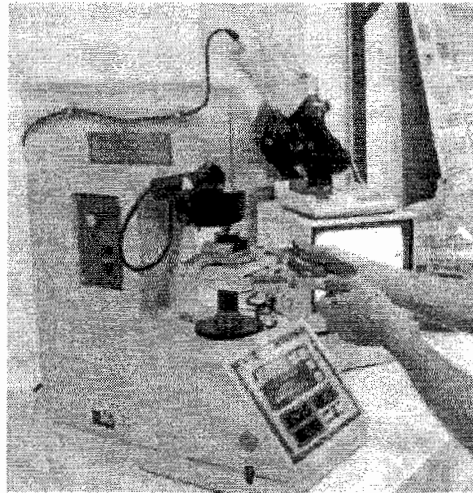
รูปที่ 5 แสดงชิ้นงานเชื่อมที่นำเพื่อทดสอบความแข็ง

เมื่อนำชิ้นงานที่จะทดสอบเสร็จแล้ว ต้องนำชิ้นงานไปทำเรือนหุ้มเพื่อความสะดวกในการเตรียมพื้นผิว รวมทั้งการวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยเรือนหุ้มจะมีความหนาแน่นมากกว่าความหนาของชิ้นทดสอบเล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถยึดชิ้นงานได้ดี จากนั้นจะนำชิ้นงานไปขัดผิวด้วยเจนนัน โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทำเรือนหุ้มและขัดผิวแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการทำเรือนหุ้มแล้ว

เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จะนำไปตรวจดูโครงสร้างเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์ แล้วบันทึกภาพที่ตำแหน่งต่างๆ ให้ความสัมพันธ์กับตำแหน่งที่จะวัดความแข็ง จากนั้นนำไปวัดค่าความแข็ง (Hardness Test) โดยใช้เครื่อง Micro Hardness ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงเครื่องวัดความแข็งชนิด Micro Hardness Test ของ Multiteste

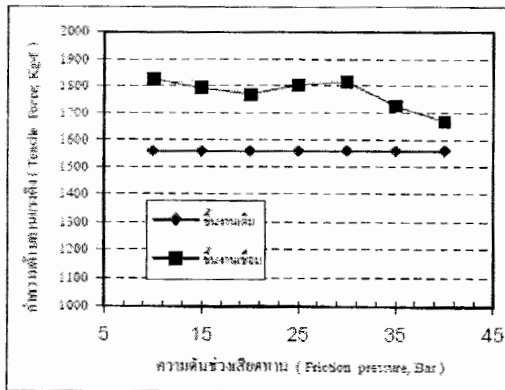
3. ผลการทดลองและอธิบายผลการทดลอง

3.1 อิทธิพลของแรงดันเสียดทาน (Friction Pressure) ต่อแรงต้านการดึงของรอยเชื่อม

ในงานวิจัยนี้ได้นำชิ้นงานมาทดลองเชื่อมตามขบวนการที่ได้อธิบายมาแล้ว โดยในขั้นแรกได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแรงดันการเลือกทาน โดยทำการเชื่อมชิ้นงานที่แรงดันเสียดทานจาก 10 - 40 บาร์ และปรับเปลี่ยนแรงดันทุกๆ 5 บาร์ ในขณะที่เงื่อนไขอื่นๆคงที่แล้วนำชิ้นงานมาทดสอบแรงดึงดังได้อธิบายมาแล้ว ผลการทดลองดังตารางที่ 3 และนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 8

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองหาแรงต้านการดึงของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แรงดันเสียดทานต่างๆ

ตัวอย่างที่	แรงดันการเสียดสี	เวลาการเสียดสี	แรงต้านการดึง
Trial no.	Friction Pressure (Bar)	Friction Time (วินาที)	Tensile Force (Kg-f)
1	10	9	1826
2	15	9	1792
3	20	9	1769
4	25	9	1803
5	30	9	1815
6	35	9	1724
7	40	9	1667



รูปที่ 8 กราฟแสดงค่าความต้านทานการดึงของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แรงดันในการเสียดทานในช่วงต่างๆ

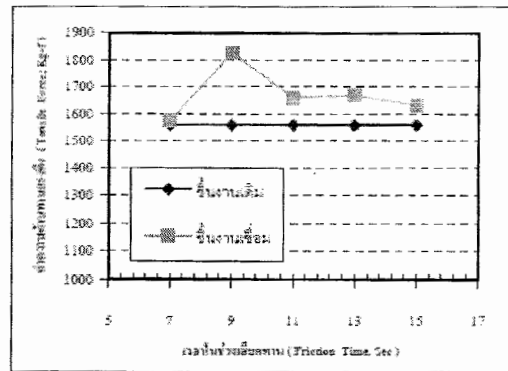
จากผลการทดลองในตารางที่ 3 และรูปที่ 8 จะเห็นว่าเมื่อใช้แรงดันเสียดทานในการเชื่อมสูงขึ้น แรงต้านการดึงของชิ้นงานที่ได้มีแนวโน้มลดน้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อใช้แรงดันเสียดทานมากไปรอยเชื่อมอาจได้รับความร้อนมากขึ้น ทำให้โครงสร้างอ่อนตัวและความแข็งแรงลดลง จากผลการทดลองพบว่าที่แรงดันเสียดทาน 10 บาร์ เป็นแรงดันเสียดทานที่ทำให้รอยเชื่อมมีค่าความต้านทานการดึงสูงสุด

3.2 อิทธิพลของเวลาเสียดทาน (Friction Time) ต่อแรงต้านการดึงของรอยเชื่อม

หลังจากได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของแรงดันเสียดทานแล้ว จึงได้นำเงื่อนไขนี้มาทดสอบหาอิทธิพลของเวลาต่อไป โดยการนำชิ้นงานมาเชื่อมภายใต้แรงดันเสียดทาน 10 บาร์ และเชื่อมภายใต้เวลาเสียดทานต่างกันคือ 7, 9, 11, 13 และ 15 วินาที โดยได้ตัวแปรอื่นๆคงที่ได้แก่ แรงดันอัด 60 บาร์ จากนั้นนำชิ้นงานที่เชื่อมได้ไปทดสอบหาความต้านทานการดึง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 9

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองหาแรงต้านการดึงของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้เวลาเสียดทานต่างๆ

ตัวอย่างที่ Trial no.	แรงดันการเสียดสี Friction Pressure (Bar)	เวลาการเสียดสี Friction Time (วินาที)	แรงต้านการดึง Tensile Force (Kg-f)
1	10	7	1573.33
2	10	9	1826.67
3	10	11	1660
4	10	13	1666.67
5	10	15	1633.33



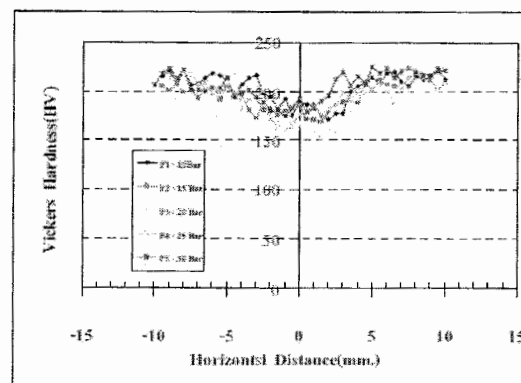
รูปที่ 9 กราฟแสดงค่าความต้านทานการดึงของชิ้นงานที่เชื่อมภายใต้แรงเวลาในการเสียดทานในช่วงต่างๆ

จากข้อมูลในตารางที่ 4 และรูปที่ 9 จะเห็นว่าเวลาเสียดทานที่ให้ค่าความต้านทานการดึงของรอยเชื่อมดีที่สุดคือ 9 วินาที หากเวลาเสียดทานสูงหรือน้อยกว่านี้ แนวโน้มความต้านทานการดึงของชิ้นงานเชื่อมจะลดลง

ดังนั้นจากผลการทดสอบภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน คือใช้แรงดันเสียดทาน 10 บาร์, เวลาเสียดทาน 9 วินาที, แรงดันอัด 60 บาร์, เวลาอัด 3 วินาที และความเร็วรอบของการเชื่อม 1,200 รอบต่อนาที

3.3 ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆของรอยเชื่อม

นอกจากการทดสอบค่าความต้านทานการดึงแล้วชิ้นงานที่เชื่อมแล้วยังถูกนำไปทดสอบความแข็งที่บริเวณต่างๆของรอยเชื่อม โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers โดยได้วัดความแข็งจากตำแหน่งกึ่งกลางของรอยเชื่อม หรือตำแหน่งที่ชิ้นงานชนสัมผัสกันและ วัดความแนวแกนของชิ้นงานไปทางข้างขวาและซ้ายของแนวเชื่อม ผลการทดสอบได้ค่าความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานภายใต้แรงดันในการเสียดทานในช่วงต่างๆและเวลาในการเสียดทานที่ 9 วินาที

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งรอยเชื่อมซึ่งขึ้นงานสัมพันธ์กันนั้น ความแข็งจะต่ำกว่าตำแหน่งอื่นๆ โดยมีลักษณะคล้ายๆ ช่องทะแหงาย ที่ตำแหน่งไกลจากจุดเชื่อมนี้ออกไปค่าความแข็งจะค่อยๆ สูงขึ้นจนมีค่าคงที่ เมื่อเข้าสู่ชิ้นงานเดิม การที่ความแข็งที่ตำแหน่งรอยเชื่อมมีค่าต่ำ อาจเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่รอยเชื่อม ก่อให้เกิดขบวนการอบอ่อนขึ้นที่บริเวณรอยเชื่อมนั้น ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงและเมื่อห่างไกลจากรอยเชื่อมออกไปอิทธิพลของอุณหภูมิเริ่มลดน้อยลง เป็นผลให้ค่าความแข็งจึงมีค่าเข้าใกล้ชิ้นงานเดิมมากขึ้นเรื่อยๆ

4. สรุปผลการศึกษาวีจีย

เหล็กเพลลาขาว AISI 1015 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน โดยให้แรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ที่ 10 บาร์ เวลาในการเสียดทาน (Friction Time) ที่ 9 วินาที แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ที่ 60 บาร์ เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ที่ 3 วินาที ความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed) ที่ 1200 รอบต่อนาที ให้ผลในการเชื่อมที่ดีที่สุด โดยรอยเชื่อมมีความแข็งแรงเท่ากับ 1826.67 Kg-f ซึ่งมากกว่าชิ้นงานเดิม 17.09 %

อย่างไรก็ตามในการศึกษาวีจียนี้ยังไม่ได้ทำการศึกษาดัง แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ความเร็วรอบในการหมุน (Rotational Speed) และอุณหภูมิจุดเชื่อมคือ ซึ่งเป็นตัวแปรที่อาจส่งผลถึงคุณสมบัติของวัสดุ และเป็นเงื่อนไขที่น่าจะทำการศึกษาวีจียต่อไป

5. ถิ่นที่กรมประกาศ

ขอขอบคุณศาสตราจารย์วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ผศ.สุวิยา ไชลศรีสวัสดิ์ และ ผศ.ดร.สุขอังกุลภา ลี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และคำแนะนำต่องานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mumin Sahin and H. Erol Akata "Joining with friction welding of plastically deformed steel" Journal of Materials Processing Technology 142 (2003), pp. 239-246
- [2] Mumin Sahin "Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI304) joined by friction welding" Materials and Design (2006).
- [3] N. Ozdemir, F. Sarilmaz, A. Hascalik "Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welding AISI 304L to 4340 steel" (Short communication) Materials and Design 28 (2007), pp. 301-307
- [4] Hakan Atez, Mehmet Turker, Adem Kurt "Effect of friction pressure on the friction-welded MA956 iron-based superalloy" Materials and Design 28 (2007), pp. 948-953

- [5] P. Sathiya, S. Aravindan, A. Noorul Haq "Some experimental investigation on friction welded stainless steel joints" Materials and Design (2007).

