

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อ
สมบัติทางกลของรอยต่อโลหะ

A STUDY ON EFFECT OF FRICTION WELDING
PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF
METAL JOINT



T119351

น.ส. มาริสา เจิมประไพ

MS. MARISA GERMPRAPAI

น.ส. รัชดา โภคา

MS. RATCHADA PHOKHA

น.ส. วรดา พัฒนอังกุล

MS. WORADA PATANAUNGKUL

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 119351
วัน,เดือน,ปี..... - 7 ส.ค. 2554

119351/99
b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2553
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY ON EFFECT OF FRICTION WELDING
PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF
METAL JOINT**



**THIS THESIS IS A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษา **ACADEMIC YEAR 2010** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกล
ของรอยต่อโลหะ

A Study on Effect of Friction Welding Parameters on Mechanical Properties of
Metal Joint

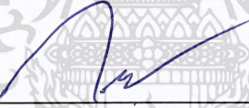
นักศึกษา

นางสาวมารีสา เจริญประไพ	รหัสประจำตัว	50011229
นางสาวรัชดา โภคา	รหัสประจำตัว	50011283
นางสาวรดา พัฒนอังกุล	รหัสประจำตัว	50011356

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์


(รศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกลของรอยต่อโลหะ			
นักศึกษา	นางสาวมาริสา	เจิมประไพ	รหัสประจำตัว	50011229
	นางสาวรัชดา	โกคา	รหัสประจำตัว	50011283
	นางสาวรรดา	พัฒนาองกุล	รหัสประจำตัว	50011356
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ			
ปีการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง			
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	2553			
	รศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ			

บทคัดย่อ

โครงการปริญญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกลของรอยต่อโลหะและพัฒนาเทคนิคการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานสำหรับการเชื่อมอลูมิเนียม 6061 ซึ่งเครื่องเชื่อมแบบแรงเสียดทานในปริญญานิพนธ์นี้ได้จากการดัดแปลงเครื่องเจาะที่มีความเร็วในการหมุนประมาณ 150-2450 รอบต่อนาที โดยศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย คือ น้ำหนักกดเสียดทาน น้ำหนักกดอยู่ ความเร็วรอบ และเวลาที่ใช้การกด ออกแบบตารางการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs) ซึ่งกำหนดระดับแต่ละปัจจัยเท่ากับ 2 จากนั้นนำไปทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึง ด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที วิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อสรุปปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลคือ น้ำหนักกดเสียดทาน (Friction Weight) ความเร็วรอบ (Speed) และปัจจัยร่วมระหว่างน้ำหนักกดเสียดทานกับความเร็วรอบ มีความสำคัญต่อค่าความต้านทานแรงดึงในการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน หลังจากนั้นวิเคราะห์หาความสัมพันธ์โดยใช้แฟคทอเรียลพล็อต (Factorial Plot) พบว่าที่ความเร็วรอบ (Speed) 1874 รอบต่อนาที จะให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ที่น้ำหนักกดเสียดทานเท่ากับ 56 กิโลกรัม และที่ความเร็วรอบ 2613.5 รอบต่อนาที จะให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่น้ำหนักกดเสียดทานเท่ากับ 45 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Study on Effect of Friction Welding Parameters on Mechanical Properties of Metal Joint	
Student	Ms. Marisa	Germprapai
	Ms. Ratchada	Phokha
	Ms. Worada	Patanaungkul
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
Academic Year	2010	
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri	

ABSTRACT

This thesis is to study on effect of friction welding parameters on mechanical properties of metal joint and to develop friction welding technique for aluminum 6061. The friction welding machine for this experiment was modified from an electric drill with a rotational speed of about 150-2450 rpm. The welding parameters were friction weight, upset weight, rotational speed and upset time. The experiment was performed using 2^k factorial design. Tensile strength of welded joint was tested at a cross-head speed of 1 mm/min. At a significance level of 0.05, it was found that interaction between friction weight and rotational speed has a significant effect on the tensile strength of welded joint. The maximum tensile strength was achieved by setting the rotational speed at 1874 rpm and the friction weight at 56 kg or setting the rotational speed at 2613.5 rpm and the friction weight at 45 kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกลของรอยต่อโลหะ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

รศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านตลอดเวลาที่ผ่านไป

รศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คำแนะนำ ความเอาใจใส่และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการศึกษา ระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ผศ. ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านและทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

นายสมชาย ตันหวิรุฬห์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านและทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

นางสาวมาริสา เจิมประไพ
นางสาวรัชดา โกคา
นางสาวรดา พัฒนางกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ปัญหาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กระบวนการเชื่อม โลหะ.....	3
2.2 การเชื่อมแบบแรงเสียดทาน.....	4
2.3 รูปแบบต่างๆในการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน.....	4
2.4 การแบ่งวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทานตามหลักการส่งถ่ายพลังงาน.....	6
2.5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมต่อ โลหะแบบแรงเสียดทาน.....	9
2.6 ประโยชน์และข้อดีของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน.....	9
2.7 ข้อจำกัดของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน.....	9
2.8 กรรมวิธีของการเตรียมผิวรอยเชื่อมแบบแรงเสียดทาน.....	10
2.9 คุณสมบัติของโลหะทั่วไปที่มีผลต่อการเชื่อม.....	10
2.10 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (nonferrous metal).....	11
2.11 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	15
2.12 สมการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน.....	19
2.13 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments : DOE).....	22
2.14 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs).....	23
2.15 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลด้วยโปรแกรม Minitab.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.16 หลักการทำงานของเครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer).....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	38
3.3 การหาค่าความเร็วรอบของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน.....	41
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	42
3.5 การทดสอบความต้านทานแรงดึง.....	57
3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม.....	58
4.2 ผลการทดสอบค่าความต้านแรงดึง.....	59
4.3 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab.....	59
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปอภิปรายผล.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
หนังสืออ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	ผ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของกระบวนการเชื่อมต่อโลหะ	3
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)	13
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)	13
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่าง ๆ	19
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียม (Al 6061)	30
ตารางที่ 3.2 ความเร็วรอบของเครื่องเจาะที่สามารถตั้งค่าได้	31
ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับที่เลือกใช้ในการทดลอง	39
ตารางที่ 3.4 ตารางบันทึกผลการทดลอง	39
ตารางที่ 3.5 ความเร็วรอบที่วัดได้จากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน	41
ตารางที่ 3.6 ปัจจัยและระดับที่เลือกใช้ในการทดลอง	41
ตารางที่ 3.7 ตารางบันทึกผลการทดลอง	42
ตารางที่ 3.8 ค่าความปลอดภัย (Safety Factor)	48
ตารางที่ 3.9 ข้อมูลจากการวัดแรงกด	54
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง	59
ตารางที่ 4.2 แสดงการกำหนดตัวแปรลงในโปรแกรม Minitab	60
ตารางที่ 4.3 Factorial Fit : Tensile Versus Friction, Upset, Speed, Time	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุน.....	4
รูปที่ 2.2 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบเชิงเส้น.....	5
รูปที่ 2.3 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุนคน.....	5
รูปที่ 2.4 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบขั้วตรงหรือต่อเนื่อง.....	6
รูปที่ 2.5 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบอาศัยแรงเฉื่อย.....	7
รูปที่ 2.6 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบผสม.....	8
รูปที่ 2.7 แผนภาพสมมูล Al – MgSi.....	14
รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมอลูมิเนียมแมกนีเซียมชนิดค่อน.....	14
รูปที่ 2.9 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point).....	15
รูปที่ 2.10 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก.....	16
รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก.....	17
รูปที่ 2.12 ภาพจำลองของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน.....	19
รูปที่ 2.13 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial ในแต่ละปัจจัย.....	24
รูปที่ 2.14 วิธีการวัดทางกลของเครื่องวัดความเร็วรอบ.....	28
รูปที่ 2.15 วิธีการวัดทางไฟฟ้าของเครื่องวัดความเร็วรอบ.....	28
รูปที่ 2.16 วิธีการวัดทาง Stroboscopic ของเครื่องวัดความเร็วรอบ.....	29
รูปที่ 2.17 วิธีการวัดความเร็วรอบของสายพานของเครื่องวัดความเร็วรอบ.....	29
รูปที่ 3.1 เครื่องเจาะ.....	31
รูปที่ 3.2 เครื่องกลึง.....	32
รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง.....	32
รูปที่ 3.4 เวอร์เนียร์ลิปเปอร์.....	33
รูปที่ 3.5 เลื่อยมือ.....	33
รูปที่ 3.6 เครื่องตัด.....	34
รูปที่ 3.7 แผ่นเบเคอไลต์.....	34
รูปที่ 3.8 ตะไบแบบหยาบและแบบละเอียด.....	35
รูปที่ 3.9 ปากกาจับชิ้นงาน.....	35
รูปที่ 3.10 เลื่อยจิ๊กซอว์.....	36
รูปที่ 3.11 เครื่องเจียรไน.....	36
รูปที่ 3.12 ลูกค้อนน้ำหนัก.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาของโครงการ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ มีการแข่งขันทางด้านเทคโนโลยีสูง ทั้งทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องจักรที่ทันสมัย ทางด้านกรรมวิธีการผลิตชิ้นงาน หรือแม้กระทั่งการประกอบชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมกรรมการเชื่อมโลหะและอโลหะซึ่งถือว่ามีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และชิ้นส่วนต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนเครื่องบิน เป็นต้น

การพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่างๆ รวมทั้งการเชื่อมในปัจจุบัน นับว่ามีความสำคัญซึ่งวิธีการเชื่อมแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ทั้งเทคนิคการเชื่อมและคุณสมบัติของชิ้นงานที่ต้องคำนึงถึง ซึ่งการเลือกวัสดุชิ้นงานและกรรมวิธีการผลิตชิ้นงานแบบการเชื่อมโลหะและอโลหะที่เหมาะสมจะช่วยลดต้นทุนในการเชื่อมและเพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน

การเชื่อมโลหะด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมโลหะที่เป็นสถานะของแข็งซึ่งถูกพัฒนาและประดิษฐ์ขึ้นมาเมื่อต้นปี ค.ศ. 1990 ที่สถาบันการเชื่อม (The Welding Institute: TWI) ของประเทศอังกฤษ [1] ปัจจุบันการเชื่อมภายใต้แรงเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานเชื่อมมากที่สุดของวิธีการเชื่อมโลหะแบบใหม่ โดยการประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อให้สามารถเชื่อมโลหะได้ในวิธีการทำงานที่ง่ายมากยิ่งขึ้นและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเวลาและต้นทุนในการเชื่อมยังต่ำซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในวงการอุตสาหกรรมของต่างประเทศ แต่สำหรับประเทศไทยนั้นวิธีการเชื่อมแบบนี้ยังมีได้เป็นที่รู้จักกันมากนัก [2]

ดังนั้นการเชื่อมโลหะด้วยแรงเสียดทานที่เหมาะสมจะต้องคำนึงถึงตัวแปรในการเชื่อม (Welding Parameters) ได้แก่ แรงกดที่ใช้ในการเชื่อม เวลาในการเชื่อม และความเร็วรอบในการเชื่อมซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน โดยการควบคุมตัวแปรต่างๆ นับว่าเป็นสิ่งที่จำเป็นในการเชื่อมโลหะด้วยแรงเสียดทาน ความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจึงมีความสำคัญต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของการเชื่อมที่มีคุณภาพ ในปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกลของรอยต่อ โลหะ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาขั้นตอนพื้นฐานและเทคนิคของการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน
- 1.2.2 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ในการศึกษาวิจัยใช้อะลูมิเนียม A16061 แบบแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และแบบแผ่นขนาด 15x15 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร โดยการเชื่อมแบบ รอยต่อชน

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อมเฉพาะความต้านทานแรงดึงเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจขั้นตอนพื้นฐานและเทคนิคการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

1.4.2 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมว่ามีผลกับความแข็งแรงของรอยเชื่อมอย่างไร เพื่อประโยชน์ในการเลือกใช้ตัวแปรต่างๆ ในการเชื่อมได้อย่างเหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกลของรอยต่อโลหะ ซึ่งมีทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอยู่พอสมควร ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสาร ตำราเรียน และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ และสามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างถูกต้องและครอบคลุมเนื้อหาที่ทำการวิจัยโดยสามารถสรุปรวบรวมเป็นหัวข้อและรายละเอียดจากการค้นคว้าได้ดังต่อไปนี้

2.1 กระบวนการเชื่อมโลหะ

การเชื่อมโลหะ (Welding) คือ กรรมวิธีการต่อโลหะให้ติดกัน โดยการให้ความร้อนหรือแรงกด หรือทั้งความร้อนและแรงกดร่วมกันแก่บริเวณเชื่อมจนกระทั่ง โลหะนั้นติดเป็นชิ้นเดียวกัน

ความร้อนที่ให้แก่งานนั้นอาจได้จากพลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล พลังงานคลื่นเสียง หรือพลังงานแสงขึ้นอยู่กับวิธีการเชื่อมที่แตกต่างกันไป หากจะแบ่งประเภทของการเชื่อมต่อ โลหะนั้นอาจแบ่งได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของกระบวนการเชื่อมต่อโลหะ [3]

แหล่งพลังงานที่ใช้	กระบวนการเชื่อมด้วยความดัน	กระบวนการเชื่อมหลอม
การเคลื่อนไหว	การเชื่อมแบบแรงเสียดทาน การเชื่อมแบบแรงระเบิด	
แก๊ส	การเชื่อมอัดด้วยแก๊ส การเชื่อมอัดด้วยไฟ	การเชื่อมแก๊ส
กระแสไฟฟ้า	การเชื่อมจุด การเชื่อมตะเจ็บ การเชื่อมเฟลซ	การเชื่อมอิล็กโทรสแล็ก
กระแสไฟฟ้าผ่านเปลวอาร์ก	การเชื่อมสลัก	การเชื่อมไฟฟ้าด้วยรูปเชื่อม การเชื่อมมิก การเชื่อมทิก การเชื่อมซับเมอร์จ การเชื่อมพลาสมา
รังสี		การเชื่อมด้วยรังสีเลเซอร์ การเชื่อมด้วยรังสีอิล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเชื่อมแบบแรงเสียดทาน (Friction Welding)

การเชื่อมโลหะวิธีนี้จัดอยู่ในกลุ่มการเชื่อมด้วยความดัน (Welding with Pressure) โดยความร้อนนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อนที่รอยต่อของชิ้นงาน โดยปราศจากพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อนจากแหล่งอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องกับบริเวณรอยต่อของชิ้นงานเลย การเชื่อมแบบแรงเสียดทานนี้ทำได้โดยการยึดจับชิ้นงานชิ้นหนึ่งซึ่งอยู่กับที่และสัมผัสกับชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่หมุน ภายใต้อุปกรณ์ที่คงที่หรือค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิบริเวณรอยต่อของชิ้นงานทั้งสองสูงพอที่จะทำให้ชิ้นงานทั้งสองเชื่อมติดกันได้ จึงหยุดหมุนพร้อมทั้งเพิ่มแรงกดเพื่อให้ชิ้นงานทั้งสองเชื่อมติดกันได้ดียิ่งขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ไม่ถึงอุณหภูมิหลอมละลาย การเชื่อมจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิพลาสติก (Plastic Temperature Range)

การเชื่อมแบบแรงเสียดทานนี้สามารถใช้ได้กับโลหะผสมเหล็ก (Ferrous Alloys) และโลหะผสมที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferrous Alloys) หลายชนิดและยังสามารถใช้เชื่อมโลหะสองชิ้นที่มีคุณสมบัติทางกลและความร้อนที่ต่างกันมากได้ โลหะบางชนิดที่สามารถเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้อาจไม่สามารถเชื่อมด้วยวิธีอื่นเพราะจะเกิดการเรียงตัวของเฟสที่มีความเปราะ (Brittle Phase) ขึ้น ซึ่งทำให้รอยเชื่อมไม่แข็งแรง ในขณะที่การเชื่อมแบบแรงเสียดทานนั้นมีอุณหภูมิไม่ถึงจุดหลอมเหลวและใช้เวลาในการเชื่อมที่รวดเร็วจึงทำให้ชิ้นงานเหล่านั้นเชื่อมต่อกันได้

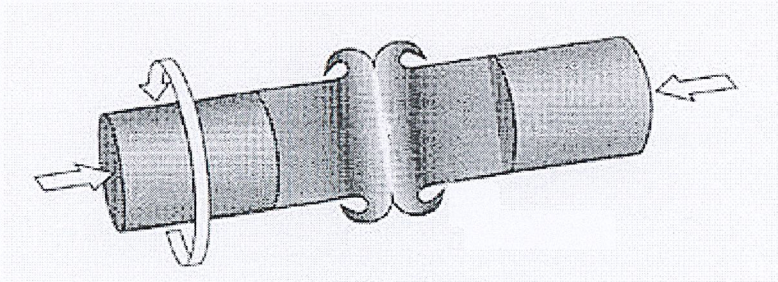
การสึกหรอของพื้นผิวรอยเชื่อมในช่วงแรกของการเชื่อมยังเป็นการช่วยกำจัดสิ่งสกปรกของผิวหน้าชิ้นงานจึงทำให้ผิวหน้าชิ้นงานมีความสะอาดและเรียบ

ผิวหน้าของชิ้นงานนั้นอย่างน้อยที่สุดต้องมีลักษณะเป็นวงกลมหนึ่งชิ้น ชิ้นงานที่หมุนควรมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน เพราะมันจะหมุนด้วยความเร็วสูง ชิ้นงานที่ไม่กลม เช่น มีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมก็สามารถเชื่อมได้แต่รอยเชื่อมนั้นอาจจะไม่สมมาตรกันได้ ซึ่งในงานเชื่อมที่ชิ้นงานมีลักษณะพิเศษอาจต้องประยุกต์เครื่องเชื่อมให้สามารถหยุดหมุนในตำแหน่งและเวลาที่ต้องการได้เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีการเรียงตัวในตำแหน่งที่ต้องการ

2.3 รูปแบบต่างๆในการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

2.3.1 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุน (Rotation Friction Welding)

การเคลื่อนที่เสียดสีกันของผิวหน้าชิ้นงานนั้นอาจทำได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับรูปทรงของผิวหน้าชิ้นงาน เช่น ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ผิวหน้าจะมีลักษณะกลม การเคลื่อนที่เสียดสีกันของชิ้นงานทำได้โดยการหมุน พร้อมทั้งออกแรงกดดังแสดงในรูปที่ 2.1

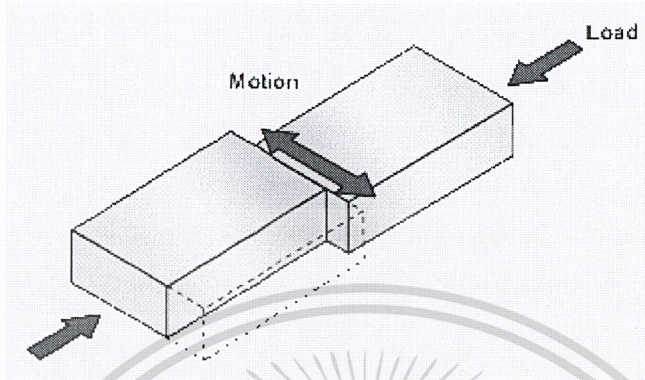


รูปที่ 2.1 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบเชิงเส้น (Linear Friction Welding)

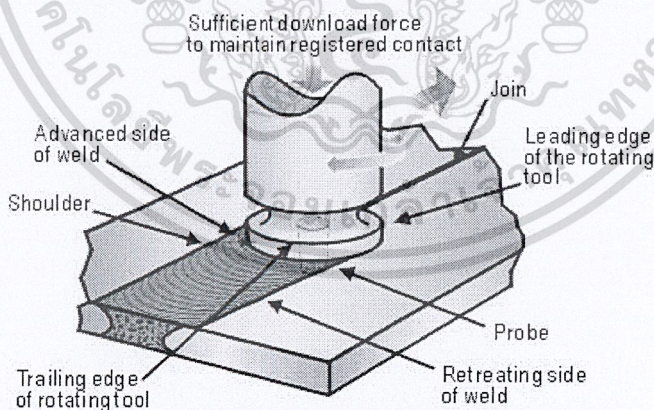
การเชื่อมแรงเสียดทานที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่เสียดสีกันของชิ้นงานทำได้โดยการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นพร้อมทั้งมีแรงกดจนเกิดความร้อนที่เพียงพอในการเชื่อมชิ้นงานทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.2 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบเชิงเส้น [5]

2.3.3 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุนคน (Stir Friction Welding)

การเชื่อมชิ้นงานที่เป็นแผ่น 2 แผ่นให้ติดกันอาจทำการเชื่อมแบบหมุนคน (Stir Friction Welding) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยการนำชิ้นงานทั้งสองแผ่นมาวางใกล้กันแล้วใช้โลหะซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกตัน หมุนแท่งโลหะให้ผิวหน้าของแท่งโลหะเคลื่อนที่เสียดสีกับบริเวณรอยต่อของโลหะแผ่นทั้งสอง จนเกิดความร้อนขึ้นเพียงพอที่จะทำให้โลหะแผ่นทั้งสองเพื่อให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้น

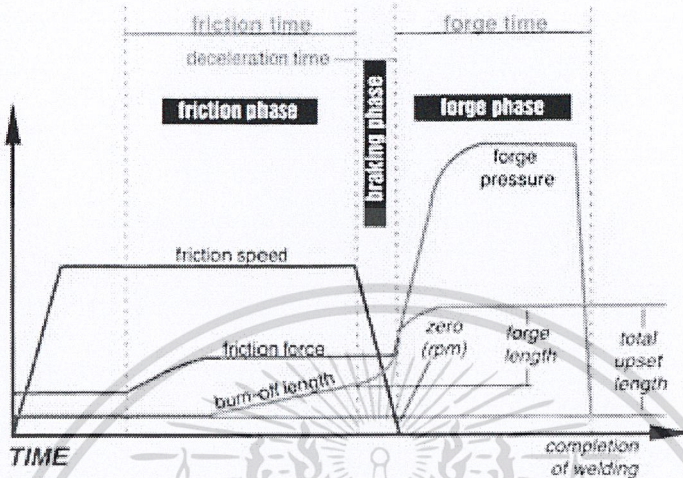


รูปที่ 2.3 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบหมุนคน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การแบ่งวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทานตามหลักการส่งถ่ายพลังงาน

2.4.1 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบขับตรงหรือต่อเนื่อง (Continuous or Direct Drive Friction Welding)



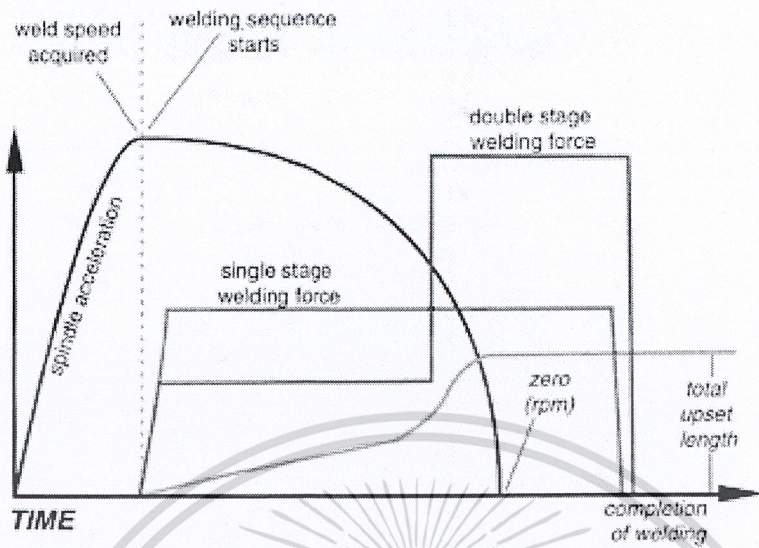
รูปที่ 2.4 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบขับตรงหรือต่อเนื่อง [7]

จากรูปที่ 2.4 อธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. เริ่มต้นจากการนำผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมมาสัมผัสกันแล้วเริ่มหมุนชิ้นงานพร้อมทั้งออกแรงกดคงที่
2. เมื่อความเร็วในการหมุน (Friction Speed) คงที่แล้วจึงเพิ่มแรงเสียดทาน (Friction Force) พร้อมทั้งเริ่มต้นจับเวลา (Friction Time)
3. ชิ้นงานทั้งสองจะหมุนเสียดสีกันภายใต้การจ่ายพลังงานในการหมุนอย่างต่อเนื่องจนครบเวลา (Friction Time) ที่กำหนดไว้ จึงหยุดหมุน (Braking) แล้วทำการเพิ่มแรงกดอยู่ (Forge Force) พร้อมทั้งเริ่มจับเวลาที่ใช้ในการกดอยู่ (Forge Time)
4. เมื่อครบเวลาที่กำหนดในการกดอยู่ (Forge Time) จึงนำชิ้นงานที่เชื่อมติดกันออกจากเครื่องเป็นการเสร็จขั้นตอนการเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบอาศัยแรงเฉื่อย (Inertia-drive Friction Welding)



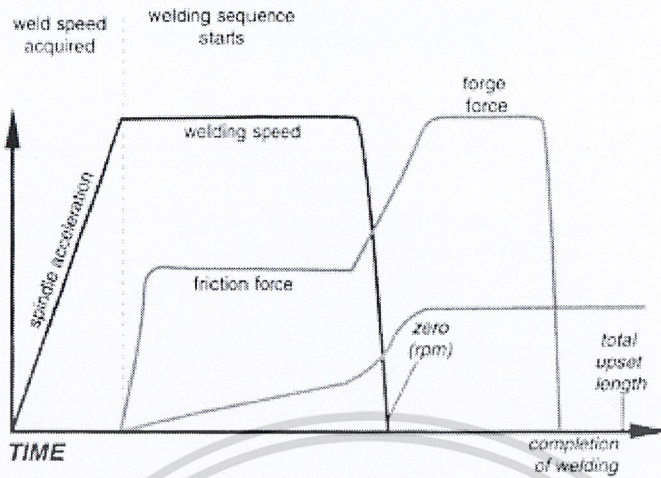
รูปที่ 2.5 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบอาศัยแรงเฉื่อย [8]

จากรูปที่ 2.5 อธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. เริ่มต้นจากการหมุนชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมโดยอาศัยล้อตุ้มกำลัง (Flywheels) เป็นตัวเร่งให้ความเร็วในการหมุนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ยังคงไม่ให้ผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสองสัมผัสกัน
2. เมื่อความเร็วในการหมุน (Friction Speed) สูงถึงความเร็วที่ต้องการ (Weld Speed Acquired) แล้วจึงหยุดจ่ายพลังงานในการหมุนแล้วปล่อยให้ล้อตุ้มกำลังซึ่งสะสมพลังงานไว้เป็นตัวหมุนชิ้นงาน โดยจะหมุนด้วยแรงเฉื่อย
3. ออกแรงกดให้ผิวหน้าของชิ้นงานหมุนเสียดสีกัน โดยการออกแรงกดนี้อาจกดแบบขั้นเดียว (Single Stage) หรือแบบสองขั้น (Double Stage) ก็ได้ โดยออกแรงกดแบบขั้นเดียว (Single Stage) จะใช้แรงกดเพียงค่าเดียวกดชิ้นงานทั้งสองจนหยุดหมุนไปเอง ส่วนการออกแรงกดแบบสองขั้นก็คล้ายกันแบบแรกแต่จะมีการออกแรงกดเพิ่มขึ้นในช่วงที่ชิ้นงานใกล้จะหยุดหมุน
4. ออกแรงค้ำไว้หลังจากที่ชิ้นงานหยุดหมุนสักระยะเวลาหนึ่งจึงนำชิ้นงานที่เชื่อมติดกันแล้วออกจากเครื่อง เป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนการเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบผสม (Hybrid Friction Welding)



รูปที่ 2.6 การเชื่อมแรงเสียดทานแบบผสม [9]

จากรูปที่ 2.6 อาจอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. เริ่มต้นจากการหมุนชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม โดยยังไม่ให้ผิวหน้าชิ้นงานทั้งสองชิ้นสัมผัสกัน
2. เมื่อความเร็วในการหมุนสูงถึงความเร็วที่ต้องการ (Weld Speed Acquired) แล้วจึงออกแรงกดให้ผิวหน้าของชิ้นงานสัมผัสและเสียดสีกันด้วยความเร็ว (Friction Speed) และแรงกดเสียดทาน (Friction Force) คงที่
3. ชิ้นงานทั้งสองจะหมุนเสียดสีกันภายใต้การจ่ายพลังงานในการหมุนอย่างต่อเนื่องจนครบเวลา (Friction Time) ที่กำหนดไว้จึงเพิ่มแรงกด (Forge Force or Upset Force) จนชิ้นงานหยุดหมุน
4. ออกแรงกดค้างไว้หลังจากที่ชิ้นงานหยุดหมุนสักครู่หนึ่งจึงนำชิ้นงานที่เชื่อมติดกันแล้วออกจากเครื่องเป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนการเชื่อม

จากขั้นตอนการเชื่อมทั้งสามวิธีจะเห็นว่า มีข้อแตกต่างกันที่ลักษณะการส่งถ่ายพลังงานในการหมุนชิ้นงาน โดยการเชื่อมแรงเสียดทานขับตรงอย่างต่อเนื่อง (Continuous or Direct Drive Friction Welding) นั้นชิ้นงานจะหมุนอย่างต่อเนื่องโดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานในการหมุนที่มีความเร็วคงที่และจะหยุดหมุนด้วยระบบหยุด (Breaking System) เมื่อสิ้นสุดเวลาที่กำหนดส่วนการเชื่อมแรงเสียดทานแบบอาศัยแรงเฉื่อย (Inertia-drive Friction Welding) นั้นจำเป็นต้องอาศัยการทำงานของล้อตุ้มกำลัง (Flywheels) เป็นตัวสะสมพลังงานในการหมุนช่วงแรก และเมื่อความเร็วมีค่าสูงถึงความเร็วที่ต้องการแล้ว จึงหยุดจ่ายพลังงานในการหมุนแล้วปล่อยให้ เป็นหน้าที่ของล้อตุ้มกำลัง ที่จะนำพลังงานที่สะสมไว้มาเป็นตัวหมุนชิ้นงานด้วยแรงเฉื่อยจนชิ้นงานหยุดหมุนไปเองโดยปราศจากการใช้ระบบหยุด และการเชื่อมแรงเสียดทานแบบผสม (Hybrid Friction Welding) นั้นเป็นการผสมกันระหว่างแบบต่อเนื่องและแบบอาศัยแรงเฉื่อย โดยจะคล้ายกับการเชื่อมแรงเสียดทานแบบขับตรงหรือต่อเนื่อง แต่จะไม่มีการใช้ระบบหยุดเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเวลาใช้ในการเชื่อมแรงเสียดทานแบบอาศัยแรงเฉื่อยจะสั้นกว่าการเชื่อมแรงเสียดทานแบบขับตรงหรือต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมต่อโลหะแบบแรงเสียดทาน

1. ความเร็วในการหมุนชิ้นงาน (Velocity)
2. ขนาดของแรงกดเสียดทาน (Frictional Force)
3. ขนาดของแรงกด (Forge Force)
4. เวลาที่ใช้ในการหมุน (Friction Time)
5. ขนาดพื้นที่ผิวหน้าของชิ้นงาน (Surface Area)
6. ชนิดของวัสดุชิ้นงานเชื่อม
7. อุณหภูมิภายนอกขณะทำการเชื่อม

2.6 ประโยชน์และข้อดีของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ประโยชน์ของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ในกระบวนการเชื่อมภายใต้แรงเสียดทาน ขณะเชื่อมไม่จำเป็นต้องใช้โลหะเติมลงไป ในแนวเชื่อมหรือใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม และในขณะเดียวกันก็ไม่จำเป็นต้องใช้ฟลักหรือลวดเชื่อมในการเชื่อมภายใต้แรงเสียดทาน ยังรวมไปถึงพลังงานไฟฟ้าและพลังงานทั้งหมดจะเป็นสัดส่วนกับความต้องการงานเชื่อม หลังจากผ่านกระบวนการเชื่อมแล้วแนวเชื่อมยังเป็นขบวนการเชื่อมที่สะอาด มีอัตราการกระเด็นของน้ำโลหะน้อย ขณะทำการเชื่อมไม่มีการอาร์ค ไม่มีควัน ไม่มีคราบของสะเก็ดเขต ในด้านทางโลหะวิทยา บริเวณเขตกระทบความร้อนที่เกิดขึ้นจะแคบลงขณะเม็ดเกรนของแนวเชื่อมจะเล็กกว่าของโลหะชิ้นงาน ในด้านความสามารถในการเชื่อมสามารถใช้ได้กับโลหะเกือบทุกประเภทและใช้เชื่อมโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างกันได้

ข้อดีของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานในกระบวนการเชื่อมภายใต้แรงเสียดทาน ขั้นตอนของการเชื่อมโลหะแบบการเชื่อมภายใต้แรงเสียดทานที่ความถี่ของกันอย่างไม่สลับซับซ้อนและไม่สิ้นเปลืองหรือไม่ต้องเติมลวดเชื่อมรวมถึงการกำหนดขอบเขตในการเชื่อมไม่มีความจำเป็น ก่อนการเชื่อมนั้นไม่จำเป็นต้องขจัดออกไซด์ออกไป รูปแบบขั้นตอนในการเชื่อมสามารถทำอัตโนมัติและเคลื่อนย้ายไปได้ในหลายตำแหน่ง คุณสมบัติที่ได้จากการเชื่อมภายใต้แรงเสียดทานเมื่อเชื่อมแล้วที่มีความแข็งแรงสูง ได้ประสบความสำเร็จจากการใช้อลูมิเนียมและแมกนีเซียมอัลลอยด์และการเชื่อมภายใต้แรงเสียดทานสามารถใช้กับอัลลอยด์ที่ซึ่งไม่สามารถใช้กับการเชื่อมที่หลอมละลาย ที่เป็นผลมาจากความอ่อนของรอยแตกเร็ว (หรือการเปิดและปิดอย่างรวดเร็ว)

ในการศึกษาค้นคว้านี้ ประสิทธิภาพของรูปเรขาคณิตที่เป็นก้อน โลหะบนการเชื่อมและเครื่องกลที่ทำกับชิ้นงานโลหะที่เชื่อมอลูมิเนียม นั้น ได้ใช้การเชื่อมภายใต้แรงเสียดทานที่ประดิษฐ์ขึ้นมา การเคลื่อนไหวยามีการหมุนรอบวงกลมและแรงดันของแรงเสียดทานระหว่างวัสดุมีความต่อเนื่อง

2.7 ข้อจำกัดของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

คุณลักษณะข้อจำกัดของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ในกระบวนการเชื่อมภายใต้แรงเสียดทานชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อมต้องเป็นรูปทรงกลมหรือเป็นสี่เหลี่ยมก็ได้ ณ จุดสัมผัสขนาดและรูปร่างจะถูกควบคุมโดยการหมุน โดยที่ชิ้นงานจะต้องสามารถทนแรงบิด และแรงดันในแนวแกนระหว่างเกิดความร้อนและแรงอัดได้อย่างดี รูปแบบกระบวนการเชื่อมจะมีรูปแบบการควบคุมอยู่ในแนวราบหรือแนวตั้ง ประกอบด้วยตัวจับชิ้นงานจะต้องแข็งแรงและทนต่อการหยุดกระทันหัน และแรงบิดที่เกิดขึ้น เช่น แคมป์หรือฟิกเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 กรรมวิธีของการเตรียมผิวรอยเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ผิวชิ้นงานของการเชื่อมไม่จำเป็นต้องตกแต่งผิวก่อนเชื่อม เช่น ผิวที่เกิดจากการตัดด้วย หินเจียร เลื่อยตัด แก๊สตัด เพราะว่าความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน จะทำให้ส่วนที่ไม่เรียบเกิดการหลอมรวมตัวกับเนื้อโลหะที่เชื่อม โดยจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพของรอยเชื่อมลดลงสำหรับโลหะที่เคลือบด้วยโครเมียม โลหะที่มีออกไซด์สูง โลหะที่ชุบแข็งด้วยไนโตรคาร์ไบด์จะไม่สามารถขจัดออกในขณะที่เชื่อมซึ่งเป็นสาเหตุทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าปกติและถ้าหากมีสารพวกไนโตรเคลือบอยู่หน้าจะไม่สามารถเชื่อมได้เลย

สภาวะที่มีสิ่งเจือปนของการเชื่อมแรงเสียดทาน การเตรียมรอยต่ออย่างน้อยที่สุดต้องการการทำความสะอาด โดยวัสดุส่วนใหญ่พื้นผิวจะต้องแห้งในสภาวะการเชื่อมมาจะสามารถเชื่อมได้โดยตรงเลย และวัสดุที่นำมาเชื่อมด้วยความเสียดทานจะต้องการเตรียมผิวให้พอดี

2.9 คุณสมบัติของโลหะทั่วไปที่มีผลต่อการเชื่อม [10]

2.9.1 จุดหลอมละลาย (Melting Point)

เป็นสิ่งสำคัญต่อการเชื่อมมาก หมายถึงอุณหภูมิซึ่งทำให้โลหะหลอมละลายกลายเป็นของเหลว มีความสำคัญยิ่ง โดยเฉพาะในการเชื่อมโลหะที่ไม่เหมือนกันเข้าด้วยกัน

2.9.2 ความเป็นตัวนำความร้อน (Thermal Conductivity)

คือความสามารถในการส่งกระจายความร้อนไปตามมวลของวัตถุนั้น มีความสำคัญต่อการเชื่อมเพราะ โลหะชนิดหนึ่งอาจมีคุณสมบัติในการนำความร้อนออกจากแนวเชื่อมไปได้เร็วกว่าโลหะอีกชนิดหนึ่ง

2.9.3 ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)

คือปริมาณความร้อนที่ต้องการเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของโลหะ และจะบอกให้ทราบถึงปริมาณความร้อนที่ต้องการที่จะทำให้โลหะนั้นมีความร้อนจนถึงจุดหลอมละลาย

2.9.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัว (Co-efficient of Expansion)

คือความยาวที่เพิ่มขึ้นที่วัดได้จากการขยายตัวตามเส้นเมื่อโลหะได้รับความร้อนสัมประสิทธิ์การขยายตัวมีค่าเปลี่ยนแปลงได้กว้างมาก อลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีการขยายตัวสูงมาก ดังนั้นในการเชื่อมจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเครื่องมือสำหรับใช้ในการควบคุมการบิดงอหรือการหนีจากแนวเดิม

2.9.5 ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)

คือความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ โดยดึงให้ชิ้นทดสอบนั้นขาดออกจากกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบนั้นมีความแข็งแรงเท่ากับแรงที่ไปกระทำ

2.9.6 เปอร์เซนต์การยืดตัว (Percent Elongation)

คือความยาวที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานหลังจากการทดสอบแรงดึงจนขาดออกจากกัน โดยเทียบกับความยาวก่อนดึง และมีค่าเป็นเปอร์เซนต์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.7 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะแต่ละชนิด ซึ่งการทดสอบหาความแข็งมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น บริเนล (Brinell), ร็อกเวล (Rockwell), วิคเกอร์ (Vicker), นู๊ป (Knoop) และอื่นๆ ซึ่งแต่ละวิธีก็มีความเกี่ยวข้องกันและสามารถเปรียบเทียบกันได้

2.10 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (nonferrous metal) [11]

โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous Metal) หมายถึงโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ เช่น ทองแดง อลูมิเนียม แมกนีเซียม สังกะสี ดีบุก และอื่นๆ ในงานทางวิศวกรรมและอุตสาหกรรมจะใช้โลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้งหมดในปริมาณที่ต่ำกว่าเหล็ก ปริมาณที่ผลิตทั้งนี้จะอยู่ในเกณฑ์ประมาณหนึ่งในสิบห้าส่วนของเหล็กหล่อและเหล็กกล้า ทั้งนี้ไม่รวมโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่จัดอยู่ในประเภทโลหะมีค่าสูง (Precious Metals) เช่น ทองคำ และทองคำขาว โลหะนอกกลุ่มเหล็กที่ใช้ในงานวิศวกรรมส่วนใหญ่จะใช้เหล็กทดแทนเหล็ก

2.10.1 อลูมิเนียม (Aluminium) [12]

อลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการเป็นสนิม มีความแข็งแรงอยู่ใน เกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งาน ได้กว้างขวาง แทนเหล็กและทองแดง ได้ในหลายๆ ด้านของงานวิศวกรรมและอุตสาหกรรม

นอกจากนี้โลหะอลูมิเนียมยังสามารถผสมกับโลหะอื่นๆ ได้หลายชนิด เช่น โลหะผสม อลูมิเนียม-ทองแดง อลูมิเนียม-ซิลิกอน, อลูมิเนียม-สังกะสีหรืออาจจะมีโลหะผสมอลูมิเนียมกับธาตุหลายๆชนิดร่วมกัน เช่น อลูมิเนียม-ทองแดง-ซิลิกอนและแมกนีเซียม ซึ่งโลหะผสมแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน สามารถเลือกใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โลหะผสมอลูมิเนียมจำแนกออกได้ดังนี้ [13]

2.10.1.1 อลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น (Wrought Aluminium Alloy)

เป็นอลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปมาด้วยวิธีการขึ้นรูป เช่น การรีดเป็นแผ่น (อลูมิเนียมฟอยล์ แผ่นอลูมิเนียม) การอัดขึ้นรูป (Extrusion เป็นกรอบประตู หน้าต่างอลูมิเนียม) เป็นต้น เนื่องจากอลูมิเนียมกลุ่มนี้ต้องนำไปผ่านการขึ้นรูปทางกล จึงมีข้อจำกัดคือธาตุผสมต่างๆ จะมีสูงมากก็ไม่ได้ เนื่องจากจะทำให้มีความแข็งเกินไปที่จะขึ้นรูปทางกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1xxx	Commercial-Purity Al	Non-Heat-Treatable	เช่น สายไฟ อลูมิเนียมฟอยล์
2xxx	Al-Cu(-Mg)	Heat-Treatable	เช่น ชิ้นส่วนอากาศยาน
3xxx	Al-Mn(-Mg)	Non-Heat-Treatable	เช่น ตัวกระป๋องน้ำอัดลม
4xxx	Al-Si	Non-Heat-Treatable	
5xxx	Al-Mg	Non-Heat-Treatable	เช่น ตัวฝากระป๋องน้ำอัดลม
6xxx	Al-Mg-Si	Heat-Treatable	เช่น กรอบประตู หน้าต่าง
7xxx	Al-Zn-Mg(-Cu)	Heat-Treatable	เช่น ชิ้นส่วนอากาศยาน
8xxx	Other Alloys		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1.2 อลูมิเนียมหล่อผสม (Cast Aluminum Alloy)

เป็นอลูมิเนียมที่มีความเหมาะสมในการหลอมและหล่อเป็นรูปชิ้นงาน ดังนั้นจึงมีความสามารถที่จะผสมธาตุต่างๆในปริมาณมาก ๆ ได้ เช่นสามารถมีซิลิคอนผสมสูงมากถึง 18 wt เปอร์เซนต์ เป็นต้น หากสูงขนาดนี้ไม่สามารถขึ้นรูปทางกลได้ เกรดพวกนี้นิยมนำมาใช้ในการทำเป็นลูกสูบ (Piston)

กระบวนการหล่อเป็นกระบวนการให้ความอิสระในการออกแบบได้มาก เช่น รูปร่างที่ซับซ้อน มีความหนาบางต่าง ๆ กัน สามารถผลิตจำนวนมาก ๆ ได้อย่างรวดเร็วและประหยัด เป็นต้น ล้ออัลลอยของทั้งรถยนต์และจักรยานยนต์ก็ผลิตจาก Cast Aluminum Alloy

1xx.x 99.00 wt% min. Aluminum

2xx.x Al-Cu

3xx.x Al-Si-(Cu/Mg) นิยมมากที่สุด ผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ ล้ออัลลอย

4xx.x Al-Si

5xx.x Al-Mg

6xx.x Unused Series

7xx.x Al-Zn

8xx.x Al-Sn

9xx.x Others

2.10.1.3 อลูมิเนียมรีด (Wrought Aluminum Alloy)

เป็นอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการรีดมาสามารถเชื่อมได้ง่ายด้วยกระบวนการอาร์คที่ใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมแนวเชื่อมไว้ โดยเฉพาะอลูมิเนียมผสมกลุ่ม Non - Heat Treatable คือกลุ่ม 1xxx - 3 xxx - 5xxx ส่วนอลูมิเนียมในกลุ่ม Heat Treatable เช่นกลุ่ม 6xxx- 4xxx และกลุ่ม 2xxx ก็สามารถเชื่อมได้แต่ต้องอาศัยเทคนิคและความชำนาญเป็นพิเศษและอาจจะทำให้ความเหนียวของอลูมิเนียมลดลงได้ ส่วนกลุ่ม 7xxx คือกลุ่มที่มีความแข็งแรงสูงมากเชื่อมได้ลำบากมากจึงเหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมแบบอาร์ค

2.10.2 คุณสมบัติของอลูมิเนียมผสม

อลูมิเนียมผสมเกือบทุกเกรดสามารถนำมาเชื่อมได้ ทั้งอะลูมิเนียมรีด (Wrought Products) อลูมิเนียมหล่อ (Casting Products) อลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อแบบหล่อทรายจะเชื่อได้ยากกว่าเป็นอลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อมาจากแบบหล่อถาวรหรือมาจากการหล่อในสภาวะสุญญากาศ (Vacuum Casting) เพราะอลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อแบบหล่อทรายจะเกิดรูพรุนขึ้นจำนวนมากในรอยเชื่อม เนื่องจากชิ้นงานมีจำนวนมากอยู่แล้ว

2.10.3 โลหะผสมอลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน 6061 [14]

อลูมิเนียม 6061 นิยมใช้งานที่ต้องการทั้งความแข็งแรงสูงร่วมกับความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ตีเยี่ยม เช่น งานเป่าพลาสติก, งานโครงสร้างอาคาร (หมุดย้ำ), ราวสะพาน และในยานพาหนะต่าง ๆ เช่น เรือ, รถบรรทุก เป็นต้น

- แม่พิมพ์เป่าพลาสติก
- งานท่อขนส่ง, งานทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เฟอร์นิเจอร์, ท่อคูดของเครื่องคูดฝุ่น
- รางเลื่อนของรถขนของ
- อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

โลหะผสมอลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน 6061 มีคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ดังแสดงในตาราง

ที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

คุณสมบัติ	ค่าเฉลี่ย
ความหนาแน่น / Density (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	2.7
อุณหภูมิหลอมเหลว / Melting Range (องศาเซลเซียส)	580-650
การนำความร้อนที่ 20°-100°C Thermal Conductivity (วัตต์/เมตร · เคลวิน)	150-170
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่าง 20°-100°C Coefficient of Thermal Expansion between 20°-100°C (ไมโครเมตร/เมตร · เคลวิน)	23.6
การนำไฟฟ้าที่ 20°C Electrical Conductivity (เมตร/โอห์ม · ตารางมิลลิเมตร)	24-26
โมดูลัสของการยืดหยุ่น ที่ 20°C Modulus of Elasticity (103 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)	69

โลหะผสมอลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน 6061 มีคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ดังแสดงในตาราง

ที่ 2.3

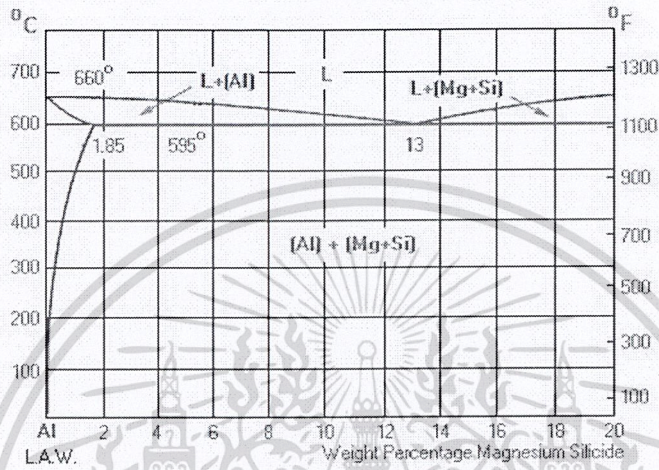
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)

Thickness (มิลลิเมตร)	Y.S. (นิวตัน/ตาราง มิลลิเมตร)	U.T.S. (นิวตัน/ตาราง มิลลิเมตร)	U.S.S. (นิวตัน/ตาราง มิลลิเมตร)	El. (เปอร์เซ็นต์)	Hard. (HB)
6-13	≥ 240	≥ 290	≥ 190	≥ 10	≥ 90
13-25	≥ 240	≥ 290	≥ 190	≥ 9	≥ 90
25-50	≥ 240	≥ 290	≥ 190	≥ 8	≥ 90
50-100	≥ 240	≥ 290	≥ 190	≥ 6	≥ 90
มาตรฐาน	270	305	205	13	95

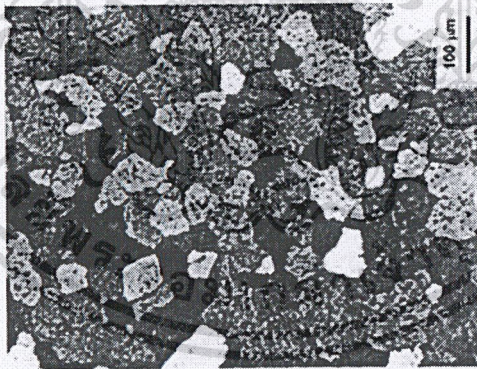
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.4 โครงสร้างทางจุลภาคโลหะผสมอลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน 6061 [15]

แผนภาพสมดุล Al – MgSi ซึ่งเป็นธาตุในจำนวนธาตุทั่วไปที่สามารถรวมตัวในรูปแบบสารประกอบเชิงโลหะ เป็นสภาพกึ่งเสถียร ที่ Al – MgSi พบว่าวัสดุอลูมิเนียมผสมให้สารประกอบเชิงโลหะ MgSi ละลายสูงสุดที่ 1.85 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 595 องศาเซลเซียส และทำให้เกิดปฏิกิริยาตกตะกอนที่ส่วนผสม MgSi 13 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงมาจาก 595 องศาเซลเซียส จะปรากฏการละลายของ MgSi 13 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงมาจาก 595 องศาเซลเซียส จะปรากฏการละลายของ Mg Si ในอลูมิเนียมลดลงจนถึงเหลือ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.7 แผนภาพสมดุล Al – MgSi



รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาค โลหะผสมอลูมิเนียมแมกนีเซียมซิลิกอน [16]

2.10.5 สมบัติเฉพาะของอลูมิเนียมที่มีผลต่อการเชื่อม

สมบัติเฉพาะของอลูมิเนียมที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อม ได้แก่ อลูมิเนียมรวมตัวกับออกซิเจนเกิดฟิล์มออกไซด์ได้ง่าย อลูมิเนียมเหลวสามารถละลายไฮโดรเจนได้ดี นำความร้อนได้ดี (134 วัตต์/เมตร·เคลวิน) มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูง (23.6 เมตร/เมตร·เคลวิน) อลูมิเนียมนำไฟฟ้าได้ดี มีความไม่เป็นสารแม่เหล็กไม่เปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อน

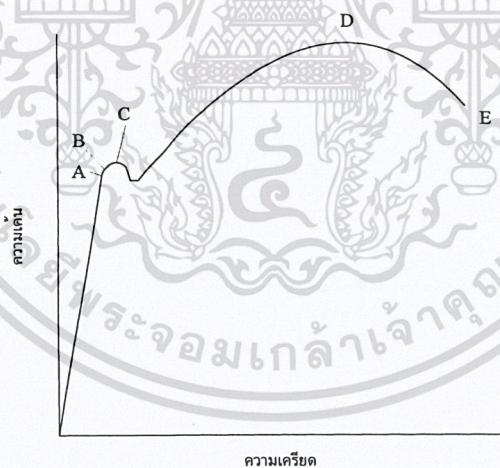
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.6 การเตรียมและ การทำความสะอาดรอยต่อ

การเตรียมรอยต่อสำหรับการเชื่อมอลูมิเนียมสามารถเลือกได้ทุกชนิดได้แก่ การต่อชนการต่อเย็บ การต่อขอบ และการต่อตัวที ชิ้นงานที่มีความหนาาก็สามารถทำรอยบากให้เป็นรอยรูปตัว V U Y X ก็ได้ การออกแบบรอยต่อและ รอยบากที่เหมาะสมจะทำให้สามารถปฏิบัติงานเชื่อมง่ายขึ้น สามารถลดการแตกร้าวได้ ลดการบิดงอของชิ้นงานเชื่อมได้ การเว้นช่องว่าง (Spacing) อย่างเหมาะสมก็สามารถลดปัญหาการบิดงอและการแตกร้าวได้เช่นกัน การเว้นช่องว่างสามารถพิจารณาจากความหนา ชนิดรอยต่อ และการบากชิ้นงานการทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานสำหรับการเชื่อมอลูมิเนียม สามารถทำได้โดยใช้สารเคมีและวิธีทางกล การทำความสะอาดด้วยสารเคมี ได้แก่ การล้างด้วยผงซักฟอก เพื่อกำจัดน้ำมัน จาระบี และสารพวกอัลคาไลด์ที่เคลือบผิวชิ้นงานไว้ จากนั้นเช็ดให้แห้งหรือเช็ดด้วยแอลกอฮอล์หรือ อะซิโตนอีกครั้ง เพื่อให้ชิ้นงานแห้งเร็วขึ้น การทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยวิธีทางกล ได้แก่ การใช้แปรงลวดสแตนเลส ตะไบ และการเจียรในผิวชิ้นงานเพื่อกำจัดออกไซด์ที่ผิวชิ้นงานหลังจากการขัดถูชิ้นงานด้วยวิธีทางกลควรทำพิเศษผ่งที่เกิดจากการขัด ออกให้หมดก่อนทำการเชื่อม

2.11 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) [17]

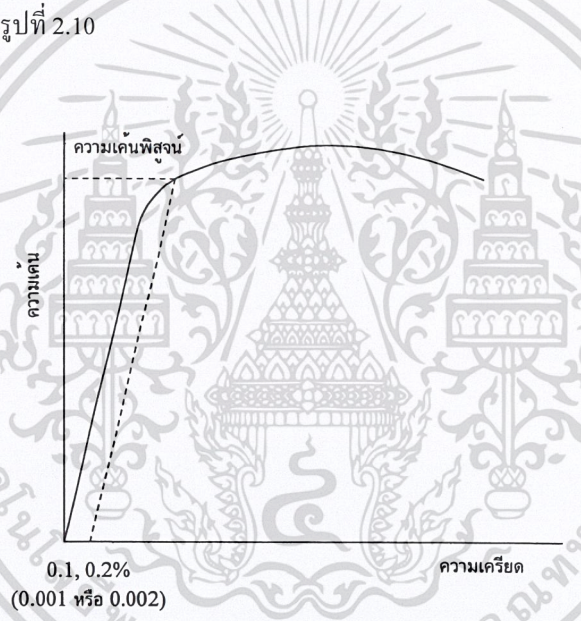
การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของ โลหะหรือ โลหะผสมด้วยการ ใช้วิธีดึง จนถึงขาดในช่วงเวลาสั้นๆด้วยอัตราคงที่ ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะแตกต่างกันไป สำหรับโลหะอาจทำเป็นแผ่นหรือ ทำเป็นแท่ง ข้อมูลแรงเราสามารถหาได้จากกราฟของการทดสอบแรงดึง ซึ่งเป็นกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดทาง วิศวกรรม



รูปที่ 2.9 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

จากการศึกษาเส้น โค้งความเค้น-ความเครียดพบว่าเมื่อเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟที่เป็น เส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่าพิคัด สัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิคัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับ ไปมีขนาดเท่าเดิม เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนถึงเกินพิคัดสัดส่วน เส้นกราฟ เมียวาร์กรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูปและในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย วัสดุหลายชนิดเช่น อลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้นจะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.10 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2 เปอร์เซ็นต์ Offset ดังแสดงในรูปที่ 2.10

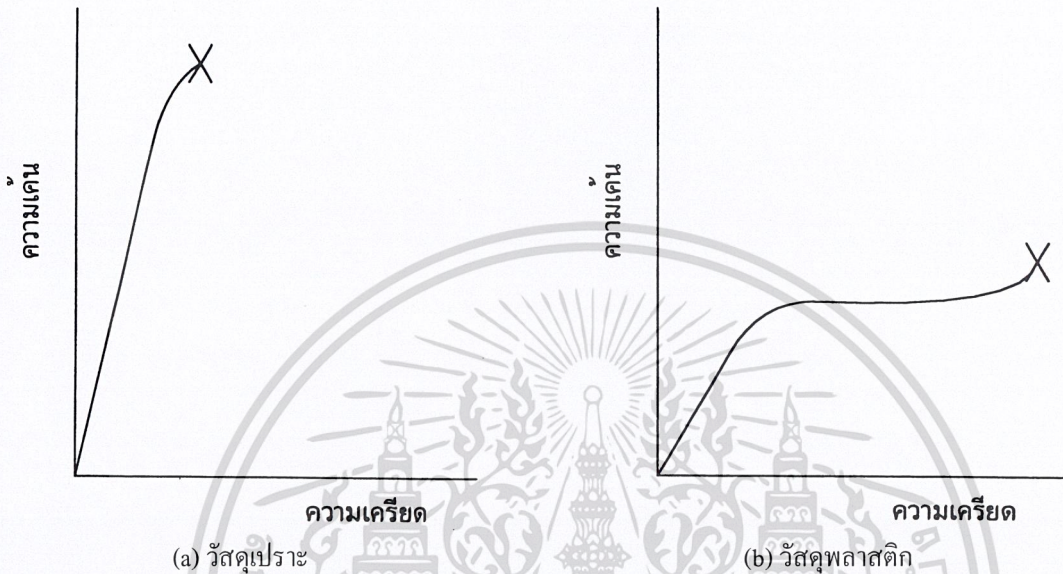


รูปที่ 2.10 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกได้มากๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่าค่าความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือกำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นั่นเอง

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุดเพราะเมื่อถึงจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่ยังคงคำนวณค่าเฉลี่ยความเค้นอยู่ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเด็ดขาดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้วมันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (a) ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (b)



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุด และความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่างๆ ได้อีกดังนี้ คือ

1. ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) โดยที่

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (\%EI)} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2.1)$$

ซึ่ง L_f = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

L_0 = ความยาวของเกจเริ่มต้น หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (\%R.A.)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\% \quad (2.2)$$

ซึ่ง A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร (mm^2)
 A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร (mm^2)

ในทางปฏิบัติจะใช้ค่า % EI มากกว่าเพราะสะดวกในการวัดความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%EI สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ เปรราะก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

2. Modulus of Elasticity or Stiffness ภายใต้อิทธิพลของแรงดึงที่วัสดุมีพฤติกรรมเป็นออสติค อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{FL}{A\Delta L} \quad (2.3)$$

ซึ่ง E = Modulus of elasticity หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)
 σ = ความเค้น หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)
e = ความเครียด
F = แรง หน่วยเป็นนิวตัน (N)
A = พื้นที่หน้าตัดรับแรง หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร (mm^2)
L = ความยาวปกติของวัสดุ หน่วยเป็นมิลลิเมตร
 ΔL = ส่วนที่ยืดออกของวัสดุ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgm/mm^2 หรือ จิกกะปาสคาล (สังเกตว่าเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยของความเค้น) ถ้าแรงที่มากระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Fh}{Aa} \quad (2.4)$$

ซึ่ง E = Modulus of Rigidity หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)
 τ = ความเค้นเฉือน หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)
 γ = ความเครียดเฉือน หน่วยเป็นเรเดียน (rad)
F = แรง หน่วยเป็นนิวตัน (N)
h = ระยะห่างระหว่างระนาบ
a = ระยะที่เคลื่อนที่ไป

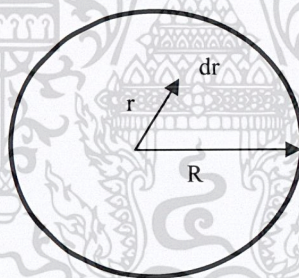
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่นได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่นได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 จะแสดงตัวอย่างค่า E และ G ของวัสดุต่างๆ ไว้

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	Modulus of Elasticity 10^6	Shear Modulus 10^6
	psi	psi
Aluminium Alloy	10.5	4.0
Copper	16.0	6.0
Steel (Plain Carbon and Low Alloys)	29.0	11.0
Stainless Steel (18.8)	28.0	9.5
Titanium	17.0	6.5
Tungsten	58.0	22.8

2.12 สมการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน



รูปที่ 2.12 ภาพจำลองของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน

- พิจารณางานที่เกิดขึ้น

จากสมการ

$$W=Fs$$

(2.5)

ซึ่ง

W = งาน หน่วยเป็น นิวตันเมตร ($N \cdot m$)

F = แรงในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ หน่วยเป็น นิวตัน (N)

s = ระยะทางในการเคลื่อนที่ หน่วยเป็นเมตร (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก F ในกรณีนี้มีค่าเท่ากับแรงเสียดทาน (f) ดังนั้น

$$W = fs \quad (2.6)$$

ซึ่ง W = งาน หน่วยเป็น นิวตันเมตร ($N \cdot m$)
 f = แรงเสียดทาน หน่วยเป็นนิวตัน (N)
 s = ระยะทางในการเคลื่อนที่ หน่วยเป็นเมตร (m)

จากสมการ

$$f = \mu N \quad (2.7)$$

ซึ่ง f = แรงเสียดทาน หน่วยเป็นนิวตัน (N)
 μ = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
 N = แรงกดตั้งฉากกับทิศทางการหมุน หน่วยเป็นนิวตัน (N)

แทนค่าสมการ 2.7 ลงใน สมการ 2.6 จะได้

$$W = \mu N s \quad (2.8)$$

- พิจารณางานที่เกิดขึ้นบนพื้นที่วงแหวน sdr

$$W_{dr} = \mu N_{dr} s \quad (2.9)$$

ซึ่ง W_{dr} = งาน หน่วยเป็นนิวตันเมตร ($N \cdot m$)
 μ = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
 N_{dr} = แรงกดตั้งฉากบนพื้นที่วงแหวน sdr (นิวตัน)
 s = ระยะทางในการเคลื่อนที่ 1 รอบของ หน่วยเป็นเมตร (m)

เนื่องจากพื้นที่ทั้งหมด πR^2 มีแรงกด N

$$\text{พื้นที่วงแหวน } sdr \text{ มีแรงกด } N_{dr} = N \frac{sdr}{\pi R^2} \quad (2.10)$$

ซึ่ง s = ระยะทางในการเคลื่อนที่ 1 รอบของ dr หน่วยเป็นเมตร (m)

$$\text{โดย } s = \omega r T \quad (2.11)$$

ซึ่ง T = เวลาในการหมุน 1 รอบ หน่วยเป็นวินาที (s)
 ω = ความเร็วเชิงมุม หน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)
 r = รัศมีจากจุดศูนย์กลางถึง dr หน่วยเป็นเมตร (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะในวงจำกัด ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ 2.11 และสมการ 2.10 ลงในสมการ 2.9 จะได้ว่า

$$W_{dr} = \mu \left(N \frac{\omega r T dr}{\pi R^2} \right) (\omega r T)$$

∴ งานที่เกิดขึ้นในการหมุน 1 รอบ คือ

$$W = \int_{r=0}^R \mu \left(N \frac{\omega r T dr}{\pi R^2} \right) (\omega r T)$$

$$W = \frac{\mu N \omega^2 T^2}{\pi R^2} \int_{r=0}^R r^2 dr$$

$$W = \frac{\mu N \omega^2 T^2}{\pi R^2} \left[\frac{r^3}{3} \right]_0^R$$

$$W = \frac{\mu N \omega^2 T^2}{\pi R^2} \times \frac{R^3}{3}$$

$$W = \frac{\mu N \omega^2 T^2 R}{3\pi}$$

∴ งานที่เกิดขึ้นในการหมุน 1 รอบ คือ

$$W = \frac{\mu N \omega^2 T^2 R}{3\pi}$$

เนื่องจากแรงกดตั้งฉากกับทิศทางของการหมุน (N) มีค่าเท่ากับแรงกด (F) ดังนั้น

$$W = \frac{\mu F \omega^2 T^2 R}{3\pi}$$

เนื่องจาก $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ดังนั้น

$$W = \frac{\mu F \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 T^2 R}{3\pi}$$

$$W = \frac{4}{3} \mu F \pi R$$

กำหนดให้ n คือ จำนวนรอบในการหมุน ดังนั้นงานที่เกิดขึ้นทั้งหมดคือ

$$W = \frac{4}{3} n \mu F \pi R \quad (2.8)$$

- ซึ่ง
- W = งานที่เกิดขึ้นในรอบการหมุน n รอบ หน่วยเป็นจูล (J)
 - n = จำนวนรอบในการหมุน หน่วยเป็นรอบ
 - μ = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
 - F = แรงกดในทิศตั้งฉากกับการหมุน หน่วยเป็นนิวตัน (N)
 - R = รัศมีทั้งหมดของวงกลม หน่วยเป็นเมตร (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments : DOE) [18]

การออกแบบการทดลอง Design of Experiments เป็นเครื่องมือคุณภาพที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมมานานพอสมควรแล้ว มีจุดประสงค์ที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าปัจจัย (Factors) ของกระบวนการใด กระบวนการหนึ่งแล้วดูผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนอง (Response) ของกระบวนการนั้น

ในทางปฏิบัติทางอุตสาหกรรม การทดลองที่ได้รับการออกแบบมาจะมีความทำงานอย่างเป็นระบบในการสืบค้นในตัวแปรในกระบวนการ (Process Variable) หรือตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (Product Variable) หลังจากทำการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการ หรือองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงจะสามารถทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต ความน่าเชื่อถือ คุณภาพ และ ประสิทธิภาพ

เนื่องด้วยทรัพยากรมีจำนวนจำกัด ดังนั้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลองที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญและมีคุณภาพมากกว่าทางทดลองที่เกิดขึ้นจากงานที่ไม่ได้รับการวางแผนมาก่อนและ โดยเฉพาะการทดลองตามแผนที่วางไว้จะสามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้ดีกว่าด้วย

2.13.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การทดลองที่ได้รับการออกแบบมาโดยมากจะมี 4 ขั้นตอนคือ การวางแผน (Planning) การคัดเลือก (Screening) หรือ Process Characterization) การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) และการทวนสอบ (Verification)

2.13.1.1 การวางแผน (Planning)

การวางแผนที่ดีจะช่วยทำให้เกิดปัญหาระหว่างการทดลองน้อยลง ตัวอย่างเช่น บุคลากร อุปกรณ์ที่ทำการทดลอง เงินทุน และเรื่องกรรมวิธีการผลิตซึ่งอาจส่งผลให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ครบสมบูรณ์ ถ้าโครงการที่ทำการทดลองนี้มีความสำคัญอันดับรองลงมาอีกโครงการหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้องมีการแบ่งใช้ทรัพยากรบางส่วนไป การแบ่งการทดลองเป็นส่วนๆ ทำให้ผลการทดลองที่ได้มานั้น ยังสามารถนำไปใช้ได้ และเมื่อทรัพยากรที่ถูกแบ่งไปใช้นั้น กลับคืนมาก็สามารถทำการทดลองได้เหมือนเดิมและดำเนินต่อจากตอนที่หยุดไว้ก่อนหน้านี้

การเตรียมการทดลองขึ้นอยู่กับลักษณะปัญหาที่กำลังเจอ และนี่เป็นขั้นตอนที่อาจจะต้องทำการ

- กำหนดปัญหา (Define the problem) ขั้นตอนนี้คือการกำหนดปัญหา ซึ่งปัญหาที่มีขอบเขตชัดเจนจะช่วยทำให้การกำหนดตัวแปรที่ถูกต้อง เพื่อให้สามารถตอบคำถามได้ตามต้องการ
- กำหนดวัตถุประสงค์ (Define the objective) ขั้นตอนนี้คือกำหนดวัตถุประสงค์ ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนจะมั่นใจได้ว่าการทดลองที่จะทำนั้นสามารถตอบคำถามได้ตรง และสาระของข้อมูลที่จะได้มานี้ใช้ได้จริง
- การสร้างแผนการทดลองเพื่อให้ได้สาระข้อมูลที่ต้องการ ในขั้นตอนนี้ควรมีการทวนถึงสิ่งต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกัน
- กระบวนการและระบบการวัดจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุม โดยหลักทางทฤษฎีทั้งกระบวนการและระบบการวัดควรอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติด้วยการใช้หลักการทางการควบคุมกระบวนการทางสถิติ

(Statistical Process Control , SPC) ในกรณีที่กระบวนการไม่ได้อยู่ภายใต้การควบคุมแบบสมบูรณ์ แต่อย่างน้อยกระบวนการนั้นๆ ก็ควรจะสามารถทำซ้ำและให้ค่ากระบวนการแบบเดิม รวมทั้งต้องมีการวัดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งถ้าความแปรปรวนของกระบวนการนี้ได้มามีค่ามากกว่าความแตกต่างหรืออิทธิพลที่ก่อกำเนิด ผลการทดลองที่ได้นี้อาจไม่ได้ประโยชน์มากนัก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.1.2 การคัดเลือก (Screening)

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุง การคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้คุณสามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือ พิจารณาตามหลักการ ความสำคัญจำนวนน้อย การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งบอกด้วยว่าค่าตอบสนองมีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง วิธีดังกล่าวนี้ มักจะใช้ในการคัดเลือก

- Two – Level Full และ Fractional Factorial ซึ่งในวงการอุตสาหกรรมมีการใช้กันแพร่หลาย
- Plackett – Burman แม้ว่าจะมี Resolution น้อย แต่ว่ามีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลองเพื่อการคัดเลือก และการทดสอบเรื่อง Robustness ซึ่งใช้กันโดยทั่วไป
- General Full Factorial (ปัจจัยที่ค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป) อาจจะมีประโยชน์บ้างในการทำการทดลองเพื่อการคัดเลือกขนาดเล็ก

2.13.1.3 การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

หลังจากที่มีการคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญจำนวนน้อย ต้องการที่จะทำการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจะเป็นค่าอะไร ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทดลองด้วย

- ในหัวข้อภาพรวม Factorial Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ตัวแบบของ Two-Level Factorial Plackett-Burman และ General Full Factorial
- ในหัวข้อภาพรวม Response Surface Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ตัวแบบของ Central Composite Design และ Box-Behnken Design
- ในหัวข้อ Response Optimization เป็นการอธิบายถึงวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดในกรณีที่มีค่าตอบสนองมากกว่าหนึ่งค่า (Multiple Responses) Minitab มีทั้งวิธี Numerical Optimization, Interactive Graph และ Overlaid Contour Plot ที่ไว้เพื่อช่วยในการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อเป็นเงื่อนไขของการเกิดค่าตอบสนองหลายๆค่าไปพร้อมๆกัน

2.13.1.4 การทวนสอบ (Verification)

การทวนสอบเป็นการทดลองซ้ำเพื่อดูว่าค่าที่วิเคราะห์มาเป็นค่าที่ดีที่สุดนั้น ยังคงให้ผลลัพธ์ที่จริงจังหรือไม่ ตัวอย่างเช่น คุณทำการทดลองที่มีเงื่อนไขตามที่มาจากค่าที่ดีที่สุด เพื่อหาขนาดของช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยค่าตอบสนอง

2.14 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

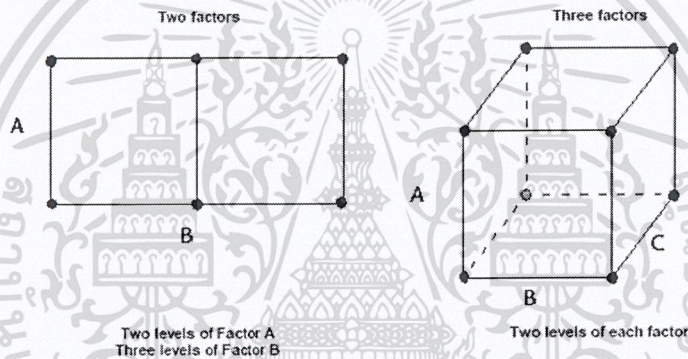
การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ เมื่อมีการทำการทดลอง ควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อมๆกันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง เพราะจะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลาและต้นทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วยโดยอิทธิพลร่วม (Interaction) คือผลของการที่ปัจจัยร่วมกันที่มีอยู่ในหลายๆกระบวนการ ถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลอาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วม (Interaction) ได้ชัดเจนนัก

2.14.1 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial

ในการทดลองแบบ Full Factorial [17] ค่าตอบสนอง (Response) จะถูกวัดค่าที่ทุกๆ เงื่อนไขของทุกค่าระดับปัจจัยที่มีในการทดลอง โดยเงื่อนไขการทดลอง (Combination of Factor Levels) เป็นเงื่อนไขที่กำหนดให้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนอง โดยที่เงื่อนไขการทดลองแต่ละอันจะเรียกว่า รัน (Run) และมีการทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนอง และชุดข้อมูลทั้งหมดในทุกรันจะเรียกว่า แบบการทดลอง (Design) ในรูปภาพด้านล่างนี้เป็นรูปแสดงตัวแบบของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย โดยจุดจะเป็นแสดงถึงเงื่อนไขการทดลอง (Combination) แต่ละอันของการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในตัวแบบ 2 ปัจจัย (Two-Factor Design) จุดที่มุมล่างด้านซ้าย และรันของการทดลองที่มีค่าระดับปัจจัย A เป็นค่าต่ำ (Low) และ ค่าระดับปัจจัย B เป็นค่าต่ำ เช่นกัน



รูปที่ 2.13 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial ในแต่ละปัจจัย [25]

2.14.2 การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial

ในการทดลองแบบ Full Factorial ค่าตอบสนองจะถูกวัดค่าในทุกๆ เงื่อนไขการทดลองซึ่งจะเป็นทุกๆ ค่าระดับของทุกปัจจัย ซึ่งอาจจะต้องมีการทำการทดลองจำนวนมากครั้ง ตัวอย่างเช่น การทดลองของ Two-Level Full Factorial ของ 6 ปัจจัย อย่างน้อยต้องมีการทดลองจำนวน 64 รัน หรือ กรณีที่มี 9 ปัจจัย จะมีการทดลองอย่างน้อย 512 รัน เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุน อาจทำการออกแบบการทดลองให้มีการทำการทดลองเฉพาะบางเงื่อนไข ตัวแบบ Factorial ที่มีการทดลองไม่ครบทุกเงื่อนไขนี้เรียกว่า Fractional Factorial Designs โปรแกรม Minitab สามารถสร้างตัวแบบ Fractional Factorial ได้จนถึงจำนวนปัจจัย 15 ตัวต่อหนึ่งการทดลอง

Fraction Factorial มีความสำคัญอย่างมากในการทดลองเพื่อการคัดเลือกปัจจัย (Screening) เพราะว่ามีกรณีลดจำนวนรันลงจนเหลือขนาดการทดลองที่สามารถทำได้จริง รันที่ถูกเลือกมาทำการทดลองเป็นรันที่อยู่ในชุดการทดลองของตัวแบบ Full Factorial ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดลองครบทุกเงื่อนไขของทุกปัจจัยจะทำให้เกิดผลอย่างหนึ่งที่เรียกว่าคอนฟาวด์ (Confounded) ซึ่ง คอนฟาวด์ นี้หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถทำการประเมินค่าแยกออกมาได้เดี่ยวๆ และอาจเรียกว่าเป็น Aliased ที่อยู่ในรูปแบบของการคอนฟาวด์ เพราะว่าเรื่องของคอนฟาวด์ ทำให้อิทธิพล (Effects) บางตัวไม่สามารถหาค่าได้ทำให้การเลือกการทำ Fractional Factorial ต้องเลือกส่วนที่จะมาทำให้ถูกต้องเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้งานได้

การเลือกส่วนการทดลองที่ดีที่สุด (Best Fraction) บางครั้งอาจจะต้องใช้ความรู้เฉพาะเกี่ยวกับกระบวนการและผลิตภัณฑ์ เพื่อมาตัดสินใจด้วย

2.15 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลด้วยโปรแกรม Minitab

2.15.1 การปรับแบบการทดลองและการสร้างแบบการทดลองโดยใช้ข้อมูลในเวิร์คชีท (Modifying and Using เวิร์คชีท Data)

เมื่อทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Create Design โปรแกรม Minitab จะทำการสร้างตัวแบบที่เหมาะสมในเวิร์คชีทซึ่ง Minitab ต้องใช้ข้อมูลเหล่านี้เพื่อการวิเคราะห์ต่อไปด้วย

ซึ่งสิ่งที่ Minitab จะสร้างขึ้นมามีตามคอลัมน์นี้

- StdOrder
- RunOrder
- CenterPt (มีในหัวข้อ Two-Level Factorial และ Plackett-Buman)
- PtType (มีในหัวข้อ General Full Factorial, Response Surface และ Mixture Design)
- Blocks
- Factors (ข้อปัจจัย)

ถ้าต้องการวิเคราะห์การทดลองที่ออกแบบไว้ด้วยวิธี Analyze Design จะต้องทำตามกฎเกณฑ์ที่ Minitab ออกแบบและกำหนดไว้ ซึ่งถ้าทำการเปลี่ยนเวิร์คชีทตามที่ออกแบบไว้ ยังสามารถใช้วิธี Analyze Design ได้แต่ต้องไปทำการกำหนดแบบการทดลองเอง (Define Custom Design) วิธีใดวิธีหนึ่งก่อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ไม่สามารถทำการลบหรือเคลื่อนย้ายคอลัมน์ที่มีให้จากการออกแบบ
- สามารถใส่ค่าหรือแก้ไข และวิเคราะห์ข้อมูลในคอลัมน์ของเวิร์คชีทตัวแบบที่ออกแบบ เฉพาะในคอลัมน์ที่ไม่ได้รับการออกแบบมา ซึ่งเป็นคอลัมน์ที่ใส่ค่าตอบสนองหรือตัวแปรร่วม (Covariate Data) หรือ ข้อมูลอื่นๆ ที่ต้องการให้มีในตัวแบบ
- สามารถจะลบลำดับการทดลอง (Runs) ได้ ถ้าลบลำดับการทดลองออกไป จะทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ตัวแบบได้ครบทุกพจน์ ซึ่งในกรณีแบบนี้ Minitab จะทำการลบพจน์ที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยอัตโนมัติ และวิเคราะห์เฉพาะส่วนที่เหลืออยู่
- สามารถทำการเพิ่มลำดับการทดลองได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการทำการทดลองเพิ่มที่จุด Center Point หรือทำซ้ำที่ลำดับการทดลองใดหนึ่งโดยเฉพาะ ซึ่งระวังเรื่องการใส่ค่าปัจจัย รวมไปถึง StdOrder RunOrder CenterPt และ Blocks ให้ถูกต้องด้วย รวมทั้งขนาดของคอลัมน์ทั้งหมดต้องมีค่าเท่ากัน ในส่วน StdOrder และ RunOrder จะใช้ตัวเลขอะไรก็ได้ เพราะ Minitab ใช้เพื่อเป็นการบ่งชี้ลำดับของข้อมูลเท่านั้น
- สามารถเปลี่ยนค่าระดับของปัจจัยของข้อมูลที่มีการแก้ไขในหน้าต่างข้อมูล (Data Window)
- สามารถเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยด้วยวิธี Modify Design อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถแก้ไขชนิดของปัจจัยจากตัวเลขไปเป็นตัวหนังสือ หรือจากตัวหนังสือไปเป็นตัวเลข
- สามารถเปลี่ยนชื่อของปัจจัยได้ด้วยวิธี Modify Design
- สามารถใช้วิธีอื่นๆเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลที่ออกแบบไว้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีอยู่ในหัวข้อ DOE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

อย่างไรก็ตาม ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถเพิ่มปัจจัยลงในตัวแบบตามที่ได้ออกแบบไว้ในเวิร์คชีท ด้วยวิธีการกำหนดแบบการทดลองเอง (Define Custom Design) ดังที่ได้กล่าวไว้

2.15.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลด้วยโปรแกรม Minitab

การทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ก่อนที่จะทำการใช้ Minitab ในการออกแบบการทดลอง จะต้องมีทำการทดลองเบื้องต้นมาก่อนเพื่อการวางแผน ตัวอย่างเช่น จะต้องทำการหาปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง ใน Minitab สามารถใช้เพื่อสร้างตัวแบบการทดลองใหม่ หรือใช้กับเวิร์คชีทที่มีข้อมูลอยู่แล้ว
 - ใช้คำสั่ง Create Factorial Design เพื่อสร้างตัวแบบ Full หรือ Fraction Factorial และ Plackett-Burman
 - ใช้คำสั่ง Define Custom Factorial Design เพื่อใช้ในการสร้างตัวแบบกรณีที่มีเวิร์คชีทที่มีข้อมูลอยู่แล้ว ซึ่งสามารถที่จะปรับเปลี่ยนและกำหนดคอลลัมน์ของปัจจัยและค่าต่างๆเพื่อให้เหมาะกับตัวแบบและการวิเคราะห์ต่อไป
2. ใช้คำสั่ง Modify Design เพื่อทำการแก้ไขชื่อปัจจัย เปลี่ยนค่าระดับปัจจัย การสร้างค่าซ้ำ (Replicate) การทำการสุ่มลำดับการทดลอง (Randomization) สำหรับ Two-Level Design สามารถใช้สร้าง Fold Design เพิ่มรันที่จุด Axial Points และเพิ่มรันที่ Center Point
3. ใช้คำสั่ง Display design เพื่อทำการเปลี่ยนลำดับการทดลองของแต่ละรัน และหน่วย ทั้งแบบที่เป็นค่าจริง (Uncoded) หรือค่ารหัส (Code) ซึ่ง Minitab ได้แสดงค่าไว้ของแต่ละปัจจัยในเวิร์คชีท
4. ทำการทดลองและเก็บค่าข้อมูล จากนั้นใส่ค่าข้อมูลในเวิร์คชีทของ Minitab
5. ใช้คำสั่ง Analyze Factorial Design เพื่อวิเคราะห์ค่าตอบสนอง (Response) ใช้คำสั่ง Analyze Variability เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) สำหรับกรณีที่มีการทำซ้ำ
6. ในกรณีที่จะทำการพล็อตกราฟเพื่อดูอิทธิพล (Effects) ใช้คำสั่ง Factorial Plots เพื่อทำการสร้างกราฟที่แสดงได้ ทั้ง อิทธิพลหลัก (Main Effects) และอิทธิพลรวม (Interaction Effects) และ Cube Plot สำหรับตัวแบบ Two-Level สามารถใช้คำสั่ง Contour/Surface Plots เพื่อแสดงกราฟ Contour และ Surface
7. ถ้าต้องการทำการหาค่าที่ดีที่สุดของค่าตอบสนอง ใช้คำสั่ง Response Optimizer หรือคำสั่ง Overlaid Contour Plot เพื่อช่วยในการหาค่าที่ดีที่สุดโดยทำทั้งแบบตัวเลขและพิจารณาจากกราฟ

หมายเหตุ : ในแต่ละการทดลอง อาจจะมีลำดับของขั้นตอนต่างกัน หรือ อาจจะมีการทำซ้ำที่ขั้นตอนใดเพิ่ม หรือ บางขั้นตอนอาจไม่ต้องทำ

2.15.3 การเลือกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Choosing a Factorial Design)

การออกแบบการทดลอง เป็นการกำหนดรูปแบบการทำการทดลองในแต่ละรัน รวมทั้งโครงสร้างของการทำบล็อก (Blocks) การทำซ้ำ (Replication) การสุ่ม (Randomization) และเงื่อนไขปัจจัย (Combination) ของแต่ละรัน เมื่อไปทำการทดลอง จะต้องมีการวัดค่าตอบสนองของแต่ละรันที่เกิดขึ้น Minitab สามารถออกแบบตัวแบบของ Two-level full และ Fractional Plackett-Burman และ General Full Factorial ในการเลือกตัวแบบต้องมีข้อมูลเบื้องต้นดังนี้

- จำนวนปัจจัยที่จะทำการศึกษา
- จำนวนรันที่สามารถทำการทดลองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลกระทบด้านต่างๆ เช่น ต้นทุน เวลา และเรื่องความพร้อมของทรัพยากรที่เกี่ยวข้องในแต่ละปัญหาอาจจะต้องมีการพิจารณาเรื่องอื่นๆ ร่วมด้วยเพื่อให้ตัวแบบเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งตัวแบบนี้จะต้องสามารถทำได้ดังต่อไปนี้
- สามารถเพิ่มจำนวนการทดลองได้อย่างต่อเนื่องหรือทำเพิ่มจากของเดิมได้
- สามารถทำการทดลองได้ในแบบ Orthogonal Blocks ซึ่งตัวแบบที่มีเรื่อง Orthogonal Block คือตัวแบบที่สามารถประมาณค่าอิทธิพลของปัจจัย และบล็อก (Block) แยกจากกันได้ และยังสมารถทำให้ค่าความผันแปรของสัมประสิทธิ์ที่ถูกประมาณค่า (Estimated Coefficients) นั้นมีค่าน้อยสุด
- สามารถตรวจจับความไม่สมรูปของตัวแบบ (Lack of Fit)
- สามารถประมาณค่าอิทธิพลของปัจจัยที่คิดว่าน่าจะมีความสำคัญได้ โดยเลือกทำตัวแบบที่ Resolution ที่เหมาะสมเลข Resolution เป็นตัวอธิบายถึงการ Alias ของปัจจัยในตัวแบบ ซึ่งสามารถอธิบายถึงเลข Resolution ได้ดังนี้
 - Resolution III – ไม่มีอิทธิพลหลัก (Main Effects) ใดที่ alias กันและกัน แต่ว่า อิทธิพลหลัก (Main Effect) จะ Alias กับ อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (Two-Way Interactions) และ อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (Two-Way Interactions) มีการ Alias กันเอง
 - Resolution IV – ไม่มีอิทธิพลหลัก (Main Effect) จะ Alias กับ อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (Two-Way Interactions) แต่ อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (Two-Way Interactions) มีการ alias กันเอง
 - Resolution V -- ไม่มีอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (Two-Way Interactions) ใดที่ Alias กันเอง แต่ อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (Two-Way Interactions) Alias กับ อิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย (Three Way Interaction)

2.15.4 การสร้างตัวแบบการทดลองแบบ 2-Level Factorial

การสร้างตัวแบบ Two – Level Factorial (Creating Two – Level Factorial Designs) Minitab มีตัวเลือกให้เพื่อใช้กับ Two – Level

- Full Factorial Design ซึ่งสร้างได้ถึง 7 ปัจจัยในหนึ่งตัวแบบ
- Fractional Factorial Design ซึ่งสามารถสร้างได้ 15 ปัจจัยในหนึ่งตัวแบบ

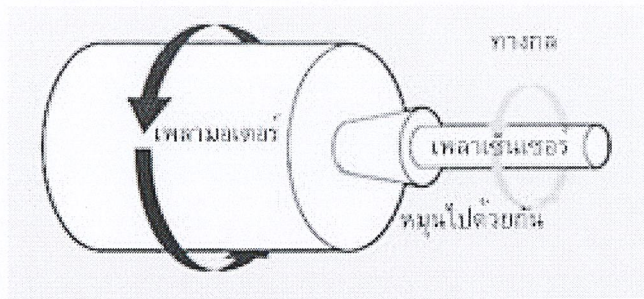
สามารถเลือกใช้ตัวแบบที่ Minitab สร้างไว้แล้ว (ซึ่งตัวแบบเหล่านี้สามารถดูรายละเอียดที่ตัวเลือก Display Available Design หรือสามารถสร้างตัวแบบเองด้วยการกำหนดตัว Generator ในการสร้างตัวแบบ

2.16 หลักการทำงานของเครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer) [19]

เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer) โดยทั่วไป จะใช้วิธีการวัดอยู่ 3 ประเภท คือ

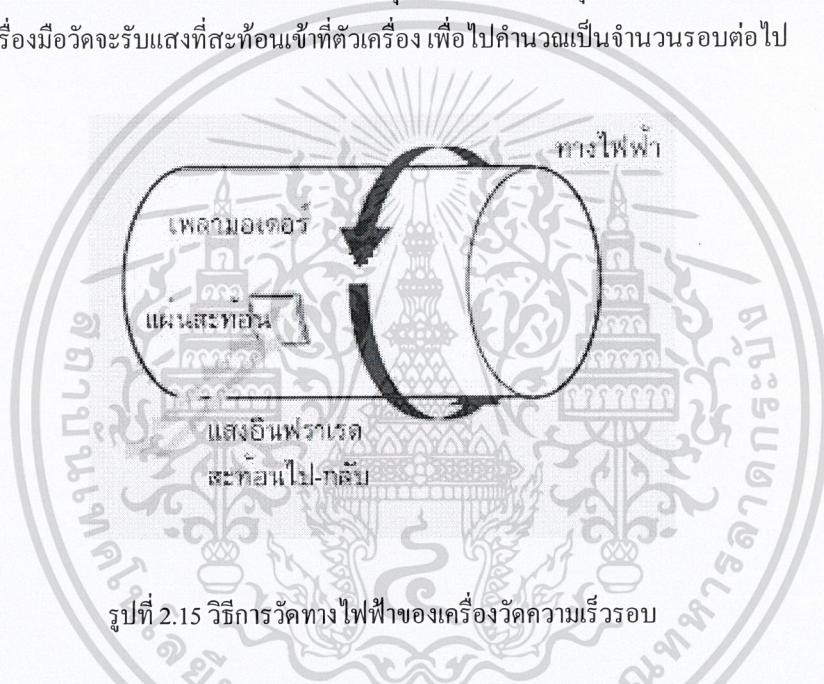
- เครื่องวัดความเร็วรอบทางกล เป็นการใช้เซ็นเซอร์ไปสัมผัสกับชิ้นงานที่กำลังหมุนอยู่โดยตรง เมื่อเซ็นเซอร์หมุน จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบ นั่นคือ หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นนำแรงดันไฟฟ้าไปคำนวณเป็นความเร็วรอบอีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 วิธีการวัดทางกลของเครื่องวัดความเร็วรอบ

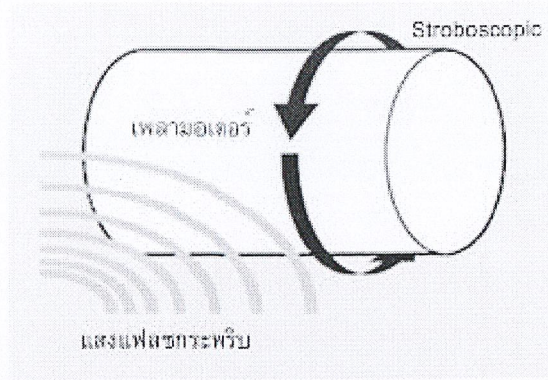
- เครื่องวัดความเร็วรอบทางไฟฟ้า เป็นการใช้แสงอินฟราเรด ร่วมกับแผ่นสะท้อนแสงกล่าวคือ จะต้องนำแผ่นสะท้อนแสงไปติดที่ชิ้นงาน ก่อนที่ชิ้นงานจะหมุนขณะที่ชิ้นงานหมุน ให้ยิงแสงอินฟราเรดไปที่แผ่นสะท้อนแสง เครื่องมือวัดจะรับแสงที่สะท้อนเข้าที่ตัวเครื่อง เพื่อไปคำนวณเป็นจำนวนรอบต่อไป



รูปที่ 2.15 วิธีการวัดทางไฟฟ้าของเครื่องวัดความเร็วรอบ

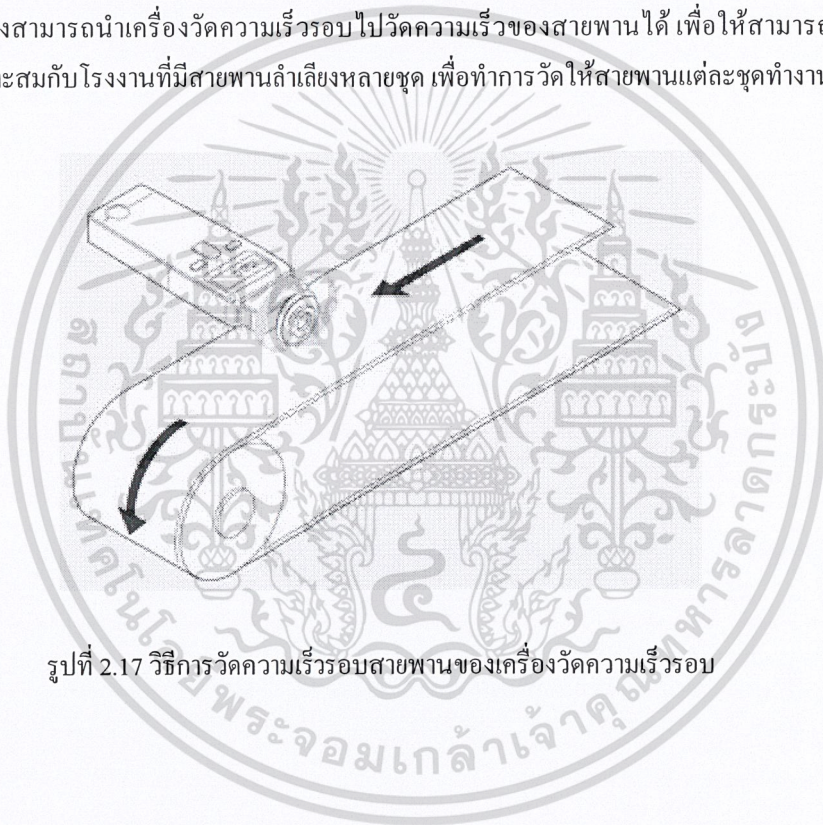
- เครื่องวัดความเร็วรอบแบบวิธี Stroboscopic จะใช้หลักการคือ ถ้าความถี่ของแสงแฟลชเป็นความถี่เดียวกับความเร็วรอบการหมุนแล้ว วัตถุจะหยุดนิ่งในสายตาของผู้ที่ทำการวัด ซึ่งความถี่นี้จะเป็นความเร็วรอบของการหมุน ซึ่งการวัดวิธีนี้มีข้อดีคือ ไม่ต้องมีการสัมผัสชิ้นงาน ไม่ต้องใช้แผ่นสะท้อนแสงติดที่ชิ้นงาน ก็ทำให้เราสามารถวัดความเร็วรอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วิธีการวัดทาง Stroboscopic ของเครื่องวัดความเร็วรอบ

นอกจากนี้ยังสามารถนำเครื่องวัดความเร็วรอบไปวัดความเร็วของสายพานได้ เพื่อให้สามารถรู้ความเร็วของสายพานได้ทันที เหมาะสมกับโรงงานที่มีสายพานลำเลียงหลายชุด เพื่อทำการวัดให้สายพานแต่ละชุดทำงานสอดคล้องกัน



รูปที่ 2.17 วิธีการวัดความเร็วรอบสายพานของเครื่องวัดความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกลของรอยต่อโลหะ ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดรายละเอียดของวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 อลูมิเนียม (AI 6061)

อลูมิเนียม (AI 6061) เป็นวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 3.1 ของบริษัท TOZZHIN INTERNATIONAL CORPORATIONAL โดยเลือกใช้น้ำหนักเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร และอลูมิเนียมแผ่นจัตุรัสขนาด 15×15 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร

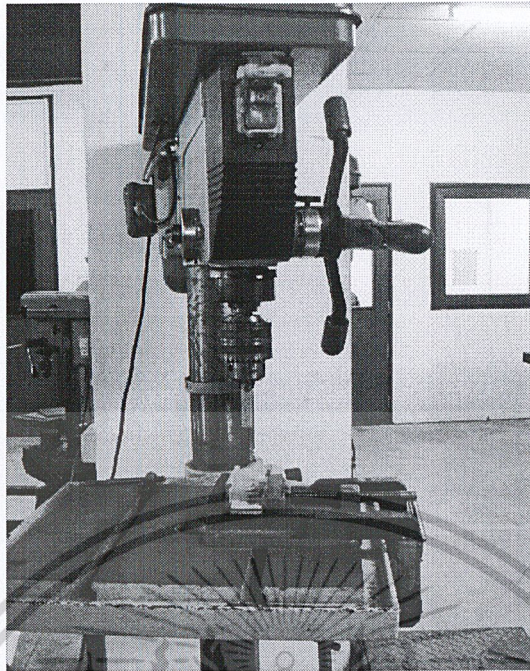
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียม (AI 6061)

Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other	
									Each	Total
Requirement	0.60-	0.50	0.60-	0.20-	0.80-	0.10	0.25	0.10	0.05	0.15
Billet Lot No.	1.00	max	1.10	0.80	1.20	max	max	max	max	max
G1135	0.692	0.118	0.808	0.299	0.935	0.001	0.002	0.029	OK	OK

3.1.2 เครื่องเจาะ

เครื่องเจาะใช้ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เครื่องหมายการค้า BOYE รุ่น ZJ 5132 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และความเร็วยกของเครื่องเจาะที่สามารถตั้งค่าได้แสดงในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องเจาะ

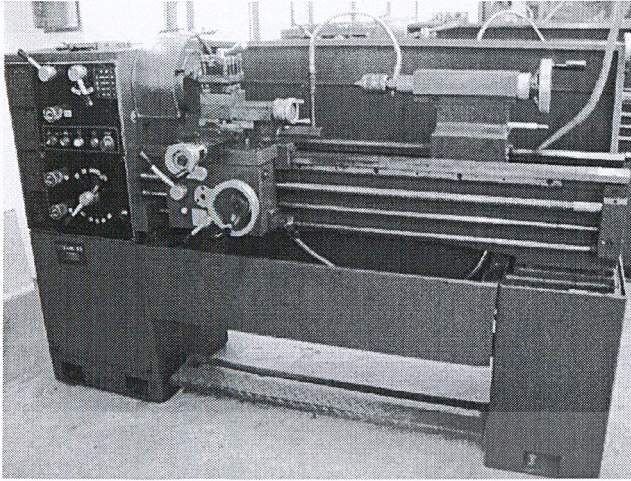
ตารางที่ 3.2 ความเร็วรอบของเครื่องเจาะที่สามารถตั้งค่าได้

	50 Hz	60 Hz		50 Hz	60 Hz
A-4	150	180	A-2	470	560
B-4	240	290	C-2	1030	1240
C-4	330	400	D-2	1430	1720
A-3	270	320	B-1	1270	1520
B-3	430	520	C-1	1790	2150
D-3	830	1000	D-1	2450	2940

3.1.3 เครื่องกลึง

เครื่องกลึงที่ใช้สำหรับขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานในการทดลอง โดยใช้การกลึงแบบปาดหน้า เครื่องหมายการค้า LIANG DEI รุ่น LD-1640A ดังแสดงในรูปที่ 3.2

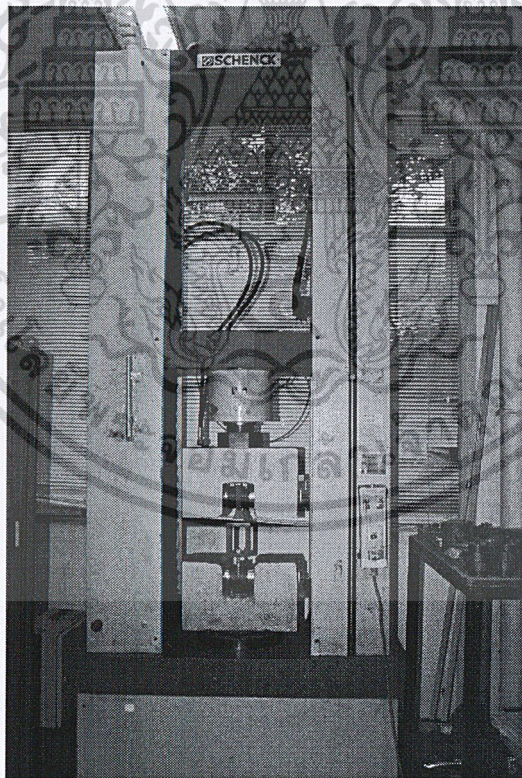
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เครื่องกลึง

3.1.4 เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลสำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดึง

ใช้การทดสอบแรงดึง เครื่องหมายเลขค่า SCHENCK รุ่น RM 100 ดังแสดงในรูปที่ 3.3

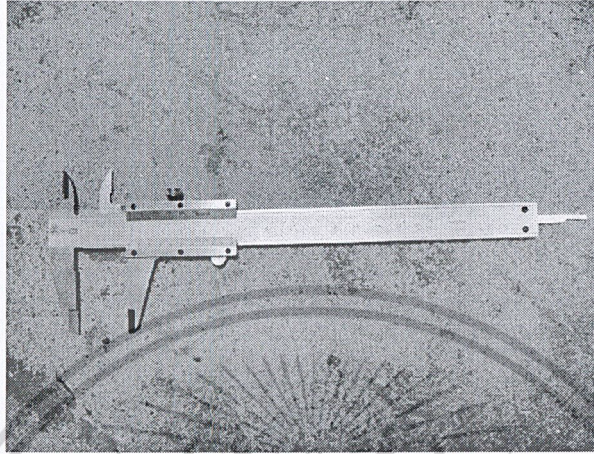


รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์

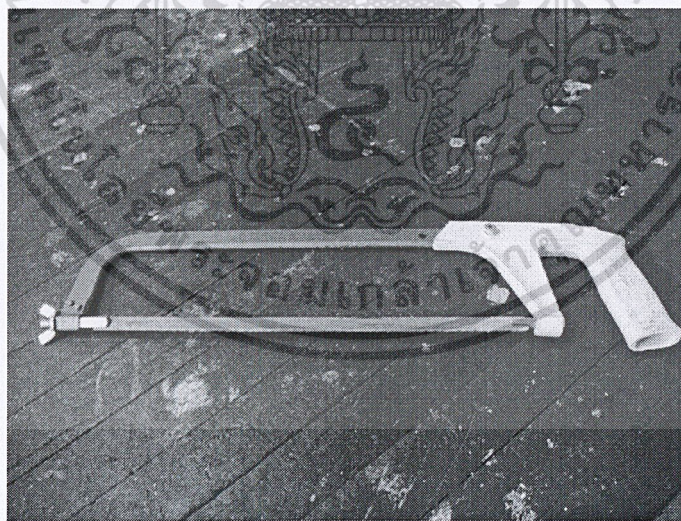
เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง เป็นเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ที่มีขนาดความละเอียด 0.02 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์

3.1.6 เลื่อยมือ

เป็นอุปกรณ์สำหรับการตัดคูมึนิเยมเพื่อนำชิ้นงานมาเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.5

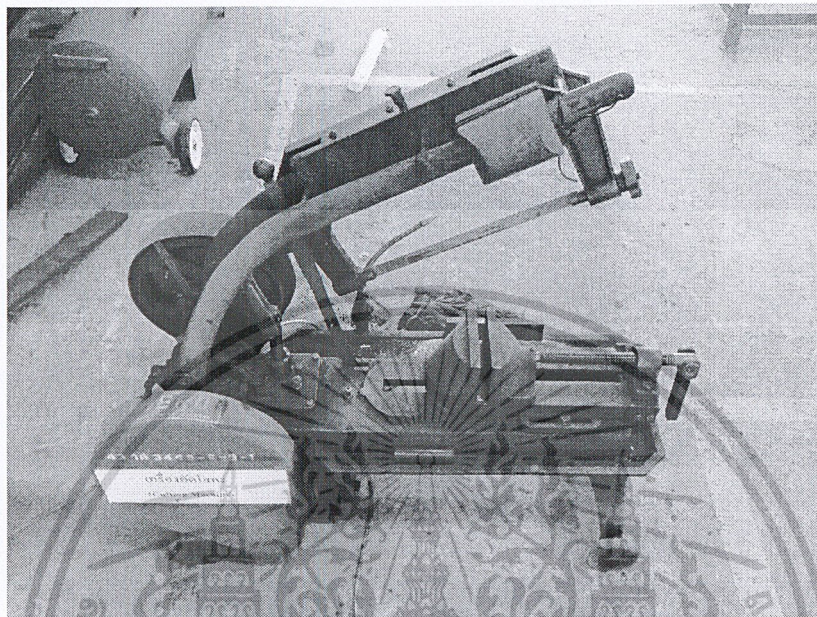


รูปที่ 3.5 เลื่อยมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 เครื่องตัดอัตโนมัติ

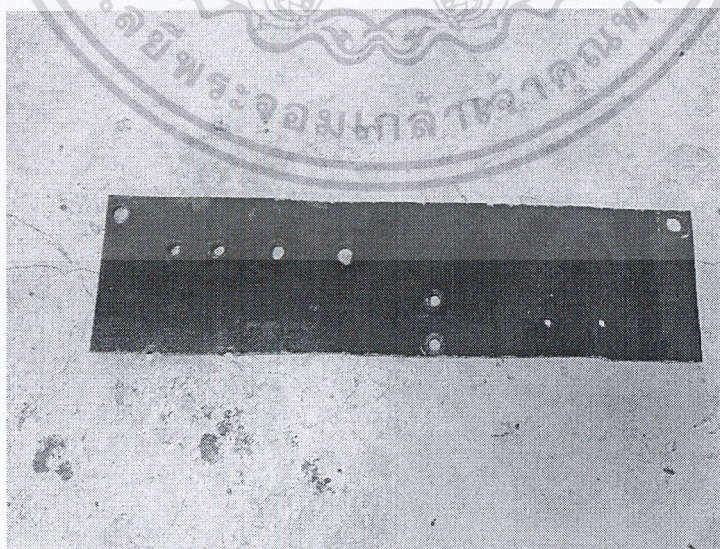
การตัดชิ้นงานอลูมิเนียมเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ใช้เครื่องตัดอัตโนมัติเครื่องหมายการค้า HERO รุ่น HR-14 ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องตัด

3.1.8 ฉนวนกันความร้อน แผ่นเบเคอไลต์

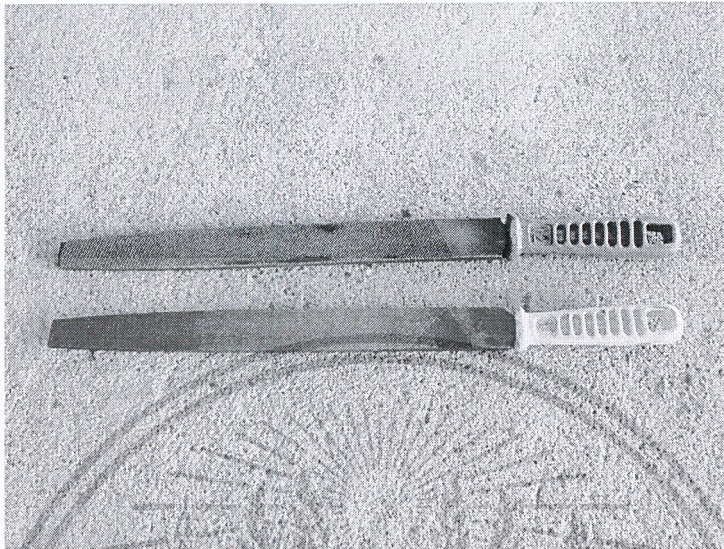
แผ่นเบเคอไลต์ ใช้ทำเป็นฉนวนกันความร้อนในขั้นตอนการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 3.7 แผ่นเบเคอไลต์ นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.9 ตะไบ

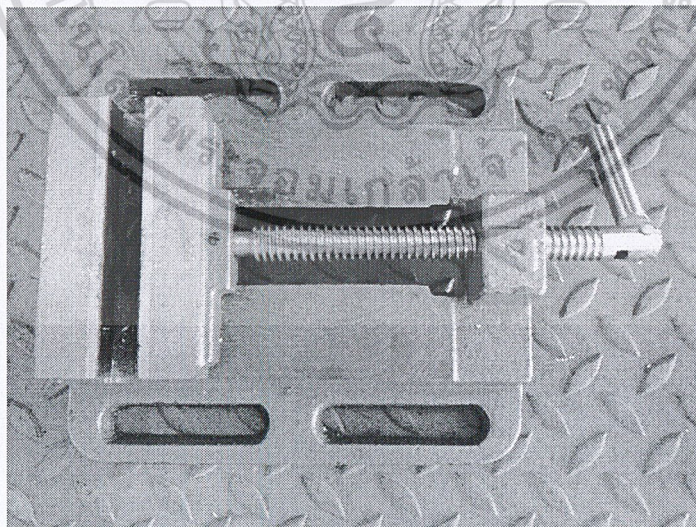
ตะไบแบบหยาบและแบบละเอียด ใช้ในการตัดแต่งชิ้นงานให้ผิวหน้าเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตะไบแบบหยาบและแบบละเอียด

3.1.10 ปากก้าจับชิ้นงาน

ปากก้าจับชิ้นงานขนาด 4 นิ้ว เพื่อใช้จับแท่งอลูมิเนียมให้อยู่กับที่ขณะทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.9

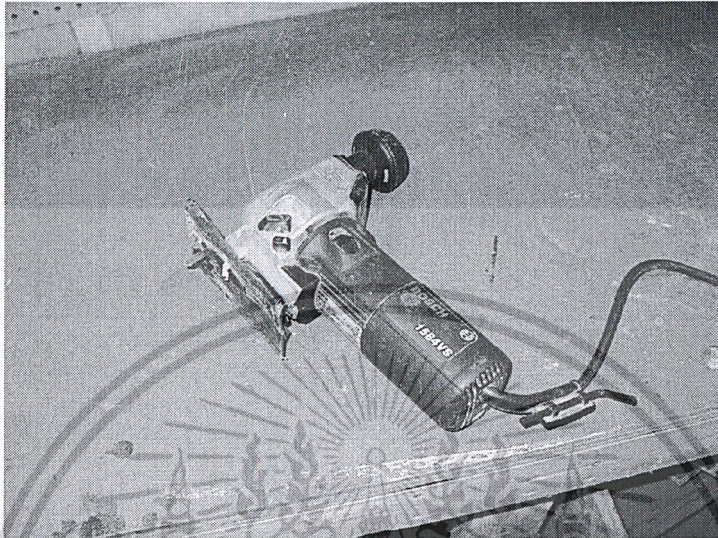


รูปที่ 3.9 ปากก้าจับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.11 เลื่อยจิ๊กซอว์

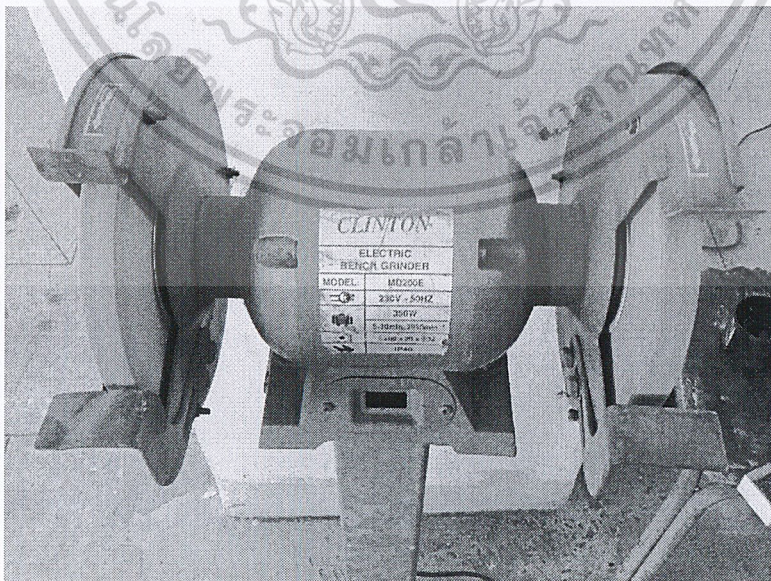
เลื่อยจิ๊กซอว์ เครื่องหมายการค้า BOSCH รุ่น 1584VS ใช้ในการตัดแผ่นเบเคอไลต์ให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ เพื่อใช้ทำเป็นฉนวนกันความร้อนในขั้นตอนการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เลื่อยจิ๊กซอว์

3.1.12 เครื่องเจียรระโน

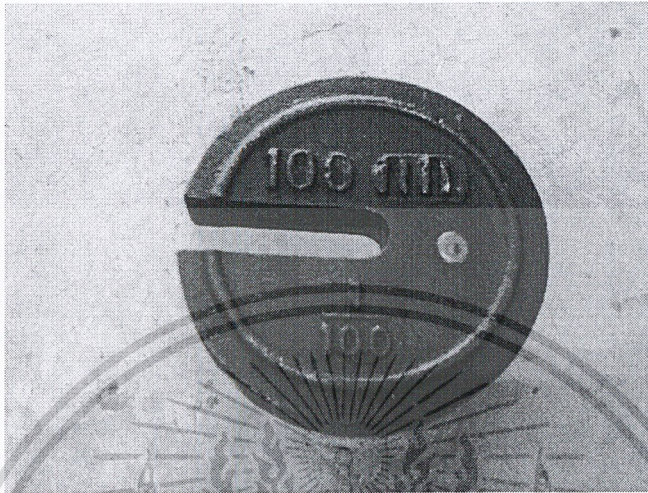
เครื่องเจียรระโน เครื่องหมายการค้า CLINTON รุ่น MD200E ใช้ในการเจียรระโนผิวหน้าชิ้นงานอลูมิเนียมให้เรียบเสมอกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่ของหน่วยงานนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.13 ลูกตุ้มน้ำหนักขนาด 1 กิโลกรัม

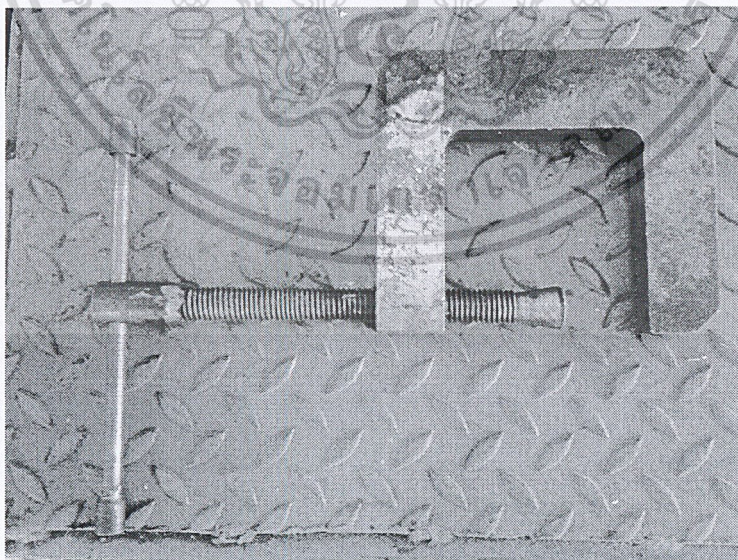
ลูกตุ้มน้ำหนักจำนวน 5 ลูก ใช้คู่กับอุปกรณ์แขวนและนำไปแขวนที่แขนน้ำหนักเพื่อให้ได้ค่าแรงกดคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลูกตุ้มน้ำหนัก

3.1.14 ปากกาจับชิ้นงาน C-Clamp

ใช้กับกับปากกาจับชิ้นงาน เพื่อให้ปากกาจับชิ้นงานอยู่นิ่งกับที่ขณะทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.13

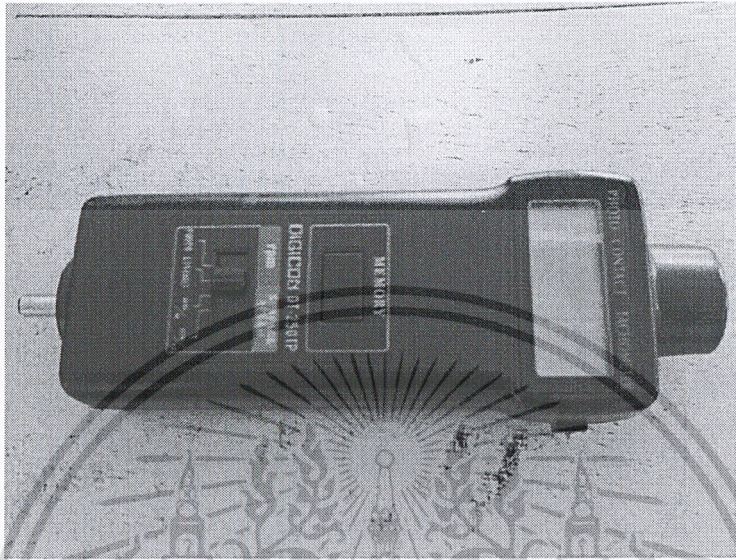


รูปที่ 3.13 ปากกาจับชิ้นงาน C-Clamp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.15 เครื่องวัดความเร็วรอบ Tachometer

เครื่องวัดความเร็วรอบการค้ำ DIGICON รุ่น DT-250TP ใช้ในการวัดความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจริงในการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความเร็วรอบ

3.1.16 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักใช้ในการชั่งแรงกดที่เกิดขึ้นขณะที่เขวนค้ำน้ำหนักแล้ว

3.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

ในการเลือกการออกแบบการทดลองได้เลือกการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ 2^k โดยที่เลข 2 หมายถึงระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ส่วนค่า k หมายถึงจำนวนของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้มีด้วยกันทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ น้ำหนักกดเสียดทาน น้ำหนักค้ำ ความเร็วรอบ และเวลาที่ใช้ในการกด โดยในการทำการทดลองนี้ได้ทำการสุ่ม (Randomization) ลำดับการทดลอง ดังนั้นจำนวนครั้งในการทดลองนี้มีทั้งหมดเท่ากับ $2^4 = 16$ ครั้ง

การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ได้แก่ เครื่องเจาะที่สามารถควบคุมค่าตัวแปรต่างๆได้และมีค่าความเร็วรอบคงที่ตามที่กำหนด การทดลองครั้งนี้มีแผนการทดลองโดยออกแบบการทดลองว่าตัวแปรดังกล่าวใน 4 ตัวแปรนั้นตัวไหนมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง โดยแสดงภาพรวมดังแสดงในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับที่เลือกใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ต่ำ	สูง
น้ำหนักกดเสียดทาน (กิโลกรัม)	45	56
น้ำหนักกดอยู่ (กิโลกรัม)	65	75
ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	1790	2450
เวลาที่ใช้ในการกด (วินาที)	15	20

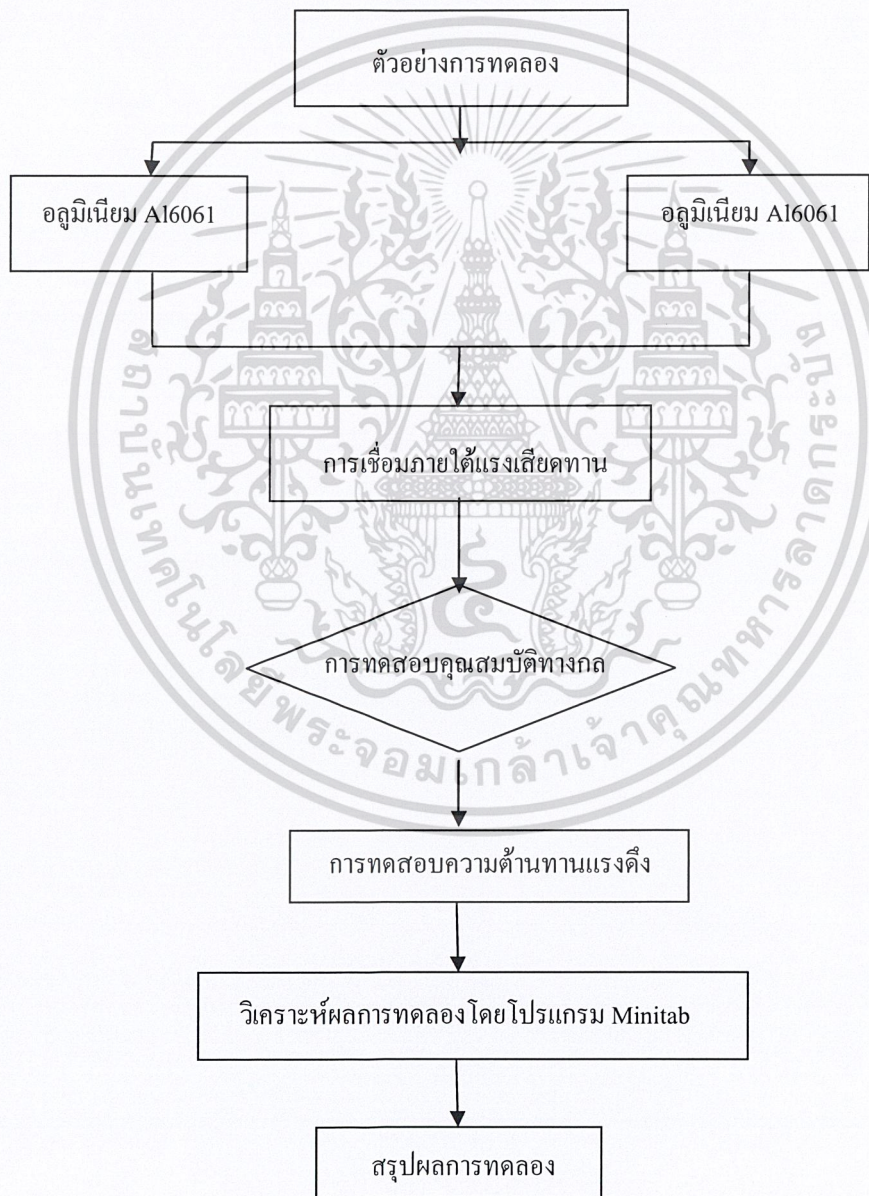
การทดลองกระบวนการเชื่อมแบบแรงเสียดทานด้วยเครื่องเจาะด้วยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและระดับของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 3.3 ขั้นตอนแรกเมื่อทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทานดังตารางออกแบบการทดลองจากนั้นนำชิ้นงานมาหาค่าความต้านทานแรงดึง แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าตัวแปรตอบสนอง โดยตัวอย่างตารางการบันทึกผลการทดลองอย่างง่ายแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตารางบันทึกผลการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				ค่าความต้านทานแรงดึง (กิโลนิวตัน)
	น้ำหนักกดเสียดทาน (กิโลกรัม)	น้ำหนักกดอยู่ (กิโลกรัม)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	เวลาที่ใช้ในการกด (วินาที)	
1	45	65	1790	15	
2	45	65	1790	20	
3	45	65	2450	15	
4	45	65	2450	20	
5	45	75	1790	15	
6	45	75	1790	20	
7	45	75	2450	15	
8	45	75	2450	20	
9	56	65	1790	15	
10	56	65	1790	20	
11	56	65	2450	15	
12	56	65	2450	20	
13	56	75	1790	15	
14	56	75	1790	20	
15	56	75	2450	15	
16	56	75	2450	20	

เนื่องจากในการศึกษาการวิจัยมีค่าตัวแปรต่างๆ เป็นจำนวนมากที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน อลูมิเนียม A16061 การดำเนินการวิจัยจึงต้องใช้เครื่องเจาะที่สามารถควบคุมค่าความเร็วรอบได้ เพื่อความสะดวกในการดำเนินการทดลอง ทั้งนี้เพื่อให้ค่าตัวแปรอื่นๆมีค่าคงที่มากที่สุด

จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเข้าโปรแกรม Minitab เพื่อดูความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวว่ามีตัวแปรตัวใดที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงบ้าง สำหรับขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทดลองเปรียบเทียบค่าตัวแปรที่พยากรณ์ได้ หรือค่าที่มีผลที่ได้จากการนำผลของข้อมูลไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่มีอิทธิพลต่อปัจจัยในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน การออกแบบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมีขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบคุณสมบัติทางกลสามารถแสดง ดังรูปที่ 3.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.15 Flow Chart ขั้นตอนการทดลอง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การหาค่าความเร็วรอบของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ในการหาความเร็วรอบของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานนั้น เราต้องใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer) ในการวัดความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจากการทดลองจริง โดยใช้การวัดความเร็วรอบทางไฟฟ้า เป็นการชี้แสงอินฟราเรด ร่วมกับแผ่นสะท้อนแสง เราจะต้องนำแผ่นสะท้อนแสง ไปติดที่ชิ้นงานก่อนที่ชิ้นงานจะหมุน ขณะที่ชิ้นงานหมุนให้ชี้แสงอินฟราเรด ไปที่แผ่นสะท้อนแสง เครื่องมือวัดจะรับแสงที่สะท้อนเข้าที่ตัวเครื่อง เพื่อไปคำนวณเป็นจำนวนรอบ ความเร็วรอบที่วัดได้ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ความเร็วรอบที่วัดได้จากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

น้ำหนักกดเสียดทาน (กิโลกรัม)	ความเร็วรอบ 1790 รอบต่อนาที		ความเร็วรอบ 2450 รอบต่อนาที	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
45	1924	1898	2634	2657
56	1831	1843	2588	2575
ค่าเฉลี่ย	1874		2613.5	

จากความเร็วรอบที่วัดได้จากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ที่ความเร็วรอบ 1790 รอบต่อนาที วัดได้ค่าเฉลี่ย 1874 รอบต่อนาที ที่ความเร็วรอบ 2450 รอบต่อนาที ได้ค่าเฉลี่ย 2613.5 รอบต่อนาที จะได้ปัจจัยที่ใช้ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ปัจจัยและระดับที่เลือกใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ต่ำ	สูง
น้ำหนักกดเสียดทาน (กิโลกรัม)	45	56
น้ำหนักกดอยู่ (กิโลกรัม)	65	75
ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	1874	2613.5
เวลาที่ใช้ในการกด (วินาที)	15	20

จากปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่กำหนดในตารางที่ 3.6 นำมาออกแบบตารางการทดลองเพื่อทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานและนำมาบันทึกผลการทดลองดังตารางที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ตารางบันทึกผลการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				ค่าความต้านทานแรงดึง (กิโลนิวตัน)
	น้ำหนักกดเสียดทาน (กิโลกรัม)	น้ำหนักกดอยู่ (กิโลกรัม)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	เวลาที่ใช้ในการกด (วินาที)	
1	45	65	1874	15	
2	45	65	1874	20	
3	45	65	2613.5	15	
4	45	65	2613.5	20	
5	45	75	1874	15	
6	45	75	1874	20	
7	45	75	2613.5	15	
8	45	75	2613.5	20	
9	56	65	1874	15	
10	56	65	1874	20	
11	56	65	2613.5	15	
12	56	65	2613.5	20	
13	56	75	1874	15	
14	56	75	1874	20	
15	56	75	2613.5	15	
16	56	75	2613.5	20	

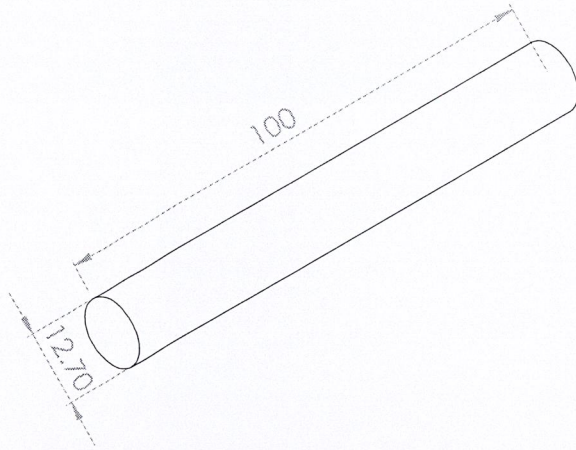
3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อโลหะต้องมีการวางแผนการทดลองหรือมีการจัดลำดับขั้นของการทดลอง เพื่อที่จะให้การทดลองเป็นไปตามขั้นตอนที่ออกแบบไว้และในการทดลองก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามความต้องการจากนั้นทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแล้วนำชิ้นงานไปทดสอบคุณสมบัติทางกล และตรวจสอบโครงสร้างของรอยเชื่อม โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

3.4.1 เตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

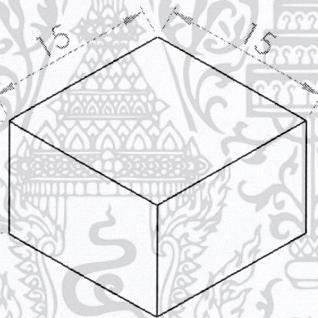
เตรียมชิ้นงาน แท่งอลูมิเนียม (AI 6061) ที่ใช้ในการเชื่อมมาทำการลดขนาดโดยใช้เลื่อยมือและเครื่องกลึงแบบมีดปาดหน้าเครื่องหมายการค้า LIANG DEI รุ่น LD-1640A ให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

เตรียมชิ้นงาน แผ่นอลูมิเนียม (AI 6061) ที่ใช้ในการเชื่อมแท่งอลูมิเนียม (AI 6061) ให้ได้ขนาดเป็นแผ่นจัตุรัสขนาด 15x15 มิลลิเมตรหนา 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.17



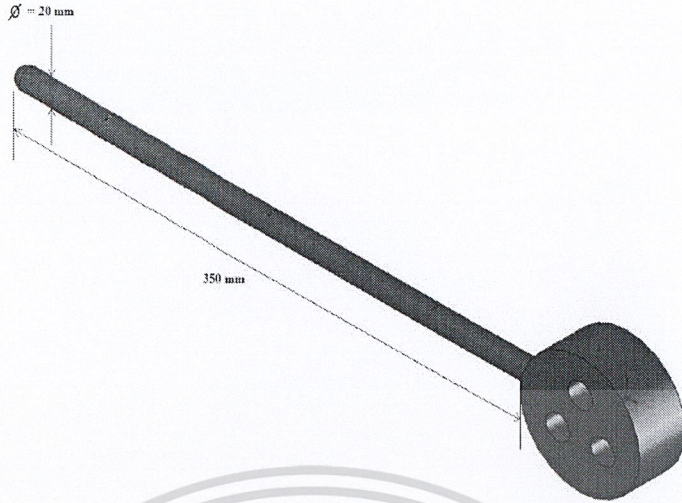
รูปที่ 3.17 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง มีขนาด 15 x 15 มิลลิเมตรหนา 10 มิลลิเมตร

3.4.2 ขั้นตอนการออกแบบแขนกดน้ำหนัก

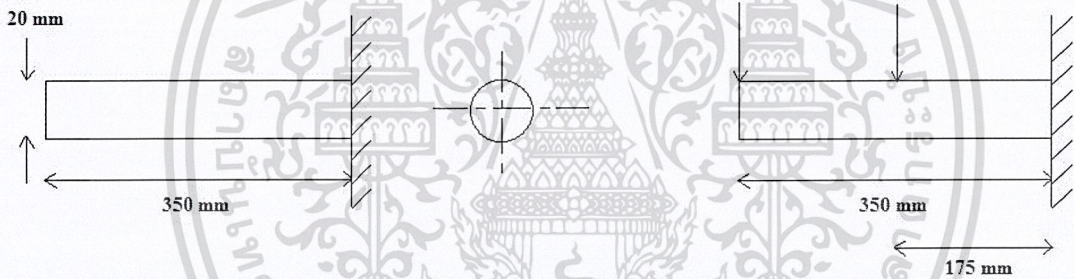
ในการประดิษฐ์แขนกดน้ำหนักจะใช้วัสดุ เหล็ก AISI 1020 ซึ่งเป็นเหล็กคาร์บอน (Carbon Steel) นิยมใช้ทำโครงสร้างสามารถเทียบได้กับมาตรฐาน JIS (ญี่ปุ่น) คือ S20C มีส่วนประกอบทางเคมี โดยประมาณ คือ 0.18-23% C 0.15-0.35% Si 0.30-0.60% Mn 0.03% Cr 0.035 Mo

ทำการออกแบบแขนกดน้ำหนักให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรยาว 400 มิลลิเมตรซึ่งมีแรงกด F (นิวตัน) และแรงที่เกิดจากน้ำหนักคาน mg (นิวตัน) ดังแสดงในรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แขนกคน้ำหนักที่ได้ออกแบบไว้

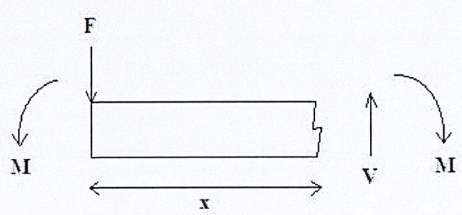


รูปที่ 3.19 ภาพตัดของน้ำหนักที่กดบนแกนกด

การคำนวณ

- แรงเฉือน (V) และ โมเมนต์ค้ดในคาน(M)

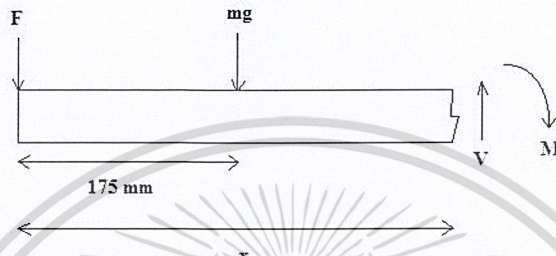
ที่หน้าตัด $0 < x < 175$ มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.20 การแรงเฉือนและ โมเมนต์ค้ดในคานที่หน้าตัด $0 < x < 175$ มิลลิเมตร
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	V	$=$	$-F$	นิวตัน	
	M	$=$	$-Fx$	นิวตัน•มิลลิเมตร	
$x = 0 \text{ mm.}$;	M	$=$	0	นิวตัน•มิลลิเมตร
$x = 175 \text{ mm.}$;	M	$=$	-175	นิวตัน•มิลลิเมตร

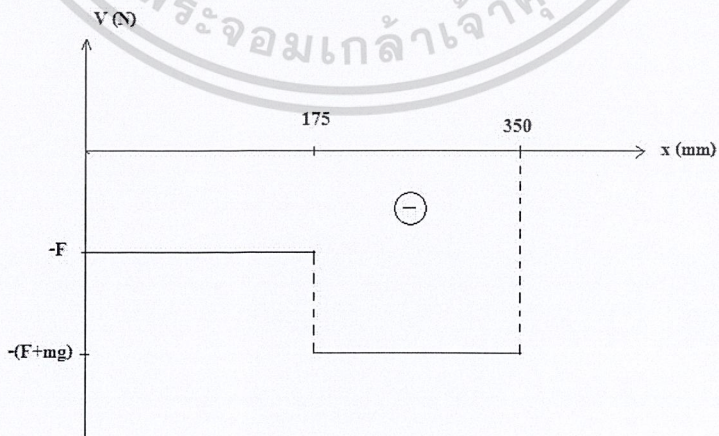
ที่หน้าตัด $175 \text{ mm.} < x < 350 \text{ mm.}$



รูปที่ 3.21 การแรงเฉือนและ โมเมนต์ตัดในคานที่หน้าตัด $175 < x < 350$ มิลลิเมตร

	V	$=$	$-(F+mg)$	นิวตัน	
	M	$=$	$-(Fx+mg(x-175))$	นิวตัน•มิลลิเมตร	
$x = 175 \text{ mm}$;	M	$=$	$-(175F+mg(175-175))$	
			$=$	$-175F$	นิวตัน•มิลลิเมตร
$x = 350 \text{ mm}$;	M	$=$	$-(350F+mg(350-175))$	
			$=$	$-350F - 175mg$	นิวตัน•มิลลิเมตร

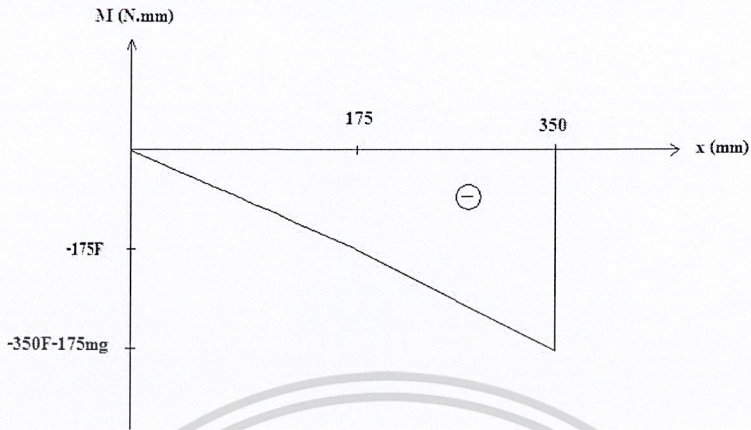
ไดอะแกรมของแรงเฉือน (Shear Force Diagram)



รูปที่ 3.22 ไดอะแกรมของแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอะแกรมของโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram)



รูปที่ 3.23 ไดอะแกรมของโมเมนต์ดัด

- ความเค้นดัดในคาน

จากสมการ

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

(3.1)

ซึ่ง

- σ = ความเค้นดัด หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)
- M = โมเมนต์ หน่วยเป็นนิวตัน·มิลลิเมตร ($N \cdot mm$)
- c = ระยะจากแนวแกนสะเทินของหน้าตัด หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
- I = โมเมนต์ของความเฉื่อย หน่วยเป็นมิลลิเมตร⁴ (mm^4)



รูปที่ 3.24 ความเค้นดัดในคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหน้าตัดวงกลม

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi d^4}{64} \\ &= \frac{\pi 20^4}{64} \\ &= 2500\pi \text{ มิลลิเมตร}^4 \end{aligned}$$

ความเค้นดึงที่เกิดจากโมเมนต์

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{Mc}{I} \\ &= \frac{(350F+175\text{mg})(10\text{mm})}{2500\pi \text{ mm}^4} \\ \sigma_t &= \frac{(350F+175\text{mg})}{250\pi} \end{aligned}$$

ความเค้นอัดที่เกิดจากโมเมนต์

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{Mc}{I} \\ &= \frac{(350F+175\text{mg})(10\text{mm})}{2500\pi \text{ mm}^4} \\ \sigma_c &= \frac{(350F+175\text{mg})}{250\pi} \end{aligned}$$

ความเค้นที่เกิดจากการแตกแรง

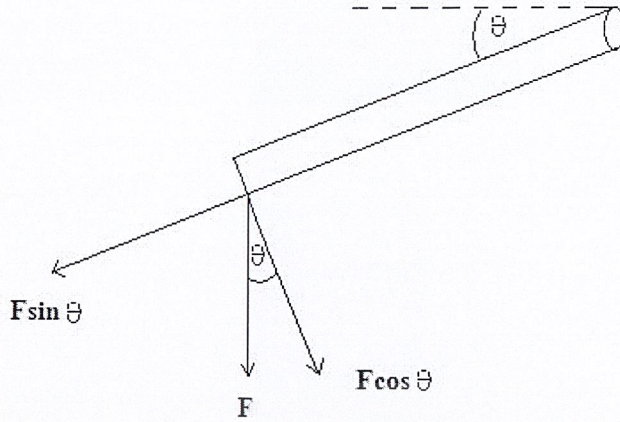
จากสมการ

$$\sigma_F = \frac{F}{A}$$

(3.2)

ซึ่ง σ_F = ความเค้น หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)
 F = แรง หน่วยเป็นนิวตัน (N)
 A = พื้นที่รับแรง หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร (mm^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 การแตกแรงที่แกนคาน้ำหนัก

$$\sigma_F = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_F = \frac{F \sin \theta}{\pi r^2 c^2}$$

$$\sigma_F = \frac{F \sin \theta}{100 \pi}$$

จากคุณสมบัติของเหล็ก AISI 1020
จะได้

$$\sigma_y = 331 \text{ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร}$$

ตารางที่ 3.8 ค่าความปลอดภัย (Safety Factor)

ชนิดของแรง	เหล็กเหนียวและโลหะเหนียว		เหล็กหล่อและโลหะเปราะ
	N_y	N_u	N_u
แรงอยู่นิ่ง	1.5-2	3-4	5-6
แรงซ้ำทิศทางเดียวหรือแรงกระแทกเล็กน้อย	3	6	7-8
แรงซ้ำสองทิศทางหรือแรงกระแทกเล็กน้อย	4	8	10-12
แรงกระแทกอย่างหนัก	5-7	10-15	15-20

แรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงอยู่นิ่ง จึงเลือกค่าความปลอดภัย $N_y = 2, N_u = 4$

ความเค้นดึง

$$\sigma_t + \sigma_F \leq \frac{\sigma_y}{N_u}$$

$$\frac{F \sin \theta}{100 \pi} + \frac{(350F + 175mg)}{250 \pi} \leq \frac{331}{4}$$

$$\frac{F \sin \theta}{100 \pi} + \frac{(350F + 175mg)}{250 \pi} \leq 82.7$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นอัด

$$\begin{aligned} \sigma_F - \sigma_c & \leq \frac{\sigma_y}{N_y} \\ \frac{(350F+175mg)}{250\pi} - \frac{F\sin\theta}{100\pi} & \leq \frac{331}{2} \\ \frac{(350F+175mg)}{250\pi} - \frac{F\sin\theta}{100\pi} & \leq 165.5 \end{aligned}$$

ค่า F สูงสุดที่ใช้คือ 100 นิวตัน, น้ำหนักคานสูงสุดที่ใช้คือ 50 นิวตัน และ มุมที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ 90° จะได้

ความเค้นดึง	56.0225	≤ 82.75
ความเค้นอัด	55.3859	≤ 165.5

จากค่าความเค้นดึงและความเค้นอัดที่คำนวณได้ ปรากฏว่ามีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นของวัสดุ ดังนั้นถือว่าแขนจับที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน C1020 สามารถทนแรงกด 100 นิวตัน และรับน้ำหนักจากตัวคาน 50 นิวตัน

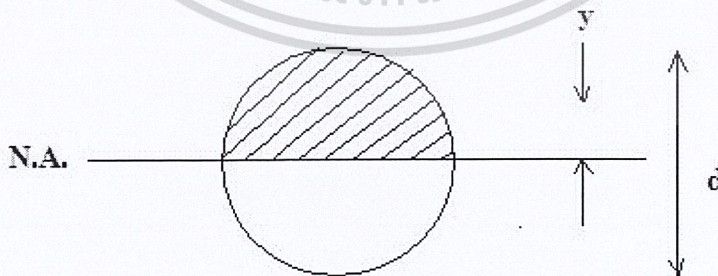
- ความเค้นเฉือนในคาน

จากสมการ

$$\tau = \frac{VQ}{Ib} \tag{3.3}$$

ซึ่ง	τ	=	ความเค้นเฉือนในคาน หน่วยเป็นนิวตัน/มิลลิเมตร ² (N/mm ²)
	V	=	แรงเฉือนในแนวตั้ง หน่วยเป็นนิวตัน (N)
	b	=	ความกว้างของคาน หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
	Q	=	โมเมนต์ของพื้นที่รอบแกนสะเทิน หน่วยเป็นมิลลิเมตร ⁴ (mm ⁴)
	I	=	โมเมนต์ของความเฉื่อย หน่วยเป็นมิลลิเมตร ⁴ (mm ⁴)

เมื่อนำตัดคานเป็นรูปวงกลม



รูปที่ 3.26 หน้าตัดคานของแขนคานน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร

$$\tau = \frac{VQ}{Ib}$$

เมื่อ Q = พื้นที่ครึ่งวงกลม \times ระยะจากจุดศูนย์กลางออกไปยังแกนสะเทิน

$$Q = \frac{1}{2} \left[\frac{\pi d^2}{4} \right] \times \frac{2d}{3\pi} = \frac{d^2}{12}$$

$$\tau = \frac{V \times \frac{d^2}{12}}{\frac{\pi d^4}{64} \times d} = \frac{4}{3} \cdot \frac{V}{A}$$

$$\tau = \frac{4}{3} \cdot \frac{(F + mg)}{\frac{\pi 20^2}{4}}$$

$$\tau = \frac{4}{3} \cdot \frac{(F + mg)}{100\pi}$$

โดย $\tau_y = 0.6\sigma_y = 0.6 \times 331 = 198.6 \text{ N/mm}^2$

ความเค้นเฉือน

$$\tau \leq \frac{\tau_y}{N}$$

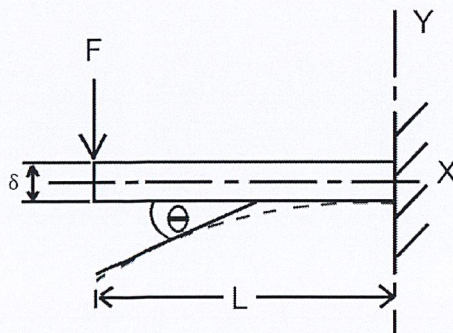
$$\frac{4}{3} \cdot \frac{(F + mg)}{100\pi} \leq \frac{198.6}{4}$$

$$\frac{4}{3} \cdot \frac{(F + mg)}{100\pi} \leq 49.65$$

ค่า F สูงสุดที่ใช้คือ 100 นิวตัน น้ำหนักคนสูงสุดที่ใช้คือ 50 นิวตัน จะได้ $0.6366 \leq 49.65$

จากค่าความเค้นเฉือนที่คำนวณได้ ปรากฏว่ามีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นเฉือนของวัสดุ ดังนั้นถือว่าแขนจับที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน C1020 สามารถทนแรงกด 100 นิวตัน และรับน้ำหนักจากตัวคน 50 นิวตัน

- ความโค้งของคาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์สูงสุด

$$M = -FL$$

ค่าความลาดชัน

$$\theta = \frac{FL^2}{2EI}$$

สมการการโก่ง

$$Ely = \frac{Fx^2}{6}(3L - x)$$

ระยะโก่งสูงสุด

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI}$$

จากการออกแบบแขนจับ โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอน C1020 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm. ยาว 350 mm. ซึ่งมีแรงกด $F = 100 \text{ N}$ จะได้ว่า

โมเมนต์สูงสุด

$$M = -100 \times 350$$

$$M = -135,000 \text{ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร}$$

ค่าความลาดชัน

$$\theta = \frac{FL^2}{2EI}$$

$$\theta = \frac{100 \times 350^2}{2 \times 207 \times 10^3 \times 2500\pi}$$

$$\theta = 3.7674 \times 10^{-3}$$

สมการการโก่ง

$$Ely = \frac{Fx^2}{6}(3L - x)$$

$$Ely = \frac{100x^2}{6}(3 \times 350 - x)$$

$$Ely = \frac{52,500x^2}{3} - \frac{50x^3}{3}$$

ระยะโก่งสูงสุด

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI}$$

$$\delta = \frac{100 \times 350^3}{3 \times 207 \times 10^3 \times 2500\pi}$$

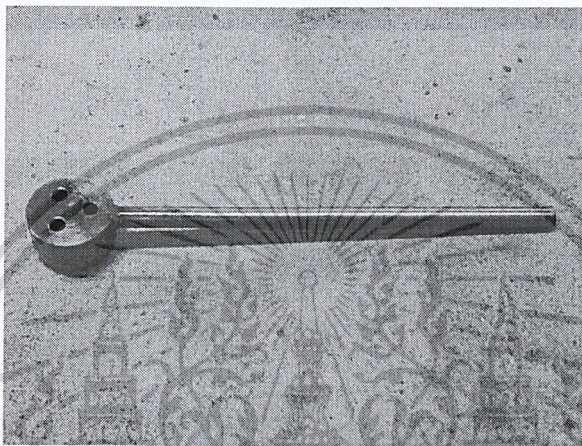
$$\delta = 0.8791 \text{ มิลลิเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ โมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้น $135,000$ นิวตัน/มิลลิเมตร² ค่าความลาดชัน 3.7674×10^{-3} เกิดระยะ โถ่งสูงสุด 0.8791 มิลลิเมตร และมีสมการโถ่ง $EIy = \frac{52,500x^2}{3} - \frac{50x^3}{3}$

3.4.3 การติดตั้งแกนคาน้ำหนัก

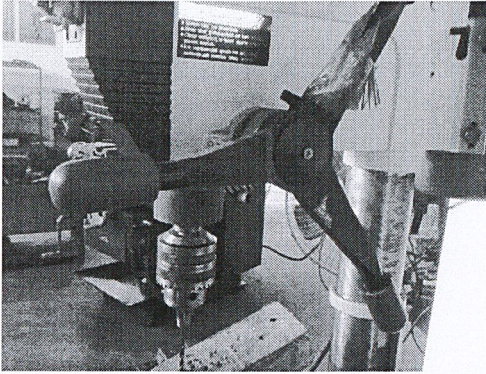
เมื่อทำการออกแบบแกนคาน้ำหนักเสร็จแล้ว จึงทำการสร้างแกนคาน้ำหนัก ตามที่ได้ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.28



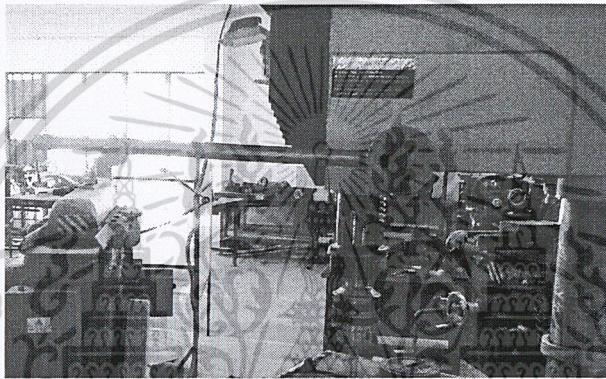
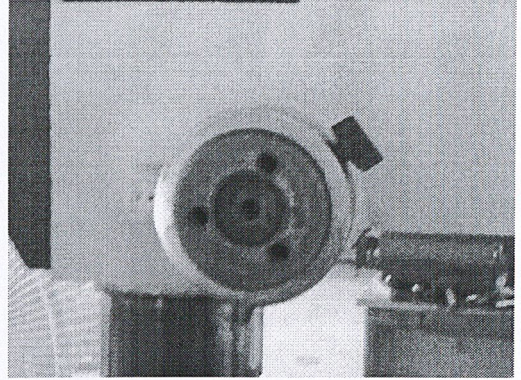
รูปที่ 3.28 แกนคาน้ำหนักที่สร้างเสร็จแล้ว

นำแกนคาน้ำหนักที่ทำเสร็จแล้วมาติดตั้งกับเครื่องเจาะ โดยใช้จุด handle เพื่อเป็นตำแหน่งยึดจับกับตัวเครื่องเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



+

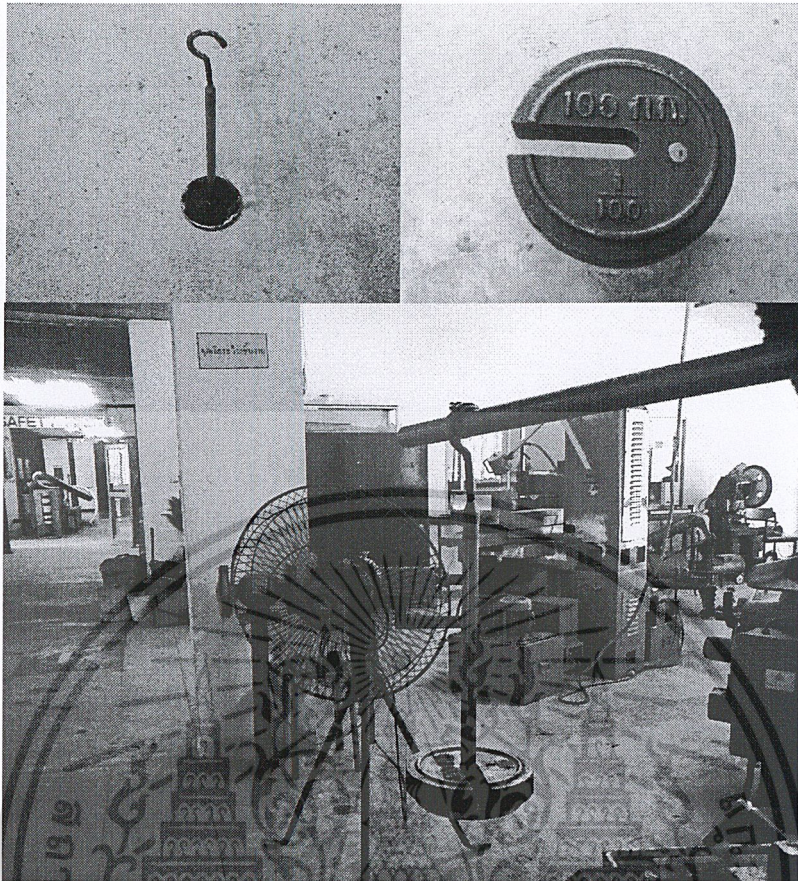


รูปที่ 3.29 แขนกค้ำน้ำหนักที่ทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว

3.4.4 ความสัมพันธ์ของแรงกดที่วัดได้กับขนาดของตุ้มน้ำหนัก

เมื่อติดตั้งแขนคค้ำน้ำหนักเสร็จแล้ว เตรียมที่แขวนตุ้มน้ำหนักที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 0.733 กิโลกรัม ตุ้มน้ำหนักขนาด 1 กิโลกรัม ไม้จำนวน 5 ลูก และเครื่องชั่งน้ำหนัก เพื่อใช้ในการวัดแรงกดโดยติดตั้งที่แท่นเจาะส่วน จากนั้นนำชุดที่แขวนลูกตุ้มน้ำหนักไปแขวนไว้ที่ตำแหน่ง ต่างๆบนแกนหมุน แล้วนำที่ชั่งน้ำหนักมาวาง ดังแสดงในรูปที่ 3.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 การนำชุดที่แขวนลูกตุ้มน้ำหนัก ไปแขวนไว้ที่ตำแหน่ง ต่างๆบนแกนหมุน

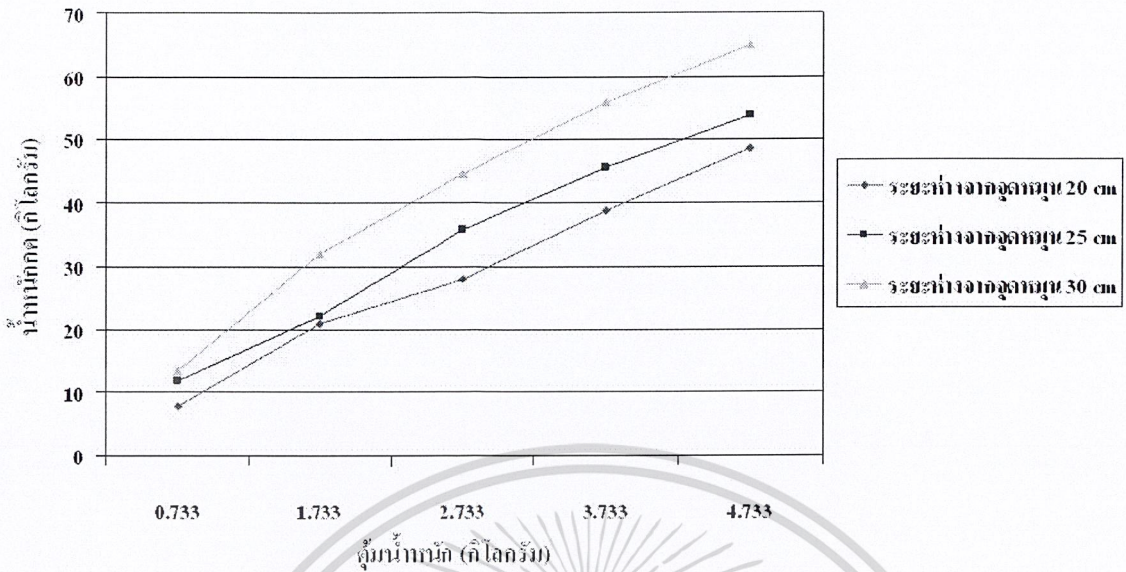
แล้วนำที่ชั่งน้ำหนักมาวาง ทำการวัดแรงกดที่ได้จากการแขวนตุ้มน้ำหนักที่ตำแหน่งต่างๆ บนแกนหมุน ได้ ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ข้อมูลจากการวัดแรงกด

น้ำหนัก ลูกตุ้ม (กิโล กรัม)	น้ำหนักกดที่วัดได้เมื่อแขวนตุ้มน้ำหนัก ณ ตำแหน่งต่างๆ บนแกนหมุน (กิโลกรัม)											
	20 เซนติเมตร				25 เซนติเมตร				30 เซนติเมตร			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0.733	7.0	8.5	8.0	7.83	11.0	12.0	12.5	11.83	13.5	13	14	13.5
1.733	20.0	21.0	22.0	21	21.5	22.0	23.0	22.17	32.0	31.5	32.5	32
2.733	28.5	28.0	27.5	28	35.5	36.5	35.5	35.83	45.5	44.0	44.5	44.67
3.733	39.0	38.5	39.0	38.83	46.0	45.5	45.5	45.67	56.0	55.5	56.5	56
4.733	48.5	49.5	48.0	48.67	53.0	54.0	54.5	53.83	65.5	64.5	65.0	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของตุ้มแขวนกับแรงกดของชิ้นงาน

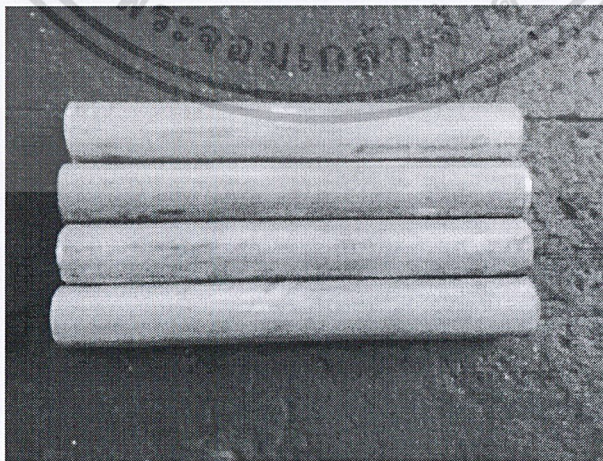
3.4.5 ขั้นตอนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ขั้นตอนที่ 1 ทำการสั่งซื้ออะลูมิเนียม (AI 6061) จากบริษัท TOZZHIN INTERNATIONAL CORPORATIONAL มีขนาดดังนี้

- ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 6000 มิลลิเมตร
- แผ่นขนาดกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 1500 มิลลิเมตรหนา 10 มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 2 ทำการตัดอะลูมิเนียม ให้ได้ชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อม มีขนาดดังนี้

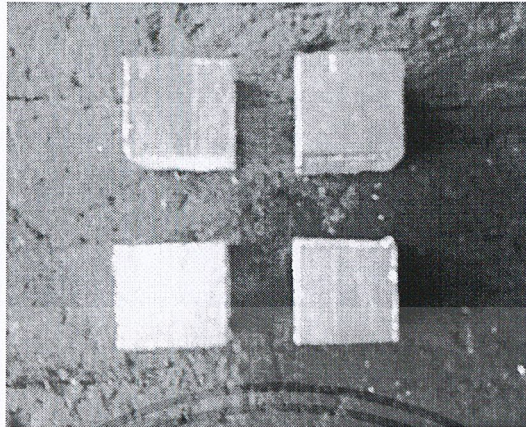
- ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.32 ชิ้นงานอะลูมิเนียมทรงกระบอก

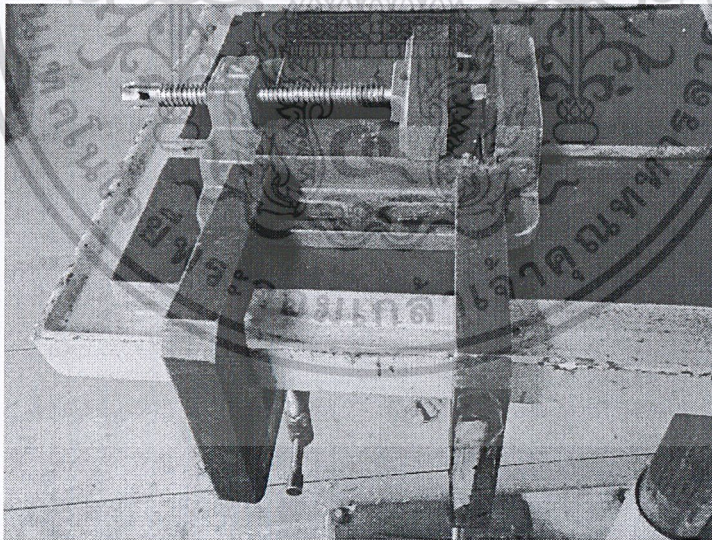
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แผ่นขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตรหนา 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.33 ชิ้นงานอลูมิเนียมสี่เหลี่ยมจตุรัส

ขั้นตอนที่ 3 ทำความสะอาดคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกต่างๆด้วยผงซักฟอกจากนั้นเช็ดบริเวณชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดออกไซด์
ขั้นตอนที่ 4 นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้ว 2 ชิ้นไปจับยึดกับเครื่องเจาะเครื่องหมายการค้า BOYE รุ่น ZJ 5132 และ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

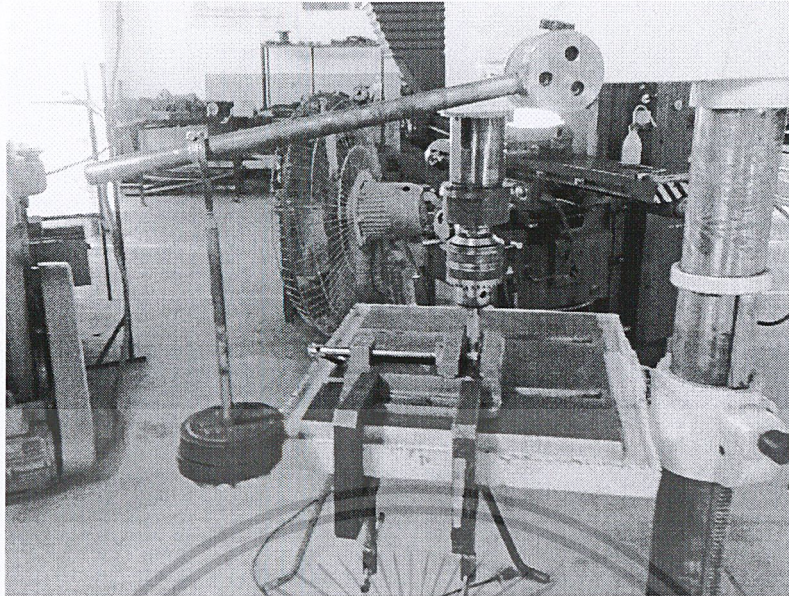


รูปที่ 3.34 ชิ้นงานอลูมิเนียมติดตั้งกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดค่าของตัวแปรในการเชื่อมตามที่ได้ออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนที่ 6 ทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานโดยใช้เครื่องเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 การเชื่อมแบบแรงเสียดทานกับชิ้นงานอลูมิเนียม

3.5 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปทำความสะอาดเช็ดคราบน้ำมันและเศษอลูมิเนียม โดยนำไปเป่าด้วยลมหลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบเครื่องหมายการค้า SCHENCK รุ่น RM 100 ด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที บันทึกผลการทดลอง

3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลแสดงความสัมพันธ์ต่อปัจจัยในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

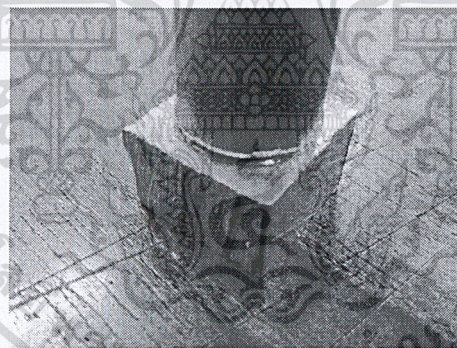
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

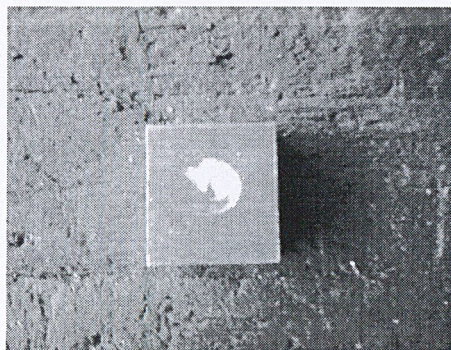
ในการวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน (Friction Welding) การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมได้แก่ น้ำหนักกดเสียดทาน (Friction Weight) น้ำหนักกดอยู่ (Upset Weight) ความเร็วรอบ (Speed) และ เวลาที่ใช้ในการกด (Time) ซึ่งในการเชื่อมนั้นจะกระทำตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบในการทดลองจนครบ 16 ชิ้น และนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ

4.1 ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม

หลังจากการเชื่อมอลูมิเนียม 6061 ด้วยเครื่องเชื่อมแบบแรงเสียดทานด้วยการกำหนดค่าน้ำหนักกดเสียดทาน (Friction Weight) ค่าน้ำหนักกดอยู่ (Upset Weight) ความเร็วรอบ (Speed) และเวลาที่ใช้ในการกด (Time) จะพบว่าลักษณะภายนอกของงานเชื่อมไม่มีรอยเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรอยเชื่อมติดกันไม่เต็มพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ลักษณะของรอยเชื่อมที่ไม่มีรอยเชื่อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 4.2 รอยเชื่อมของชิ้นงานที่ติดกันไม่เต็มพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานอลูมิเนียมทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบค่าความต้านแรงดึง

นำชิ้นงานเชื่อมที่ได้จากการทดลองไปทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย				ค่าความต้านทานแรงดึง (กิโลนิวตัน)
	น้ำหนักกดเสียตทาน (กิโลกรัม)	น้ำหนักกดอยู่ (กิโลกรัม)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	เวลาที่ใช้ในการกด (วินาที)	
1	45	65	1874	15	0.282
2	45	65	1874	20	0.114
3	45	65	2613.5	15	0.553
4	45	65	2613.5	20	0.977
5	45	75	1874	15	0.146
6	45	75	1874	20	0.193
7	45	75	2613.5	15	0.384
8	45	75	2613.5	20	1.224
9	56	65	1874	15	0.997
10	56	65	1874	20	0.598
11	56	65	2613.5	15	0.506
12	56	65	2613.5	20	1.082
13	56	75	1874	15	1.586
14	56	75	1874	20	0.467
15	56	75	2613.5	15	0.550
16	56	75	2613.5	20	0.327

4.3 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab โดยเลือกการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล (Factorial Designs) ในตัวแบบของ Two-Level Full Factorial ซึ่งการทดลอง ทุกๆปัจจัย จะมีค่าระดับเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น การทดลองแต่ละรัน จะมีทุกๆค่าระดับของทุกๆปัจจัย ถึงแม้ว่าตัวแบบ Two-Level Full Factorial จะไม่สามารถทำการทดลองที่ปัจจัยย่าน (Range) กว้างๆ ได้ แต่ก็สามารถให้สาระข้อมูลที่มีประโยชน์ได้ โดยที่จำนวนรันไม่มากนักต่อหนึ่งปัจจัย และเพราะว่า Two-Level Full Factorial สามารถที่จะแสดงค่าแนวโน้มได้ จึงสามารถนำมาใช้เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการสร้างการทดลองต่อไป ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ขั้นตอนการสร้างการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs) ในตัวแบบของ Two-Level Full Factorial

- กำหนดปัจจัยที่จะทำการศึกษา (Number of Factors) ได้แก่ ค่าน้ำหนักกดเสียดทาน (Friction Weight) ค่าน้ำหนักกดอยู่ (Upset Weight) ค่าความเร็วรอบ (Speed) เวลาที่ใช้ในการกด (Time) และค่าตอบสนองคือ ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Test)
- กำหนดตัวแปร (Factors) และค่าตอบสนอง (Response) ลงใน โปรแกรม Minitab โดยกำหนดปัจจัยและตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการกำหนดตัวแปรลงใน โปรแกรม Minitab

ปัจจัย	ตัวแปร
ค่าน้ำหนักกดเสียดทาน (Friction Weight)	A
น้ำหนักกดอยู่ (Upset Weight)	B
ค่าความเร็วรอบ (Speed)	C
เวลาที่ใช้ในการกด (Time)	D

- กำหนดค่าสูง-ต่ำ ของแต่ละปัจจัย กำหนดค่านัยสำคัญ (Alpha) เท่ากับ 0.05 เลือกจำนวนพจน์สูงสุดที่ต้องการให้รวมในตัวแบบเท่ากับ 2 และทำการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย

4.3.2 ผลการทดลอง

เมื่อทำการกำหนดค่าต่างๆ เรียบร้อยแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงด้วยการกำหนดให้แสดงผลในตารางที่ 4.3 ของกราฟ Effect แบบ Normal Probability Plot ซึ่งจะแสดงถึงค่า Effect ค่า Coef ค่า SE Coef ค่า T และค่า P ของแต่ละปัจจัย

จากตาราง ANOVA แสดงให้เห็นว่าค่า P-Value อิทธิพลร่วม (Interaction effects) ของแรงกดเสียดทาน (Friction Force) กับความเร็วรอบ (Speed) มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่เรากำหนดไว้คือ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 Factorial Fit : Tensile Versus Friction, Upset, Speed, Time

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.6241	0.1750	35.66	0.018
Friction	0.2800	0.1400	0.1750	8.00	0.079
Upset	-0.0290	-0.0145	0.1750	-0.83	0.560
Speed	0.1525	0.0762	0.1750	4.36	0.144
Time	-0.0027	-0.0014	0.1750	-0.08	0.950
Friction*Upset	-0.0343	-0.0171	0.1750	-0.98	0.507
Friction*Speed	-0.4482	-0.2241	0.1750	-12.81	0.050
Friction*Time	-0.2885	-0.1442	0.1750	-8.24	0.077
Upset*Speed	-0.1293	-0.0646	0.1750	-3.69	0.168
Upset*Time	-0.1110	-0.0555	0.1750	-3.17	0.194
Speed*Time	0.4070	0.2035	0.1750	11.63	0.055
Friction*Upset*Speed	-0.1630	-0.0815	0.1750	-4.66	0.135
Friction*Upset*Time	-0.2688	-0.1344	0.1750	-7.68	0.082
Friction*Speed*Time	0.0608	0.0304	0.1750	1.74	0.333
Upset*Speed*Time	0.0152	0.0076	0.1750	0.44	0.738

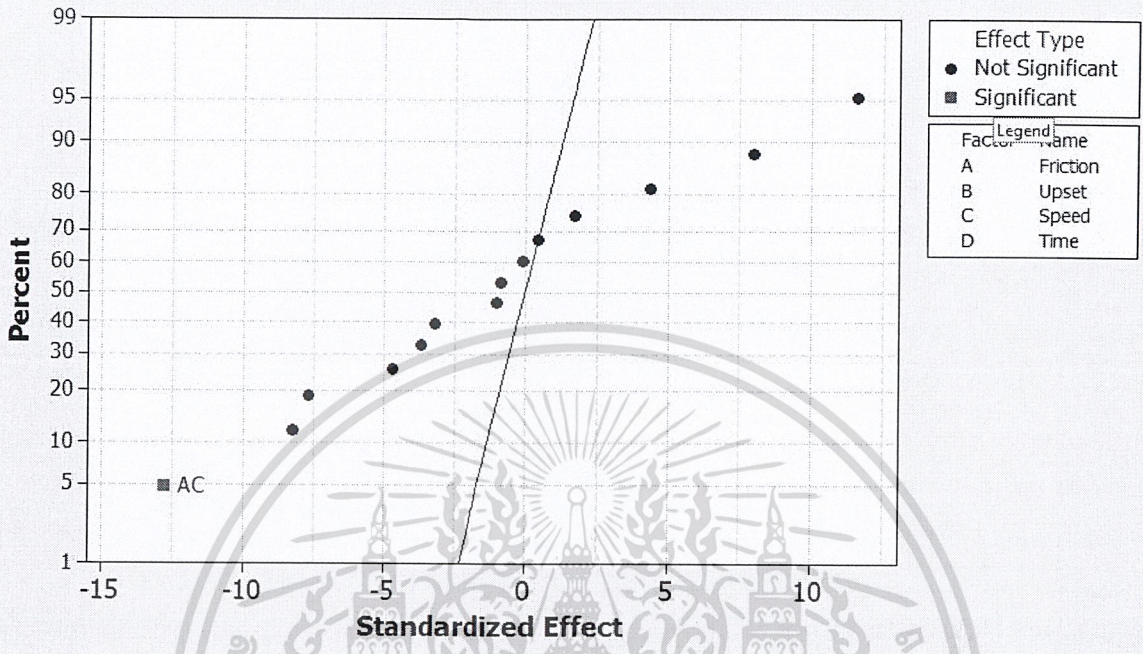
จากตาราง ANOVA แสดงให้เห็นว่าค่า P-Value อิทธิพลร่วม (Interaction effects) ของค่าน้ำหนักกดเสียดทาน (Friction Weight) กับความเร็วรอบ (Speed) มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่เรากำหนดไว้คือ 0.05

เมื่อนำผลการทดลอง ไปวิเคราะห์กราฟแบบ Normal Plot of the Standardized Effects โดยมีค่าตอบสนองคือ ค่าทดสอบแรงดึง มีค่านัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Normal Plot of the Standardized Effects

(response is Tensile, Alpha = 0.05)



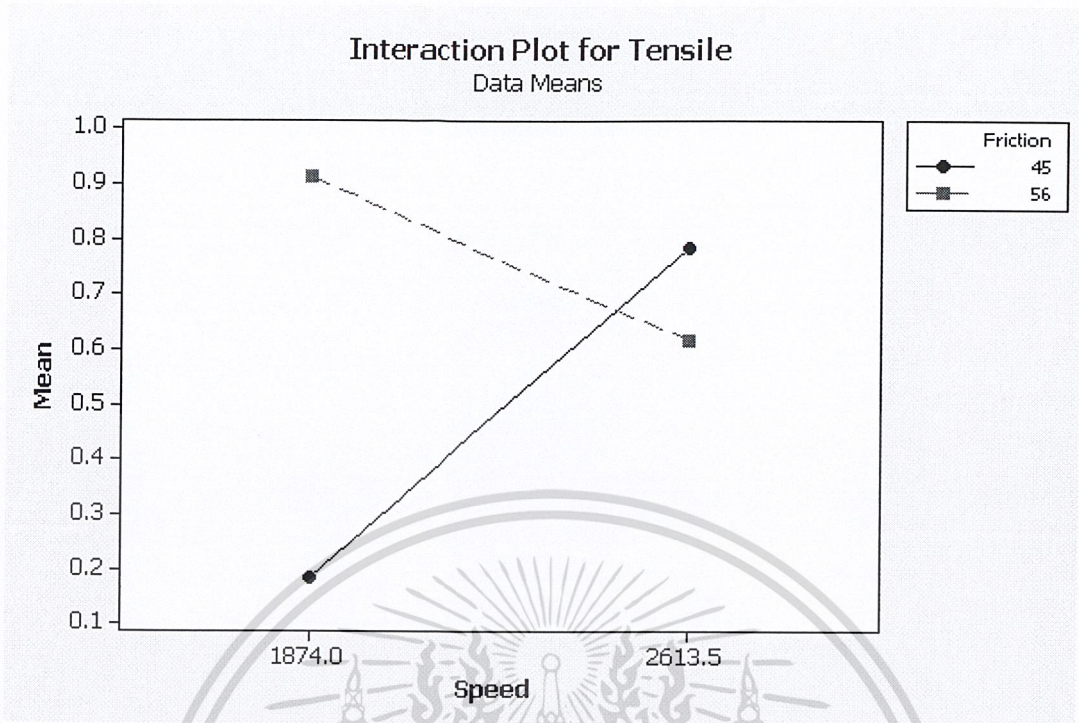
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์กราฟแบบ Normal Plot ของโปรแกรม Minitab

Normal Probability Plot ของค่า Effects ใดๆ เมื่อค่า Effects ไม่อยู่ใกล้เคียงเส้นตรงในกราฟให้ถือว่า Effects นั้น มีความสำคัญซึ่งมักจะเป็น Effects ที่มีขนาดใหญ่และไม่ใกล้เคียงกับเส้นตรง ส่วน Effects ที่ไม่มีความสำคัญจะมีขนาดเล็กหรืออยู่ใกล้ค่าศูนย์ ซึ่งมักจะอยู่ใกล้เส้นตรงกราฟ จึงสามารถระบุว่า Effects ที่มีความสำคัญ คือ ค่าน้ำหนักกดเสียดทาน (A) ค่าความเร็วรอบ (C) และปัจจัยร่วมของค่าน้ำหนักกดเสียดทานกับค่าความเร็วรอบ (AC) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

แสดงว่าการควบคุมปัจจัยหลักคือ ค่าน้ำหนักกดเสียดทาน (Friction Weight) ความเร็วรอบ (Speed) และปัจจัยร่วมระหว่างค่าน้ำหนักกดเสียดทานกับความเร็วรอบ มีความสำคัญต่อค่าความต้านทานแรงดึงในการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย Normal Probability Plot จะได้ปัจจัยที่มีอิทธิพล เพื่อหาความสัมพันธ์ในแฟคทอเรียลพล็อต (Factorial Plot) โดยนำข้อมูลไปวิเคราะห์กราฟแบบ Interaction Plot for Tensile ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลของความสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญด้วยแฟคทอเรียลพล็อต (Factorial Plot)

จากผลของแฟคทอเรียลพล็อต (Factorial Plot) พบว่าที่ความเร็วรอบ (Speed) 1874 รอบต่อนาที จะให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ที่ค่าน้ำหนักกดเสียดทานเท่ากับ 56 กิโลกรัม และที่ความเร็วรอบ 2613.5 รอบต่อนาที จะให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ค่าน้ำหนักกดเสียดทานเท่ากับ 45 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกลของรอยต่อ โลหะของอลูมิเนียม 6061 ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ค่าน้ำหนักกดเสียดทาน (Friction Weight) ค่าน้ำหนักยก (Upset Weight) ความเร็วรอบ (Speed) และเวลาที่ใช้ในการกด (Time) โดยแต่ละปัจจัยมีสองระดับคือ ระดับสูงและระดับต่ำ

5.1 สรุปอภิปรายผล

1. เครื่องเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่ได้จากการดัดแปลงเครื่องเจาะไฟฟ้าสามารถใช้ในการเชื่อมต่อโลหะประเภทอลูมิเนียม 6061 ที่มีลักษณะชิ้นงานแบบแผ่นและแท่งได้
2. ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทานสามารถแบ่งออกเป็นปัจจัยหลักคือ ค่าน้ำหนักกดเสียดทาน (Friction Weight) ความเร็วรอบในการหมุน (Speed) และปัจจัยร่วมคือ ค่าน้ำหนักกดเสียดทานกับความเร็วรอบในการหมุน
3. ความสัมพันธ์ของปัจจัยร่วมเป็นแบบแปรผกผัน คือ ความเร็วรอบ (Speed) 1874 รอบต่อนาที จะให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่น้ำหนักกดเสียดทานเท่ากับ 56 กิโลกรัม และที่ความเร็วรอบ 2613.5 รอบต่อนาที จะให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่น้ำหนักกดเสียดทานเท่ากับ 45 กิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมแบบแรงเสียดทานที่ประดิษฐ์ขึ้น เช่น เพิ่มกำลังในการหมุนของมอเตอร์ ความมั่นคงหรือความนิ่งของแกนหมุนเพื่อป้องกันการเชื่อมชิ้นงานที่บิดเบี้ยว เพื่อเป็นกรดระยะเวลาในการเชื่อมลงและเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมให้ดียิ่งขึ้น
2. ควรมีการทดลองเชื่อมต่อไปในวัสดุที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน
3. ควรนำปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทานมาทำการทดลองซ้ำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น
4. ในขณะที่ทำการเชื่อม ควรตรวจสอบให้ความเร็วรอบของเครื่องเจาะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. เขก ทองอุ่น. “กระบวนการเชื่อมโลหะ” ใน คู่มือการเชื่อมโลหะของโอบาร์ท. หน้า 180-182. กรุงเทพฯ: วิทยาลัยครู อาชีวศึกษา, 2513.
2. Merritech. **Friction welding process** [Online]. Available: <http://www.meritech.com/products/fw/fw-proc.html> [2010, September 2].
3. W.M.Thomas, P.L.Threadgill and E.D.Nickolas. **Friction Stir Welding of Steel** [Online]. Available: <http://www.keyto metals.com page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=PT&NM=219> [2010, September 2].
4. Philip Threadgill. **Linear friction welding** [Online]. Available: <http://www.twi.co.uk/content/ksplt001.html> [2010, September 2].
5. Richard Johnson and Stephan Kallee (2002, Jan 7). **Friction Stir Welding** [Online]. Available: <http://www.azom.com /details.asp?ArticleID=1170> [2010, September 2].
6. CSInet Internet Access Corp. **Direct Drive** [Online]. Available: <http://www.ifweld.com/about/process/direct drive.php> [2010, September 2].
7. CSInet Internet Access Corp. **Inertia** [Online]. Available: <http://www.ifweld.com/about/process/inertia.php> [2010, September 2].
8. CSInet Internet Access Corp. **Hybrid** [Online]. Available: <http://www.ifweld.com/about/process/hybrid> [2010, September 2].
9. อาจารย์ประมุข แยมบุญชู. งานเชื่อมและงานโลหะแผ่น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์เอมพันธ์ จำกัด, 2543.
10. ดร. ฐาปนีย์ อุดมผล. **Intro to Nonferrous Metallurgy** [Online]. Available: http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/Nonferrous/01_Introduction%20to%20nonferrous%20metallurgy.pdf [2010, September 9].
11. ดร. ฐาปนีย์ อุดมผล. **Aluminium and Aluminum Alloys** [Online]. Available: http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/Nonferrous/02_Aluminium%20and%20aluminium%20alloy.pdf [2010, September 9].
12. ณีรัฐฉลิ ถมจอหอ และคณะ. **Aluminium Alloys** [Online]. Available: http://www.aluminiumlearning.com/html/index_introduction.html [2010, September 9].
13. ณีรัฐฉลิ ถมจอหอ และคณะ. **อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนหมายเลข 6061** [Online]. Available:http://www.aluminiumlearning.com/html/index_w6xxx.html [2010, September 9].
14. มนต์ สติวจินดา. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. สันติรัฐ นันสะอาง, 2545, **Aluminum leaning** [Online], Available: [http://www. AluminumLeaning.com](http://www.AluminumLeaning.com) [2010, September 9].
16. รศ.แม่นัน อมรสิทธิ และผศ.ดร.สมชัย อัครทิวา. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ:บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2545.
17. ธนัชร ไชยอารีย์. การทดสอบความแข็ง [Online]. Available: [http://e-book.ram.edu/ebook/m/MY318\(51\)/MY318-7.pdf](http://e-book.ram.edu/ebook/m/MY318(51)/MY318-7.pdf) [2010, September 9].
18. Solution Center “Design of Experiments” ใน คู่มือการใช้ **Minitab**. หน้า 11-20. กรุงเทพฯ.
19. บริษัท เมเซอร์ วัน เทคโนโลยี จำกัด. เครื่องมือวัดความเร็วรอบ [Online]. Available: http://measure1.tarad.com/product_139472_th [2011, February 7].



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



西南铝

产品质量证明书

PRODUCT QUALITY CERTIFICATE

Serial No: 00443201006000790

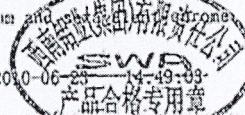
订货单位 Customer		OKAYA SINGAPORE PTE LTD											
合同号 Contract No		140016653 SWA10-0829-002-01											
产品名称 Product	批号 Lot No	合金状态 Alloy And Temper				规格(mm) Dimension			精度(级) Precision(Grade)				
棒材	A490421	6061T6				Φ 12.700			普通级				
产品标准符合 Product Standard				化学成分标准符合 Composition Standard				高倍 Microstructure		低倍 Macrostructure			
Q/BL325-98				GB/T3190-1996				—		合格			
化学成分 Chemical Composition													
熔炼号 Melt No	元素 Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Tl	—	Al	
	标准值 Standard Value	0.40-0.80	≤0.70	0.15-0.30	≤0.15	0.80-1.20	0.04-0.35	—	≤0.25	≤0.15	—	余量	
A033499	实测值 Actual Value	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Remainder	
力学性能 Mechanical Properties													
状态 Temper	取样方法 Sampling Method		抗拉强度(MPa) Tensile Strength			屈服强度(MPa) Yield Strength		延伸率(%) Elongation		硬度 Hardness			
T6	纵向		标准值 Standard Value ≥280.000			标准值 Standard Value ≥245.000		标准值 Standard Value ≥9.000		—			
			实测值 Actual Value 280-290			实测值 Actual Value 240-270		实测值 Actual Value 18.0-19.5		—			
			标准值 Standard Value —			标准值 Standard Value —		标准值 Standard Value —		—			
			实测值 Actual Value —			实测值 Actual Value —		实测值 Actual Value —		—			
项目 Item	高温持久 Hyperthermia Lasting		电导率 Conductance		氢含量(ml/100gAl) Hydrogen Content		超声波探伤 Ultrasonic		其他探伤项目 Other Test Item				
标准值 Standard Value	—		—		—		—		合格				
实测值 Actual Value	—		—		—		—		合格				
箱/捆数 Box/Bundle Quantity		捆数 Quantity		重量(Kg) Weight		(小写) Small		472.000					
1		0.000		—		(大写) Capital		肆佰柒拾贰					
表面质量 Surface Control		合格		几何尺寸 Dimension Control				合格					
备注 Note													

质量、环境、职业健康安全分别通过ISO9001、ISO14001、GB/T28001管理体系认证。本产品的铅、汞、六价铬的含量均符合欧盟ROHS指令2005/618/EC的要求，≤1000PPm。

Quality, Environment and Professional Health & Safety Management System have Certified as per ISO9001, ISO14001 and GB/T28001. Content of Plumbum, Hydrargyrum, Cadium and Hexavalent Chromium conforms to ROHS 2005/618/EC, arsenic is less than 1000PPm.

检查员: JY-KUANGUP
Inspector

日期: 2010-06-29 14:49:09
Date: 产品合格专用章



西南铝业(集团)有限责任公司
电话 8008109915 查询网址

SOUTHWEST ALUMINIUM (GROUP) CO., LTD.

SWA4090710057115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Certificate of Inspection and Conformance

S/N:1002850392-1-1



Alcoa Korea, Ltd.
Changwon Precision Extrusions

54, Sungju-Dong, Changwon-City,
Kyungnam, Korea (Zip:640-120)
Tel. : 82 55 269 9500
Fax. : 82 55 269 9501

Customer	Tozbin International Corporation Co., Ltd.	Cust. Part Name	DIA15.875 (ORG.)
Cust. PO No.	PO100100008	Cust. Item No.	N/A
Final User PO No.	N/A	Alloy & Temper	6013-T6
Cust. Serial No.	No	Part No.	N/A
Material Type	As Extruded	Lot(Heat) No.	H0036-0110-01A,01B

Length	3000 mm	Bundle No.	1	SHT Lot No.	01A	Part Q'ty	162 EA	Net Weight	261 KG
				SHT Lot No.	01B	Part Q'ty	162 EA	Net Weight	261 KG

Chemical Composition										Unit: wt%	
Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others		
									Each	Total	
Requirement	0.600	0.500	0.600	0.200	0.300	0.100	0.250	0.100	0.05	0.15	
Billet Lot No	~1.000	max.	~1.100	~0.300	~1.200	max.	max.	max.	max.	max.	
G1135	0.692	0.118	0.808	0.299	0.935	0.001	0.002	0.029	OK	OK	

Mechanical Properties											*0.2percent offset method	
Temper of Test	UTS(ksi)		TYS(ksi)*		EL(%)		Hardness		EC(%ACS)			
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.		
Requirement	Ref.		Ref.		Ref.							
01A	59.2	—	55.8	—	18.0	—	N/A	N/A	N/A	N/A		
01B	57.3	—	53.8	—	17.0	—	N/A	N/A	N/A	N/A		

Comments

1. Neither mercury nor any of its compounds are used in the manufacturing of our extrusions or rod and bar.

Customer Requirement if necessary			
Dimension	Macro Structure	Ultrasonic Test	Surface Roughness
Passed	Passed	N/A	N/A

Applicable Specification	We hereby certify that the material covered by this report has been inspected in accordance with, and has been found to meet, the applicable requirements described herein, including any specifications forming a part of the description and that the samples representative of the material met composition limits and had the mechanical properties shown on the face of this sheet.
Specification No. Revision Amendment	

Signed Chu Haeng-Jin Quality Assurance Manager
 For and on behalf of ALCOA CPE Date: Mar. 19, 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



西南铝®

产品质量证明书

PRODUCT QUALITY CERTIFICATE



Serial No: 0022320091000060

订货单位 Customer																
合同号 Contract No		140014617 SWA09-0829-005-06			产品名称 Product			预拉伸板			批号 Lot No		92M3679			
合金状态 Alloy And Temper		6061T651			规格(mm) Dimension			10.000 * 1219.2 * 2438.4			箱数 Box Count		2			
技术标准 Technique Standard					Q/SWA10204-2003					片数 Quantity		25,000				
化学成分标准 Chemical Composition Standard					GB/T3100-1996					重量(kg) Weight		2,170,000				
机械性能 Mechanical Property																
状态 Temper		取样方法 Sampling Method		抗张强度(MPa) Tensile Strength			屈服强度(MPa) Yield Strength			延伸率(%) Elongation						
				标准值 Standard Value	实测值 Actual Value		标准值 Standard Value	实测值 Actual Value		标准值 Standard Value		实测值 Actual Value				
T651		横向		≥290	300-305		≥240.000	250-270		≥10.000		19-21.5				
弯曲 Curve						超声波 Ultrasonic				合格						
化学成分 Chemical Composition																
熔炼号 Melt No	元素 Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	—	—	Al			
	标准值 Standard Value	0.40-0.80	≤0.70	0.15-0.40	≤0.15	0.80-1.20	0.04-0.35	—	≤0.25	≤0.15	—	—	余量			
9050961	实测值 Actual Value	0.59	0.3	0.22	0.01	1.0	0.18	0.01	0.07	0.01	—	—	Remainder			
包覆层厚度 Adhesion		晶粒度 Ultrasonic		杯突 Cup Bulge		硬度 Hardness		电导率 Conductance								
标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value	标准值 Standard Value	实测值 Actual Value			
高倍 Microstructure	合格	低倍 Macrostructure	合格	氢含量(ml/100gAl) Hydrogen Content		标准值 Standard Value		—								
表面质量 Surface Control	合格	几何尺寸 Dimension Control		合格		实测值 Actual Value		—								
备注 Note																

质量、环境、职业健康安全分别通过ISO9001、ISO14001、GB/T28001管理体系认证。
Quality, Environment and Professional Health & Safety Management System have Certified as per ISO9001, ISO14001 and GB/T28001.

检查员: YY-TUYH
Inspector:

日期: 2009-10-08 09:31:02
Date



西南铝业(集团)有限责任公司
SOUTHWEST ALUMINIUM (GROUP) CO., LTD.

制涂层线 95105615 成克
电话 8008109915 查询真伪
SWA2080501066463

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้