

อิทธิพลของการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็ก AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทาน

**THE INFLUENCE OF THE ANNEALING EFFECT ON THE AISI
1045 STEEL BY FRICTION WELDING**

จักรินทร์ คงสิบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็ก AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทาน

จักรินทร์ คงสิบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อธิปไตยของการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็ก AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทาน
ชื่อ – นามสกุล นายจักรินทร์ คงสิบ
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อ

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding) เป็นการเชื่อมอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเพิ่มมากขึ้นในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ไม่ต้องการตัวประสานในการเชื่อม ไม่เกิดควัน รอยเชื่อมมีคุณภาพดีเสมอเต็มหน้า ไม่มีรูพรุน ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น เป็นต้น แต่เนื่องจากขณะเชื่อมเกิดความร้อนสูงขึ้นบริเวณรอยเชื่อม จึงส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กบริเวณรอยเชื่อมซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กคาร์บอนปานกลาง(AISI1045) ที่ผ่านการอบอ่อน (Annealing) และทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เหล็กหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร จำนวน 720 ชิ้น ภายใต้เงื่อนไขการเชื่อมคือ แรงดันในการอัด 20, 30 และ 40 บาร์ เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที อุณหภูมิในการอบอ่อน 790, 850 และ 970 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที เมื่อเชื่อมเสร็จได้นำชิ้นงานเชื่อมไปทดสอบความแข็ง ทดสอบแรงดึง และองค์ประกอบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยเชื่อม

การเชื่อมชิ้นงานด้วยแรงเสียดทานระหว่างอุณหภูมิปกติของชิ้นงานและการนำชิ้นงานไปทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันพบว่าที่อุณหภูมิปกติของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมชิ้นงานค่าแรงดึงมีค่าสูงกว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อน แต่ค่าความแข็งของรอยเชื่อมชิ้นงานที่อุณหภูมิปกติของรอยเชื่อมจะมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคพบว่าเกรนของเหล็กที่บริเวณรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนมีเกรนที่ละเอียดมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนจึงส่งผลทำโครงสร้างมีความแข็งมากกว่า

คำสำคัญ : การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน, การอบอ่อน, เหล็กคาร์บอนปานกลาง

Thesis Title: The influence of the annealing effect on the AISI 1045 steel by friction welding
Name – Surname: Mr.Jakkarin Kongsib
Program: Manufacturing Engineering
Thesis Advisor: Assistant Professor SirichaiTorsakul, Dr.-Ing.
Academic Year: 2012

ABSTRACT

Friction Welding is one of methods that becomes increasingly popular in industrial since it has many benefits such as no need for flux in welding, no fume generated, providing good quality welding joint with even surface not porous, taking short time for welding etc. However, because of high heat that is generated during welding at welding joints, it leads to the change of the micro structure of steel at welding joints which directly affects the mechanical properties of work pieces.

The objective of this research was to study characteristics of the micro structure of medium carbon steel (AISI1045) which had been processed by annealing and friction welding. 720 pieces of circular cross-section steel with 10 millimeter diameter, 100 millimeter length were used under the welding condition that the pressure of compression were 20, 30 and 40 bars, compressing times were 2, 3 and 4 seconds, annealing temperature were 790, 850 and 970 degree Celsius, its speed was 1,800 rpm. After the welding was finished, the work pieces were tested for their hardness, tension and elements of micro structure at welding joints.

With the comparison of friction welding of work pieces in normal temperature and annealing of work pieces in different temperature, it was found that tension was higher at normal temperature of work pieces after welding than work pieces with annealing, however, the hardness value of welding joints on work pieces at normal temperature was less than work pieces with annealing. For the micro structure, it was found that steel grain at joints of annealed work pieces was more dedicate than work pieces without annealing which therefore affected to be stronger structure.

Keywords : friction welding, annealing, medium carbon steel

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร. วิฑูร อุทัยแสงสุข ดร. ชัยยะ ประณีตพลกรัง และดร. กุลชาติ จุลเพ็ญ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ ในการวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อปรับปรุง อย่างมีคุณค่าอนันต์

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และแนะนำแนวทางการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงตามกำหนด

จักรินทร์ คงสิบ

22 กรกฎาคม 2555



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 แนวคิดหรือที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 กระบวนการเชื่อม.....	6
2.3 การเชื่อมแบบเสียดทาน.....	10
2.4 ไฮดรอลิก.....	15
2.5 โลหะที่ใช้ในการทดสอบ.....	21
2.6 กระบวนการเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุ.....	28
2.7 การตรวจสอบวัสดุทางโลหะวิทยา.....	35
2.8 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึง.....	39
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	51
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	51
3.2 การออกแบบ/เครื่องมือ.....	52
3.3 ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานทดสอบ/ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	54
3.4 วิธีการทดสอบ/วิธีการวัดผล.....	62

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์.....	68
4.1 ผลการวิจัย	68
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	80
5 สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ	103
5.1 สรุปผลการทำโครงการ	103
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินโครงการ.....	104
5.3 ข้อเสนอแนะในการทดลอง	104
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก ภาคผนวก ก ผลการทำ Pre-Test.....	107
ภาคผนวก ข ภาคผนวก ข ผลการทดสอบแรงดึง	112
ภาคผนวก ค ภาคผนวก ค ผลการทดสอบความแข็ง	115
ประวัติผู้เขียน	140

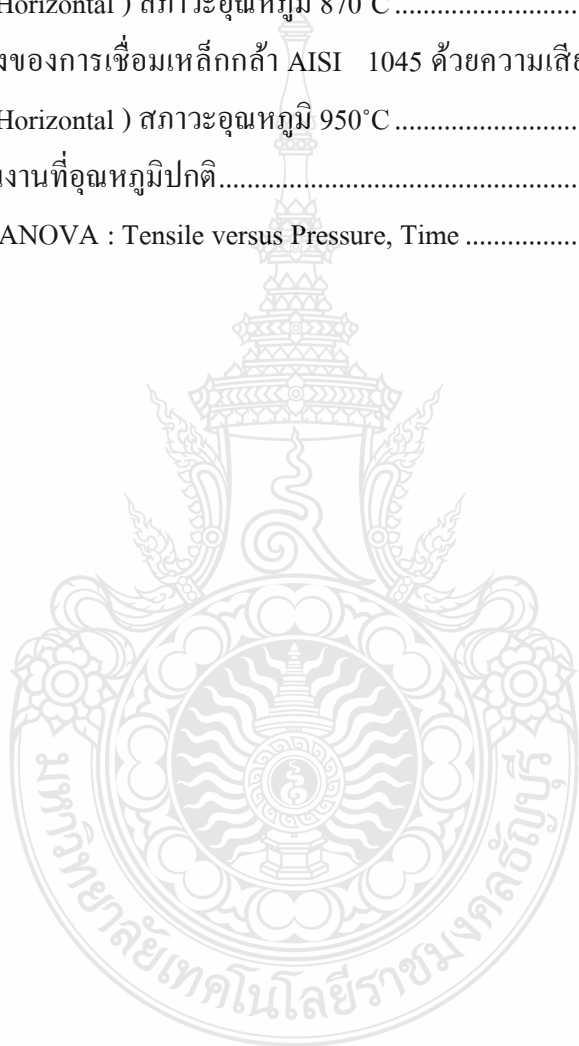


สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045 22
2.2	คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045 (อบอ่อน)..... 22
2.3	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 1045..... 23
2.4	สมบัติทางกลของเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อน (Annealing) และการอบปกติ (Normalizing) [11] 33
2.5	รูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบชนิดเพลากลม แบบ A (DIN 50125) หน่วยเป็น มม. 42
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย..... 51
3.2	ความเร็วรอบของเครื่องกลึงในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์ ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์ เวลา 2 วินาที..... 55
3.3	เวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์ ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์..... 56
3.4	ความดันที่ใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์ เวลา 2 วินาที 57
3.5	จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่อุณหภูมิปกติ..... 60
3.6	จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่อุณหภูมิอบอ่อน 790°C 60
3.7	จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่อุณหภูมิอบอ่อน 850°C 60
3.8	จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่อุณหภูมิอบอ่อน 970°C 60
4.1	ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิปกติ..... 69
4.2	ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิการอบอ่อน 790°C 70
4.3	ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิการอบอ่อน 870°C 72
4.4	ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิการอบอ่อน 950°C 73
4.5	ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิปกติ..... 75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6	ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 790°C 76
4.7	ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 870°C 78
4.8	ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 950°C 79
4.9	ค่าแรงดึงขึ้นงานที่อุณหภูมิปกติ..... 81
4.10	Two – way ANOVA : Tensile versus Pressure, Time 82



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การเชื่อมมิก [4].....	7
2.2 การเชื่อมทิก [4]	7
2.3 กระบวนการเชื่อมพลาสมา [4]	8
2.4 การเชื่อมตะเข็บ [4].....	9
2.5 การเชื่อมแบบเสียดทาน [7]	10
2.6 เครื่องไฮดรอลิกและกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก.....	15
2.7 เหล็กกล้าคาร์บอนนำมาผลิตถังบรรจุ [10]	25
2.8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการอบอ่อนในเหล็กกล้าคาร์บอน	30
2.9 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค.....	31
2.10 TTT diagram ของเหล็ก AISI 1045 [11].....	32
2.11 ช่วงอุณหภูมิสำหรับการอบชุบความร้อน (Hardening Range) การอบอ่อน(Annealing) และการอบปกติ (Normalizing) ในเหล็กกล้าคาร์บอน	34
2.12 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย [12].....	36
2.13 กล้อง Microscope [12]	39
2.14 แผนภาพแรงดึง – ระยะเวลา [13].....	41
2.15 ชิ้น ทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125) [13].....	42
2.16 เครื่องทดสอบแรงดึง [14].....	43
2.17 แผนภาพความเค้น – ความเครียด ($\sigma - \epsilon$ Strain Diagram)	44
2.18 รูปหัวเพชรและรอยกด [15].....	49
3.1 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน.....	52
3.2 เครื่องกลึงแนวนอน	53
3.3 ตู้อบชิ้นงาน.....	53
3.4 ชุดไฮดรอลิก	54
3.5 เหล็กกล้า AISI 1045 ขนาด 10 x 100 มิลลิเมตร	55
3.6 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเหล็ก AISI 1045 ที่ 790°C	57
3.7 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเหล็ก AISI 1045 ที่ 870°C	58
3.8 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเหล็ก AISI 1045 ที่ 950°C	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.9 ช่วงอุณหภูมิการอบอ่อนเหล็กกล้า.....	59
3.10 การจัดยึดชิ้นงานกับเครื่องกลึง	61
3.11 การเชื่อมเสร็จสมบูรณ์หยุดเรื่องกลึงแบบทันที	62
3.12 เครื่องไมโครคัตเตอร์	63
3.13 ชิ้นงานก่อนเลื่อย.....	63
3.14 ชิ้นงานที่ผ่านการเลื่อยเสร็จแล้ว.....	64
3.15 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเรซิน	64
3.16 เครื่องขัดกระดาษทราย	65
3.17 กล้อง Microscope.....	65
3.18 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	66
3.19 ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงและทดสอบแรงดึงมาตรฐาน DIN 50125.....	66
3.20 เครื่อง Microhardness	67
3.21 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งในแนวนอน (Horizontal).....	67
3.22 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งในแนวตั้ง (Vertical).....	67
4.1 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิปกติ.....	69
4.2 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิ 790°C.....	71
4.3 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิ 870°C.....	72
4.4 ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิการอบอ่อน 950°C.....	74
4.5 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิปกติ.....	75
4.6 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 790°C.....	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7	ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI1045 ด้วยแรงเสียดทานที่แนวเชื่อมใน แนวนอนที่สภาวะอุณหภูมิ 870°C 78
4.8	ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI1045 ด้วยแรงเสียดทานที่แนวเชื่อมในที่ แนวนอนสภาวะอุณหภูมิ 950°C..... 80
4.9	กราฟ Residual Plots of Tensile..... 82
4.10	กราฟ Boxplot of Tensile by Pressure ,Time 83
4.11 ความสัมพันธ์ค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิปกติ 790°C 870°C และ 950°C ที่ใช้ในการอบอ่อน..... 84
4.12	ความสัมพันธ์ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิปกติ 790°C 870°C และ 950°C ที่ใช้ในการอบอ่อน 86
4.13	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิปกติความ ดัน 40 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที..... 87
4.14	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิปกติความ ดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า 88
4.15	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 790°C ความดัน 40 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที..... 89
4.16	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 790°C ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า 89
4.17	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 870°C ความดัน 40 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที..... 90
4.18	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 870°C ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า 90
4.19	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950°C ความดัน 40 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที..... 91
4.20	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950°C ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า 91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.34	
ชั้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 870°C	
ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า	100
4.35	
ชั้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950°C	
ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที.....	101
4.36	
ชั้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950°C	
ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า	101



บทที่ 1

บทนำ

ตั้งแต่มนุษย์รู้จักการเชื่อมครั้งแรกในต้นศตวรรษที่ 19 และได้มีการพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบัน ซึ่งได้นำการเชื่อมมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆมากมายทั้งทางด้านการซ่อมบำรุงการตัดต่อ ชิ้นงานและอื่นๆอีกมากมาย การเชื่อมเป็นที่นิยมกันมากอย่างแพร่หลาย คือ การเชื่อมแก๊ส การเชื่อมไฟฟ้า เป็นต้น ในการเชื่อมสิ่งเหล่านี้ล้วนแต่ใช้ตัวประสานในการเชื่อม ส่วนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานก็เป็นการเชื่อมอีกชนิดหนึ่ง ด้วยหลักการทฤษฎีของแรงเสียดทาน คือ เมื่อวางวัตถุที่มีน้ำหนักวางบนพื้นราบแล้วเมื่อมีแรงมาผลักวัตถุให้เคลื่อนที่ จะเกิดแรงเสียดทานในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงผลัก จากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานทำให้วัสดุทั้งสองชนิดเกิดการหลอมติดกัน จากทฤษฎีดังกล่าว จึงได้นำหลักการมาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมต่อวัสดุเหล็กกล้า AISI 1045 และมีการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และเวลาในสภาวะต่างๆ

1.1 แนวคิดหรือที่มาของวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้พัฒนาและเติบโตอย่างรวดเร็ว จึงมีการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมสูง โดยมีการนำเอาความรู้ทางเทคนิคและเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ในการงาน อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ผลิตภัณฑ์ด้านกีฬา อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ ทำให้มีการประยุกต์และพัฒนาวิธีการผลิตให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งการเชื่อมก็เป็นส่วนหนึ่งของวิธีการผลิตในอุตสาหกรรมที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย วิธีการเชื่อมที่ใช้กันมากคือการเชื่อมแก๊สและเชื่อมไฟฟ้า แต่การเชื่อมก็ไม่ได้มีเพียงสองอย่างเท่านั้นยังมีการเชื่อมแบบอื่นๆอีกมากมายโดยในลักษณะต่างๆไปการเชื่อมชิ้นงานต่างๆจะต้องมีตัวประสานหรือลวดเชื่อมในการเชื่อมให้เหมาะกับประเภทของวัสดุที่นำมาเชื่อมด้วย นอกจากนี้ยังต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในการเชื่อมให้ได้แนวเชื่อมที่มีประสิทธิภาพซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานและเสียเวลาในการผลิตชิ้นงานที่มีปริมาณมากๆ เทคโนโลยีการเชื่อมจึงเป็นที่นิยมในประเทศที่กำลังพัฒนาและเติบโตอย่างรวดเร็ว

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding) คือการต่อวัสดุให้ติดกันด้วยแรงเสียดทาน ในการเชื่อมจะมีอุณหภูมิเป็นตัวแปรอย่างหนึ่งในการหลอมละลายวัสดุเข้าด้วยกัน การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเป็นเทคโนโลยีหนึ่งของการเชื่อมวัสดุโลหะ เนื่องจากปัจจุบันการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุด้วยวิธีการอบอ่อนแล้วนำไปเชื่อมด้วยแรงเสียดทานยังไม่มีการทดลองกับเหล็กกล้า AISI 1045 ว่าการอบอ่อนมีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 อย่างไร

ดังนั้นกลุ่มนักศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะทำการทดลองนำวัสดุเหล็กกล้า AISI 1045 ไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างด้วยวิธีการอบอ่อนและวัสดุเหล็กกล้า AISI 1045 ที่ไม่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างด้วยวิธีการอบอ่อนนำไปทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแล้วนำมาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาอิทธิพลการอบอ่อนต่อการเชื่อมโลหะเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทาน ผลการทดลองจะนำวัสดุที่ผ่านการเชื่อมไปตรวจสอบคุณสมบัติทางกลและตรวจสอบแนวการเชื่อมว่าชนิดใดเหมาะสมกับวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบอ่อนของเหล็กในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยวิธีแรงเสียดทาน

1.2.2 เพื่อศึกษาเวลาในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทานที่เหมาะสม

1.2.3 เพื่อศึกษาความดันในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทานที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สำหรับกรวิจัยจะใช้เหล็กกล้า AISI 1045 หรือเหล็กหัวแดง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรและ ขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร

1.3.2 จำนวนชิ้นทดสอบทั้งหมด 760 ชิ้น

1.3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิปกติ 790°C 870°C และ 950°C

1.3.4 เวลาที่ใช้ในการเชื่อมอัดแช่ชิ้นงาน 4 วินาที เวลาในการกดอัด 2 วินาที 3 วินาทีและ 4 วินาทีตามลำดับ

1.3.5 ความดันที่ใช้ในการเชื่อมอัดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์ และความดันที่ใช้ในการกดอัด 20 บาร์ 30 บาร์ และ 40 บาร์ ตามลำดับ

1.3.6 ความเร็วรอบของเครื่องกลึงที่ใช้ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน 1,800 รอบต่อนาที

1.3.7 ตรวจสอบผิวแนวการเชื่อมด้วยการส่องดูโครงสร้างด้วยเครื่อง Microscope

1.3.8 ทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหลังจากการเชื่อมด้วยวิธีแรงเสียดทานตามมาตรฐาน DIN 50125

1.3.9 ทดสอบความแข็ง Microhardness vicker

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เข้าใจหลักการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานโดยการปฏิบัติงานจริง
- 1.4.2 เข้าใจสถานะอุณหภูมิในการอบอ่อนเหล็กที่มีผลต่อการเชื่อมด้วยวิธีแรงเสียดทาน
- 1.4.2 ทำให้ทราบความดันที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยวิธีแรงเสียดทาน
- 1.4.3 ทำให้ทราบเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเชื่อมแบบแรงเสียดทานสามารถเชื่อมได้ทั้ง โลหะและอโลหะ โดยคุณสมบัติทางกลไม่เปลี่ยนแปลงการเชื่อมด้วยวิธีอื่นไม่สามารถเชื่อมได้เพราะจะทำให้เกิดการแตกร้าวจึงทำให้การเชื่อมไม่สามารถเกิดขึ้นได้จากข้อที่เห็นได้ชัด คือ อุณหภูมิที่หลอมละลายในการเชื่อมและเวลาที่สั้นจึงทำให้การเชื่อมโลหะต่างๆ สามารถทำการเชื่อมได้สะดวกยิ่งขึ้น การเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนมากแบบ (Mass product)

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 Mumin Sahin , H.Erol Akta and Turgut Gulmez

การศึกษาลักษณะของคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า AISI 1040 ด้วยความเสียดทาน การศึกษาทฤษฎีและความสำคัญของการเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมต่างๆ ที่ได้รับคือการพัฒนาเพื่อให้ได้การต่อที่เหมาะสมในการทำงานต่างๆ อย่างไรก็ตามการเชื่อมความเสียดทานเป็นทางเลือกการผลิตวิธีหนึ่งในวิธีการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมานานหลายปี ในการศึกษาการตั้งค่าความเสียดทาน การทดลองเชื่อม ซึ่งเป็นตัวแปรของการเชื่อมด้วยความเสียดทานนำไปใช้ทำการทดลอง ประการแรก พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่จะได้รับเข้าร่วมส่วนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ประการที่สอง ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตัวแปร การเชื่อมต่อโดยการตรวจสอบงานเชื่อม ต่อมาดูเรื่องสมบัติทางกลของรอยต่อถูกตรวจสอบโดยใช้การทดสอบแรงดึง การทดสอบความล้า การทดสอบรอยผลกระทบ และการทดสอบความแข็ง ขั้นสุดท้ายผลที่ได้มีการนำเสนอและพูดคุยกันต่อไป

สรุปผลงานวิจัย ความต้านทานแรงดึงของชิ้นส่วนมาตรฐาน AISI 1040 ส่วนของโลหะพื้นฐาน จุดแข็งของความล้าของชิ้นงานที่เชื่อมอยู่ใกล้กับมาตรฐานของเหล็กกล้า AISI 1040 ความเหนียวมีผลกระทบเป็นส่วนใหญ่ในการเชื่อมชิ้นงานสามารถต้านทานแรงคงที่และแบบไดนามิก ความแข็งในแนวนอนที่ได้รับจากอินเตอร์เฟซที่เชื่อม ค่าความแข็งสูงสุดกับระยะตามแนวตั้งเสียดทานที่อินเตอร์เฟซที่เชื่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยการเปลี่ยนภาพที่ [1]

2.1.2 เชษฐา สุเพ็งคำ และคณะ

เครื่องเชื่อมแรงเสียดทานหลักการทำงานของเครื่องจะอาศัยแรงเสียดทานของชิ้นงานเป็นแรงโดยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุมีการสัมผัสกับผิวใดๆ ที่มีความฝืดและมีแนวโน้มจะขยับเคลื่อนที่ ดังเช่น การนำวัตถุที่มีน้ำหนักเบาวางบนพื้นราบแล้วมีแรงมากกระทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่แรงเสียดทานก็จะเกิดในทิศทางตรงข้ามกับแรงที่กระทำแล้วทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ทฤษฎีหลักการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมแรงเสียดทานนำชิ้นงานไปใส่ไว้ในหัวจับทั้งสองข้างเมื่อทำการเดินเครื่องมอเตอร์ก็จะหมุนหัวจับให้ชิ้นงานหมุน ส่วนอีกชิ้นก็จะถูกเลื่อนเข้ามากดโดยชุดไฮดรอลิกและเมื่อชิ้นงานทั้งสองชิ้นสัมผัสกันก็จะเกิดแรงเสียดทานขึ้น แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงานทั้งสองชิ้นแล้วก็จะร้อนขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงจุดหลอมเหลวชิ้นงานทั้งสองชิ้นก็จะหลอมติดเข้าด้วยกัน [2]

2.1.3 สุรสิงห์ อารยางค์กูร และคณะ

เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบต้องสามารถเชื่อมชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าชนิด AISI 1015 ได้ และต้องทำงานได้อย่างต่อเนื่องในช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆ จากการศึกษาวิจัยและพัฒนาเครื่องเชื่อมต้นแบบ พบว่าเครื่องเชื่อมต้นแบบสามารถทำงานและเชื่อมต่อชิ้นงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆ ที่เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทานต้นแบบทำได้คือ สามารถปรับตั้งค่าแรงดันในการเสียดทาน (Friction Pressure) ตั้งแต่ 10 - 60 บาร์ แรงดันในการเชื่อม (Upset Pressure) ตั้งแต่ 20-100 บาร์ ความเร็วรอบในการหมุน (Friction Speed) ตั้งแต่ 0 - 2500 รอบต่อนาที และสามารถปรับตั้งเวลาในการเสียดทาน (Friction Time) เวลาในการเชื่อม (Upset Time) ได้ จากการทดลองเชื่อมเหล็กเพลากลมชนิด AISI 1015 พบว่าค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมต่อมีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นกว่าชิ้นงานเดิม (Base Iron) ในส่วนของกราฟวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นพบว่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมต่อมีค่าความแข็งลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมทำให้เปอร์เซ็นต์ของ Pearlite ลดลง ในส่วนของความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจากการวิเคราะห์โครงสร้างของเกรนเหล็กด้วย Microphotograph พบว่าบริเวณแนวเชื่อมต่อมีเกรนของเหล็กที่ละเอียดมากกว่าบริเวณอื่นที่ไม่ได้รับผลกระทบจากเชื่อม ส่งผลให้บริเวณแนวเชื่อมต่อมีความแข็งแรงมากขึ้น [3]

2.2 กระบวนการเชื่อม

การเชื่อม หมายถึง วิธีการต่อวัสดุโดยใช้ความร้อน ซึ่งอาจได้มาจากไฟฟ้า แก๊ส หรือพลังงานอื่นๆที่สามารถทำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงานที่ต้องการต่อได้ โดยทั่วไปอาจทำให้เกิดการหลอมละลาย หรือไม่หลอมละลายก็ได้ ในบางกระบวนการอาจจะต้องใช้ตัวประสาน (Filler Metal) เข้าช่วย และบางกระบวนการอาจต้องใช้แรงกดเข้าช่วยทำให้ติดกัน

2.2.1 การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding)

เป็นการให้ความร้อนกับโลหะจนหลอมละลายเป็นกระบวนการต่อโลหะชิ้นงานจนหลอมละลายประสานเป็นเนื้อเดียวละติดกันชนิดหนึ่ง ขณะที่หลอมละลายอาจเติมตัวประสานลงไปหรือใช้เนื้อโลหะเป็นตัวเป็นตัวประสานกันเองก็ได้ ความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานจนหลอมละลายนั้นต้องมีความเหมาะสมกับชิ้นงานนั้น

1. การเชื่อมมิก (Metal Inert Gas : MIG หรือ Gas Metal Arc Welding : GMAW)

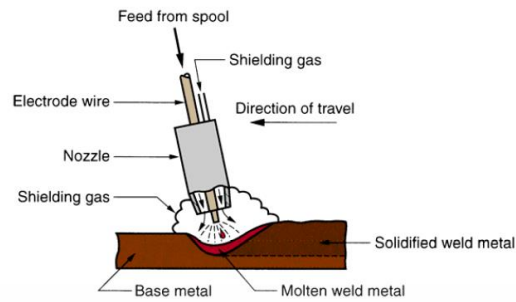
เป็นกระบวนการเชื่อมโดยการอาร์กแบบหนึ่ง ซึ่งได้รับความร้อนจากการอาร์ก ระหว่างลวดเชื่อมแบบต่อเนื่อง (Continuous Filler Metal or Consumable Electrode) กับชิ้นงานและมีแก๊สจากแหล่งภายนอกถูกจัดให้จ่ายออกมาเป็นแบบปกคลุมแนวเชื่อมขณะอาร์กเพื่อป้องกันการรวมตัวจากบรรยากาศ กระบวนการกระบวนการเชื่อมแบบนี้แบ่งออกได้เป็น 4 วิธีการตามชนิดของแก๊สที่ใช้เป็นเกราะป้องกันขณะอาร์กหรือชนิดของการส่งป้อน โลหะไปยังแนวเชื่อมได้แก่

MIG เป็นการเชื่อมโดยใช้แก๊สเฉื่อยบริสุทธิ์เป็นเกราะป้องกันในการเชื่อมโลหะจะพวกที่ไม่ใช่เหล็ก

MICRO WIRE เป็นการเชื่อมแบบป้อนลวดเชื่อมในลักษณะลัดวงจร(Metal Transfer) หรือ Circuiting Transfer โดยสามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม

CO₂ เป็นการเชื่อมโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สปกป้องขณะอาร์กและใช้ลวดเชื่อมขนาดโตกว่า

SPRAY เป็นการเชื่อมโดยใช้ส่วนผสมของแก๊สอาร์กอน (Argon) กับแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สปกป้องขณะอาร์ก ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.1



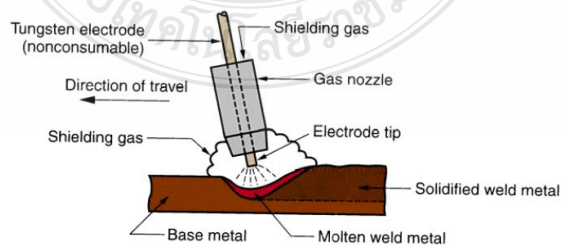
ภาพที่ 2.1 การเชื่อมมิก [4]

2. การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW)

เป็นการต่อโลหะให้ติดกันโดยใช้ความร้อนจากการอาร์กระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เพื่อหลอมละลายโลหะให้ติดกัน โดยแกนลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและเป็นโลหะเติมลงไป ในแนวเชื่อมส่วนฟลักซ์ที่หุ้มแกนลวดเชื่อมจะหลอมละลายปกคลุมแนวเชื่อมไม่ให้อากาศภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะที่หลอมละลาย

3. การเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas Welding : TIG)

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) หรือ Tungsten Inert Arc Welding (TIG) หรือ Heliarc เป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมเรียกกันทั่วไปว่าการเชื่อมแบบ TIG กระบวนการเชื่อมทิก อาศัยการนำกระแสที่ปลายลวดทั้งสองด้าน ส่งผ่านไปที่แนวเชื่อมเพื่อให้เกิดการหลอมละลายของชิ้นงาน โดยใช้แก๊สเฉื่อยซึ่งต่างๆ ไปนิยมใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมการเชื่อมวิธีนี้ในเบื้องต้นจะเชื่อมโดยไม่ต้องมีเนื้อลวดแต่ใช้ความร้อน เป็นตัวหลอมเนื้องานให้ติดกัน นอกจากการเชื่อมบางงานที่อาจจะต้องมีลวดเติมเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่ต้องการ ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.2

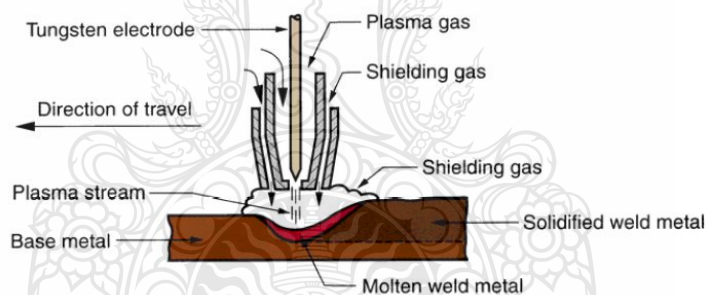


ภาพที่ 2.2 การเชื่อมทิก [4]

ในกระบวนการเชื่อมใดๆก็ตาม แนวเชื่อมที่ดีที่สุดจะต้องมีคุณสมบัติทางเคมี , ทางกล และทางโลหะวิทยาเหมือนกับคุณสมบัติชิ้นงานทุกประการ ดังนั้นการใช้ก๊าซเฉื่อยปกคลุมแนวเชื่อม จึงเป็นวิธีการที่ดีที่ป้องกันไม่ให้อากาศซึ่งมีทั้ง Oxygen , Nitrogen ตลอดจนก๊าซเฉื่อยอื่นๆเข้าไป รวมตัวกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย อันเป็นสาเหตุที่จะทำให้แนวเชื่อมเกิดรูพรุนหรือสูญเสียความ แข็งแรง ก๊าซเฉื่อยที่นิยมใช้คือ อาร์กอน (Argon) เพราะสามารถใช้กับโลหะได้แทบทุกชนิดและ เหตุผลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ อัตราการไหล (Flow rates) ของอาร์กอนต่ำกว่าก๊าซเฉื่อยอื่นๆจึงทำ ให้ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการเชื่อมถูกกว่า

4. การเชื่อมแบบอาร์คพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW)

เป็นกระบวนการเชื่อมด้วยไฟฟ้าแบบหนึ่ง ที่มีลักษณะคล้ายกับการเชื่อมอาร์ก ทั้งสแตน ก๊าซคลุมหรือการเชื่อม TIG ความร้อนจากเปลวอาร์กจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ผ่านนอซซีด (constricted Arc) จากแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน ไปยังชิ้นงาน (Transferred Arc) หรือระหว่างแท่งอิเล็กโทรดทั้งสแตน รูปร่างเปลวอาร์ก (Constricting Orifice) [5] ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กระบวนการเชื่อมพลาสมา [4]

2.2.2 การเชื่อมแบบไม่หลอมละลาย (Solid – State Welding)

การเชื่อมแบบไม่หลอมละลาย หรือการเชื่อมในสถานะแข็งตัว กระบวนการเชื่อมแบบนี้มี 2 ชนิด คือ ใช้แรงกดเพียงอย่างเดียว และให้ความร้อนแล้วใช้แรงกดด้วย ซึ่งต้องใช้เวลาที่เหมาะสม ด้วย โดยไม่ต้องเติมลวดเชื่อม แต่ผิวงานที่ต้องการเชื่อมต้องสะอาด และอะตอมต้องประสานติดกันได้

1. การเชื่อมในสภาวะแข็งตัว

การเชื่อมแบบไม่ให้ความร้อน คือการนำเอาวัสดุ 2 ตัวที่ผ่านการทำความสะอาดที่ผิวงานปราศจากออกไซด์และสิ่งสกปรกต่าง ๆ มาทำการกดอัดด้วยแรงและเวลาที่พอเหมาะ ผลที่ได้จะทำให้เกิดความร้อนและเกิดการเคลื่อนตัวในลักษณะการขึ้นรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) ที่ผิวหน้าของชิ้นงานยึดติดกันและมีความแข็งแรง

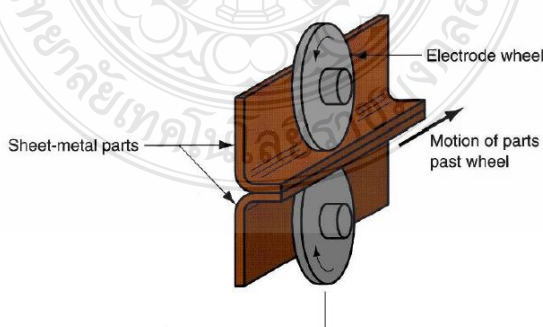
ในการประยุกต์ใช้งาน ด้วยการให้ความร้อนจากภายนอกแก่ชิ้นงานก่อน แล้วนำกดอัดให้ยึดเกาะกัน ในลักษณะที่ผิวหน้าสัมผัสจะเคลื่อนตัว (Faying Surface) เกิดการแผ่กระจายประสานยึดติดกัน หยุดการเกิดออกไซด์ฟิล์ม ทำให้เกิดความแข็งแรงขึ้น

2. การเชื่อมด้วยลูกกลิ้ง (Roll Welding : ROW)

เป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง ที่ใช้แรงกดเพื่อให้โลหะประสานติดกัน โดยการรีดต้องอาศัยความร้อนจากภายนอก หรือไม่ใช้ความร้อนก็ได้ ถ้าใช้ความร้อนเรียกว่า Cold Row แต่ถ้าใช้ความร้อนเรียกว่า Hot Row กระบวนการนี้สามารถใช้กับวัสดุงานที่เป็นเหล็กและ สแตนเลส ที่ป้องกันการกัดกร่อนได้ ใช้ทำปลายของเครื่องมือวัดอุณหภูมิและการทำเหรียญกษาปณ์

3. การเชื่อมตะเจ็บ (Resistance Seam Welding : RSEW)

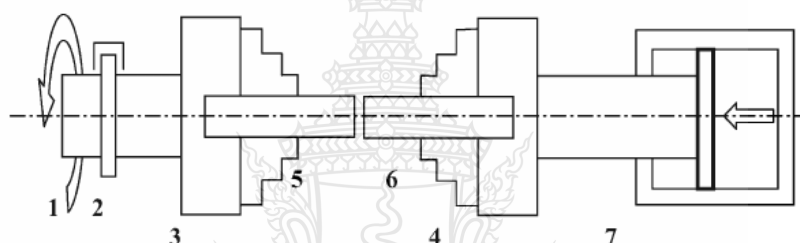
การเชื่อมแบบนี้หลักการเหมือนกับการเชื่อม RSW แต่อิเล็กโทรดแทนที่จะเป็นแท่ง จะถูกออกแบบให้มีรูปร่างเป็นล้อหมุนแทน รอยเชื่อมแบบนี้อากาศจะไม่สามารถผ่านได้ จึงนิยมที่จะเชื่อมถังน้ำมัน ท่อพักไอเสียรถยนต์ และกระป๋องบรรจุอาหารจะมีรอยเชื่อมหรือตะเจ็บในหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถทำได้โดยกระแสไฟฟ้าเป็นจังหวะ หรือปล่อยกระแสอย่างต่อเนื่อง [6] ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การเชื่อมตะเจ็บ [4]

2.3 การเชื่อมแบบเสียดทาน (Friction Welding)

การเชื่อมแบบแรงเสียดทานจะสามารถเชื่อมโลหะได้หลายชนิด ทั้งโลหะที่เหมือนกันและต่างชนิดกัน สามารถจะเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงแต่มีบางพวกที่เชื่อมเสร็จแล้วรอยเชื่อมที่ได้จะไม่แข็งแรงเท่ากับโลหะชิ้นงาน ดังนั้น โลหะพวกนี้จึงจำเป็นต้องให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมเสร็จแล้วเพื่อให้ได้โครงสร้างของรอยเชื่อมเหมือนกับโลหะชิ้นงาน และโลหะกลุ่มนี้ส่วนมากจะ ได้แก่ กลุ่มโลหะผสมและแอสเตนเลสที่ชุบแข็งได้ กลุ่มเหล็กคาร์บอนและโลหะผสม จะง่ายต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ดังแสดงได้ในภาพที่ที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเชื่อมแบบเสียดทาน [7]

ส่วนประกอบของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน มีดังนี้

1. Motor
2. Brake
3. Rotating Chuck
4. Non Rotating Chuck
5. Rotating Workpiece
6. Non Rotating Workpiece
7. Hydraulic Cylinder

ส่วนเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ต่ำ และคาร์บอนผสมอยู่ปานกลางจะสามารถทำการเชื่อมได้ง่าย และมีขอบเขตการเชื่อมอย่างกว้างขวาง ส่วนเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่สูง และพวกเหล็กผสมจะง่ายต่อการเชื่อม แต่การเชื่อมจะต้องใช้กรรมวิธีในการเชื่อมและเทคนิคในการ

เชื่อม เพื่อให้การเชื่อมง่ายขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง โลหะหลอมละลายติดกัน ส่วนกลุ่มเหล็กประเภทเครื่องมือจะสามารถทำการเชื่อมได้เช่นเดียวกับเหล็กพวกคาร์บอน และเหล็กผสมที่ใช้ทำด้ามของดอกสว่านรีมเมอร์ และกลุ่มเครื่องมือตัดชนิดอื่นๆ เหล็กไร้สนิมจะใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ง่าย และรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงทั้งยังมีขอบเขตการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ง่าย และรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงทั้งยังมีขอบเขตการเชื่อมอย่างกว้างขวาง แต่ในบางครั้งต้องมีการให้ความร้อนก่อน การเชื่อมและหลังการเชื่อมเพื่อให้รอยเชื่อมดีขึ้น เหล็กหล่อจะออกแบบได้หลายชนิด เช่น พวกเหล็กหล่อสีเทาหรือเหล็กหล่อเหนียวจะไม่สามารถใช้กรรมวิธีเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ เพราะกลุ่มคาร์บอนอิสระจะไปรวมตัวกันที่ผิวของชิ้นงานและทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นหน้าสัมผัสชิ้นงาน และทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนที่จำกัด โลหะนอกกลุ่มเหล็กและโลหะผสมส่วนมากจะทำการเชื่อมต่อแบบแรงเสียดทานได้ เช่น กลุ่มอลูมิเนียมผสม หรือกลุ่มทองแดงผสม จะทำให้สามารถเชื่อมต่อแบบแรงเสียดทานได้ เช่น กลุ่มอลูมิเนียมผสม หรือกลุ่มทองแดงผสม จะทำให้สามารถเชื่อมได้เช่นเดียวกับอลูมิเนียมและทองแดงบริสุทธิ์ แต่ในกรณีที่จะต่อกับอลูมิเนียมผสมหรือทองแดงผสมให้ติดกับเหล็กจะมีปัญหาเกี่ยวกับการนำความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมจะแตกต่างกันมากก็ตามก็สามารถที่จะเชื่อมให้ติดกันได้แต่รอยเชื่อมที่ได้อาจเปราะเนื่องจากสารที่เกิดจากส่วนผสมของรอยเชื่อม ส่วนกลุ่มไททานเนียม ไททานเนียมผสม เซอร์โคเนียมผสมและแมงกานีสผสม จะทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ด้วยตัวเอง กลุ่มโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ และกลุ่มโลหะทนความร้อน ทั้งสเตน-โมลิบดีนัม โคลัมเบียและแทนทาลเนียม จะง่ายมากในการเชื่อมด้วยตัวเอง (โลหะชิ้นงานและตัวที่จะนำมาต่อจะต้องเป็นชนิดเดียวกัน)

การเชื่อมแบบแรงเสียดทานสามารถเชื่อมได้แบบทั้งโลหะและอโลหะ โดยที่คุณสมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลง การเชื่อมด้วยวิธีอื่นไม่สามารถเชื่อมได้ เพราะจะทำให้เกิดการแตกร้าวจึงทำให้การเชื่อมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จากข้อที่เห็นได้ชัดคือ อุณหภูมิที่หลอมละลายในการเชื่อมและเวลาที่สั้นจึงทำให้การเชื่อมโลหะต่างๆสามารถทำการเชื่อมได้สะดวกยิ่งขึ้น และการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนมากแบบ Mass Product หรือ นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือตัด โลหะด้วยเครื่องจักรอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนประกอบรถยนต์และรถแทรกเตอร์รวมถึงเครื่องทำน้ำอุ่น เป็นต้น และการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1 Continuous drive friction welding

หลักการทำงานของกระบวนการนี้ คือ โลหะชิ้นงานจะถูกจับด้วยหัวจับด้วยหัวจับของเครื่องแล้วถูกทำให้หมุน ส่วนอีกชิ้นหนึ่งจะถูกจับอยู่ที่ขั้วศูนย์ท้ายเครื่อง (Tail stock) หรือจิ๊กที่ออกแบบมาสำหรับการจับยึดให้แน่น และจะเลื่อนเข้าหาชิ้นงานด้วยระบบไฮดรอลิกให้สัมผัสกับชิ้นงานที่กำลังหมุนด้วยแรงกดดันของเพลลาที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจากแรงเสียดทานจนถึงอุณหภูมิของการเชื่อม การหมุนก็จะหยุดลงอย่างทันใด แรงกดดันที่ขั้วศูนย์ท้ายเครื่องจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์

องค์ประกอบที่สำคัญในการเชื่อมวิธีนี้ คือ ความเร็วรอบที่หัวจับ แรงดันที่ขั้วศูนย์และระยะเวลาของแรงกด สำหรับรูปลักษณะของรอยเชื่อมจะขึ้นอยู่กับ

1. พื้นที่ภาคตัดของชิ้นงานที่จะเชื่อม
2. จุดหลอมละลายและการกระจายความร้อนของโลหะชิ้นงาน
3. โครงสร้างของโลหะที่เปลี่ยนไปซึ่งเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนขณะเชื่อม โดยเฉพาะโลหะต่างชนิดเมื่อถูกนำมาเชื่อม

ตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมในกระบวนการ คือ ความเร็วรอบ แรงกดเริ่มต้น (ความร้อน) ระยะเวลาของการกดเพื่อให้เกิดความร้อนและรอยเย็นหรือแรงกดขึ้นรูป ระยะเวลาของการหมุน ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิของชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานร้อน

ความเร็วรอบหรือความเร็วขอบจะมีผลต่อกระบวนการเชื่อมน้อยที่สุด และจะเปลี่ยนแปลงได้มากถ้าเวลาของการให้ความร้อนและแรงกดปรับให้ถูกต้อง อย่างไรก็ตาม เวลาของการให้ความร้อนจะต้องถูกจำกัดเพื่อป้องกันความร้อนเกิดขึ้นมากเกินไป ความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเหล็กคาร์บอนต่ำ ปานกลาง และสูง คือ 250 ถึง 750 sfm (Surface feet per – minute)

แรงกดที่ทำให้เกิดความร้อนใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กคาร์บอนและเหล็กผสมต่ำ จะใช้แรงกด 6 ถึง 12 ksc แรงกดที่ใช้ในการเชื่อมสำหรับเหล็กเหล่านี้จะใช้ถึง 12 ถึง 25 ksc โดยทั่วไปแรงกดที่ใช้สำหรับการเชื่อมจะสูงกว่าแรงกดที่ทำให้เกิดความร้อนแต่บางครั้งก็ใช้เกือบเท่ากัน สำหรับเหล็กคาร์บอน ปานกลางและสูง จะให้แรงกดที่ทำให้เกิดความร้อน 6 ถึง 15 ksc การอุ่นชิ้นงานบางครั้งจะใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่

แกนหมุนควรจะหยุดอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการบิดหรือแกนสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกว่า $\frac{1}{2}$ นิ้ว เวลาที่ใช้ในการหยุดควรจะใช้เวลาไม่เกิน 1.5 วินาที และชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางควรจะหยุดภายใน $\frac{1}{2}$ หรือ 2 วินาที

2.3.2 Inertia drive friction welding

ความร้อนทั้งหมดที่ต้องการในการเชื่อมจะใช้พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการหมุนล้อช่วยแรงในการเชื่อมแบบ (Inertia drive friction welding) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเชื่อมแบบ (Continuous drive friction welding) โดยหลักการทำงานชิ้นงานหนึ่งจะถูกจับยึดอยู่กับที่หรือที่จิกจับงาน และชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งถูกจับอยู่ที่หัวจับยึดอยู่กับ (Spindle) ที่กำลังหมุนมอเตอร์ขับเคลื่อนจะเร่งอัตราการหมุนของล้อช่วยงานและ (Flywheel) จะส่งต่อกำลังไปยัง (Spindle) จนถึงระดับพลังงานที่เพียงพอและแล้วพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนการหมุนจะถูกตัดออก และพลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุน (Flywheel) จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ผิวหน้าของรอยเชื่อมด้วยแรงกดคั่นที่แกนเพลลา ซึ่งจะเป็นผลให้ชิ้นงานเชื่อมติดเข้าด้วยกันโดยสมบูรณ์

ผิวของชิ้นงานที่จะเชื่อมไม่จำเป็นต้องตกแต่งก่อนเชื่อม เช่น ผิวของชิ้นงานที่เกิดจากการตัดด้วยใบหินเจียร เลื่อยตัด แก๊สตัด เพราะว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดทานจะทำให้ส่วนที่ไม่เรียบเกิดการหลอมละลายรวมตัวกับเนื้อโลหะที่เชื่อม โดยจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพรอยเชื่อมต่อลดลงสำหรับโลหะที่เคลือบด้วยโครเมียม โลหะที่ชุบแข็งด้วยไฮโดรคาร์บูไรต์ โลหะที่มีออกไซด์สูง จะไม่สามารถขจัดออกได้ในขณะที่เชื่อมที่เป็นสาเหตุให้รอยเชื่อมที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าปกติ แล้วถ้าหากมีสารไนโตรเจนเคลือบอยู่หน้าจะไม่สามารถทำการเชื่อมได้เลย

การเชื่อมแบบแรงเสียดทาน จะสามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ทั้งโลหะที่เหมือนกันและต่างชนิดกัน สามารถจะเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรง แต่มีบางพวกที่เชื่อมเสร็จแล้ว รอยเชื่อมที่ได้จะไม่แข็งแรงเท่ากับโลหะชิ้นงาน ดังนั้น โลหะพวกนี้จึงจำเป็นต้องให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมเสร็จแล้ว เพื่อจะทำให้โครงสร้างของรอยเชื่อมเหมือนกับโลหะชิ้นงานและโลหะพวกนี้ส่วนมากได้แก่พวก (Alloy Steel) และ (Hardenable – Stainless Steel)

เหล็กพวกคาร์บอนและ (Alloy Steel) จะง่ายต่อการเชื่อมแบบแรงเสียดทานส่วนเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ต่ำ และคาร์บอนผสมอยู่ปานกลางจะสามารถทำการเชื่อมได้โดยง่าย และมีขอบเขตในการเชื่อมอย่างกว้างขวาง ส่วนเหล็กพวกที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่สูงและพวกเหล็ก

ผสมจะง่ายต่อการเชื่อม แต่ในการเชื่อมจะต้องใช้กรรมวิธีการควบคุมกระบวนการเชื่อมและใช้เทคนิคในการเชื่อม เพื่อให้การเชื่อมนั้นง่ายขึ้นเหมือนกับการเชื่อมโลหะที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ต่ำ และแรงที่ใช้กดในแนวอนจะต้องเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งโลหะชิ้นนั้นหลอมละลายติดกัน

(High speed tool steel) จะสามารถทำการเชื่อมได้เช่นเดียวกับเหล็กพวกคาร์บอนและเหล็กผสมที่ใช้ทำด้ามของดอกสว่านริมเมอร์และพวก (Cutting Tool) ชนิดอื่นๆ

เหล็กไร้สนิม จะใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ง่าย และคุณสมบัติของรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงพร้อมทั้งยังมีขอบเขตในการเชื่อมอย่างกว้างขวาง แต่ในบางครั้งจะต้องมีการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมและหลังการเชื่อมเพื่อจะทำให้คุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมดีขึ้น

เหล็กหล่อ (Cast iron) แบ่งออกได้หลายชนิด เช่น Gray Ductile or Malleable จะไม่สามารถใช้กรรมวิธีในการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้เพราะพวก (Free graphite) จะไปรวมตัวกันที่ผิวของชิ้นงานและทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่น ซึ่งจะทำให้ได้รับความร้อนที่จำกัด

อโลหะ และอโลหะผสม ส่วนมากจะสามารถทำการเชื่อมต่อแบบแรงเสียดทานได้เช่นพวกอลูมิเนียมผสมหรือทองแดงผสมจะสามารถเชื่อมได้เช่นเดียวกับพวกอลูมิเนียมและทองแดงชนิดบริสุทธิ์แต่ในกรณีที่ต้องการต่อพวกอลูมิเนียมผสมหรือทองแดงผสมให้ติดกับเหล็ก มีปัญหาเกี่ยวกับด้านการนำความร้อนและอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมต่อกันจะแตกต่างกันมากก็ตามก็สามารถที่จะเชื่อมให้ติดกันได้ แต่รอยเชื่อมที่ได้อาจจะเปราะเนื่องจากสารที่เกิดจากส่วนผสมของรอยเชื่อม

ส่วนพวกไททาเนียม ทิทาเนียมผสม เซอร์โคเนียมผสมและแมงกานีสผสมจะสามารถทำการเชื่อมแบบแรงเสียดทานได้ด้วยตัวของมันเองพวก (Nickel – base) และ (Cobalt – base) และพวก (Heat – resisting alloy) โลหะทนความร้อน (Tungsten – molybdenum Columbium) และ (Titanium) จะง่ายมาก ในการเชื่อมด้วยตัวของมันเอง (โลหะชิ้นงานและตัวที่นำมาต่อจะต้องเป็นชนิดเดียวกัน) และมีข้อจำกัดของการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน [8]

1. ชิ้นงานจะต้องเป็นรูปกลมหรือค่อนข้างกลม ณ จุดสัมผัส ขนาดและรูปร่างจะถูกควบคุมโดยการหมุน
2. ชิ้นงานจะต้องทนแรงบิด และแรงดันในแนวแกนระหว่างเกิดความร้อนและแรงอัด
3. ตัวจับชิ้นงานจะต้องแข็งแรงและทนต่อ Shock and torque load

4. กระบวนการจะต้องมีรูปแบบควบคุมให้อยู่ในแนวราบและ Angular butt – weld ที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน

5. เครื่องจักรจะต้องออกแบบให้มีการเชื่อมของชิ้นงานเป็นรูปวงกลม หรือเกือบกลม

2.4 ไฮดรอลิก (Hydraulics)

2.4.1 วิวัฒนาการของระบบไฮดรอลิก (Development of hydraulics)

มนุษย์ทุกคนเกิดมาก็ได้สัมผัสกับน้ำ และได้นำเอาน้ำมาใช้ประโยชน์เช่น ใช้ดื่ม ใช้อาบ ใช้ล้างสิ่งสกปรกต่างๆ ต่อมามนุษย์ได้รู้จักสร้างระหัดวิดน้ำ ทดน้ำเข้านา จะกระทั่งคริสต์ศตวรรษที่ 17 ความรู้ทางด้านระบบไฮดรอลิกได้ถูกค้นพบขึ้นโดยชาวฝรั่งเศสชื่อปาสกาล (Pascal) เขาได้ค้นพบว่าถ้านำเอาน้ำบรรจุขวดไว้จนเต็มปิดด้วยจุกก๊อก แล้วออกแรงกดที่จุกก๊อก จุกก๊อกจะไปดันน้ำให้เกิดแรงดัน แรงดันของน้ำจะไปกระทำกับผนังขวดเท่าๆกันทุกทิศทุกทาง ถ้าเรายังดันจุกก๊อกนั้นต่อไปเรื่อยๆ โดยไม่ยอมให้น้ำไหลผ่านจุกก๊อก น้ำในขวดจะมีแรงดันสูงขึ้น จนกระทั่งขวดน้ำทนแรงดันไม่ได้ขวดน้ำนั้นจะแตก ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 เครื่องไฮดรอลิกและกระบอกสูบไฮดรอลิก

2.4.2 การแบ่งประเภทของระบบการส่งถ่ายพลังงาน

ระบบการส่งถ่ายพลังงาน แบ่งออกได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. ระบบทางกล (Mechanical System) ใช้เพลา โซ่ หรือเฟือง เป็นตัวส่งถ่ายพลังงานจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง

2. ระบบไฟฟ้า (Electrical System) ใช้สายไฟ โดยอาศัยการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอน เป็นตัวส่งถ่ายพลังงาน

3. ระบบส่งถ่ายพลังงานโดยใช้ของไหล (Fluid Power system) ระบบนี้ทำได้โดยสร้างความดันให้กับของไหล แล้วใช้ของไหลเป็นตัวถ่ายทอดพลังงานไปทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ระบบนี้แบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1) การส่งถ่ายพลังงานด้วยของไหลชนิดที่ยุบตัวได้ (Compressible) ได้แก่ พวกก๊าซ ลมอัด เครื่องจักรกลที่ใช้ลมอัดเป็นตัวส่งถ่ายพลังงานเราเรียกระบบของเครื่องจักรนั้นว่า เครื่องจักรระบบนิวแมติกส์ (Pneumatics machine system)

2) การส่งถ่ายพลังงานด้วยของไหลชนิดที่ยุบตัวไม่ได้ (Incompressible) ได้แก่ พวกรวมของเหลว เช่น น้ำ น้ำมัน เครื่องจักรที่ใช้ น้ำมันเป็นตัวส่งถ่ายพลังงาน เราเรียกระบบของเครื่องจักรนั้นว่าเครื่องจักรระบบไฮดรอลิก (Hydraulic Mechanical System)

2.4.3 ถังน้ำมันไฮดรอลิกและระบบการกรองน้ำมัน (Hydraulic Tank and Hydraulic Filtration)

1. หน้าที่ของถังน้ำมันไฮดรอลิกมีดังต่อไปนี้

- 1) เป็นที่เก็บและพักน้ำมัน
- 2) เป็นที่ขจัดสิ่งสกปรกต่างๆ เช่น เศษผงชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฮดรอลิก น้ำ หรือ เศษอื่นๆที่ติดมากับน้ำมันไฮดรอลิก
- 3) เป็นที่ระบายความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิก
- 4) เป็นที่ขจัดฟองอากาศที่เกิดจากน้ำมันไหลฟุ้งกลับถึงน้ำมัน

การออกแบบขนาดของถังน้ำมันไฮดรอลิกนั้นควรจะเผื่อขนาดของถังน้ำมันไว้สำหรับเป็นพื้นที่ว่างด้านบนของถังน้ำมันประมาณ 10% ของปริมาณน้ำมัน ทั้งนี้เพื่อให้ฟองอากาศเรีตรอดตัวหนีขึ้นออกจากน้ำมัน

ท่อไหลกลับของน้ำมันไฮดรอลิกควรอยู่สูงจากพื้นด้านล่างของถังน้ำประมาณ 2 นิ้ว และที่ปลายท่อไฮดรอลิกควรเป็นรูปปากเฉียงเข้าหาผนังของถังน้ำมัน ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อน้ำมันไหลกลับมา นั้น จะได้วิ่งเข้าหาผนังก่อน ซึ่งทำให้สิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดมากับน้ำมันไฮดรอลิกกระทบกับผนังและตกลงด้านล่าง ต่อจากนั้นน้ำมันซึ่งได้อาสิ่งสกปรกออกแล้วบางส่วนไหลเวียน ไปอีกด้านหนึ่งของถังน้ำมัน และถูกปั๊มดูดเอาไปใช้งานต่อไป

สำหรับท่อขนาดเล็กรูปร่างอื่น ๆ นั้น ควรจะอยู่เหนือระดับน้ำมัน เพื่อป้องกันการเกิดคอลลอยด์น้ำ ในขณะที่ถอดเพื่อซ่อมแซมหรือเปลี่ยนท่อ ท่อดังกล่าวคือ ท่อจากวาล์วควบคุมความดันต่างๆ เป็นต้น

2. อุปกรณ์ที่อยู่บนถังน้ำมันไฮดรอลิก ตามปกติแล้วจะประกอบไปด้วยสิ่งต่อไปนี้

1) มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor) ใช้สำหรับขับปั๊มไฮดรอลิก วิธีการต่อเข้ากับปั๊มส่วนมากมักใช้คัปปลิง (Coupling) ชนิดยืดหยุ่นได้ (Flexible Coupling)

2) ปั๊มไฮดรอลิก (Hydraulic Pump) ทำหน้าที่ดูด และส่งน้ำมันไฮดรอลิกเข้าไปในระบบ

3) วาล์วควบคุมความดัน (Pressure Control Valves) ส่วนมากมักจะเป็นรีลิววาล์ว (Relief Valve) หรือบางครั้งอาจจะมีวาล์วควบคุมทิศทาง (Directional Control Valve) หรืออาจจะมีวาล์วอื่นๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่า จะออกแบบวงจรให้มีลำดับการทำงานหรือให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการอย่างไร บางครั้งอาจจะต้องออกแบบก๊อนแมนนิโฟลด์ (Manifold) ซึ่งทำหน้าที่ให้วาล์วต่างๆ จับยึดโดยภายในของก๊อนแมนนิโฟลด์นี้จะต้องเจาะรูน้ำมันไว้ให้น้ำมันไหลผ่านได้สะดวกแทนการเดินท่อน้ำมันภายนอก ดังนั้นปัญหาการรั่วของน้ำมันไฮดรอลิกที่เกิดจากการขันข้อต่อในระบบการเดินท่อไม่แน่นก็จะหมดไป แต่การใช้ก๊อนแมนนิโฟลด์ก็มีปัญหาเหมือนกันถ้าหากว่าผู้ออกแบบหรือผู้เจาะรูน้ำมันที่ก๊อนแมนนิโฟลด์ไม่ดี เช่น ออกแบบหรือเจาะรูให้ชิดกันมากเกินไป หรือเหล็กที่นำมาเจาะนั้นแตกหรือเป็นรอยร้าวซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำมันที่มีความดันสูงๆ เช่น ที่ความดัน 5,000 หรือ 6,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แทรกตัวถึงกันได้ เป็นผลให้การทำงานของระบบผิดพลาด ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้บางครั้งหาสาเหตุการทำงานของวงจรที่ผิดพลาดไม่เจอ บางครั้งก็ต้องทิ้งก๊อนแมนนิโฟลด์นี้ แล้วเจาะก๊อนใหม่ก็ยังมี

4) อุปกรณ์หล่อเย็น (Oil Cooler) ทำหน้าที่ระบายความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิกที่มีอุณหภูมิที่สูงเกิน 60°C พอจะสรุปได้ว่า ถังน้ำมันไฮดรอลิกจะต้องรองรับอุปกรณ์เหล่านี้รวมทั้งน้ำมันไฮดรอลิกได้ ฉะนั้นโครงสร้างจึงต้องแข็งแรง และสามารถเคลื่อนย้ายไปที่ต่างๆ ได้ จะต้องมีหูหิ้วสำหรับใช้ยกด้วยรอกหรืออุปกรณ์ทุ่นแรงอื่นๆ ได้สะดวก ด้านล่างของถังน้ำมันจะต้องมีช่องว่างเพื่อให้อากาศไหลผ่านเพื่อถ่ายเทความร้อนของน้ำมันให้กับอากาศรอบๆ บริเวณนั้นได้

2.4.4 ปั๊มไฮดรอลิกและระบบการควบคุม (Hydraulic Pump & Controls)

1. การควบคุมปั๊มด้วยวิธีชดเชยความร้อน (Pressure Compensated Control)

ปั๊มลูกสูบ (Piston Pump) ชนิดปรับปริมาตรได้ (Variable Volume) จะมีแผ่นเอียงเป็นตัวควบคุมการไหลออกของน้ำมันจากปั๊มไฮดรอลิก การเอียงของแผ่นเอียงนี้จะถูกควบคุมด้วยกลไกสปริงและความดันของน้ำมันไฮดรอลิก ความดันด้านเอาต์พุตของปั๊มจะต่ออยู่กับลูกสูบเซอร์โว (Servo Piston) โดยผ่านทางชุดสปูลชดเชย (Compensator Spool) ในจังหวะปกติสปริงจะดันให้แผ่นเอียงมีมุมเอียงสูงสุดแต่เมื่อความดันด้านเอาต์พุตสูงขึ้นทำให้ความดันนี้ชนะแรงสปริงของชุดชดเชยและยอมให้น้ำมันผ่านสปูล (Spool) ออกไปเข้าลูกสูบเซอร์โว ทำให้ความดันน้ำมันจากลูกสูบเซอร์โวไปดันให้แผ่นเอียงมุมเอียงลดน้อยลง เป็นผลให้การส่งน้ำมันออกจากปั๊มน้อยลงตามไปด้วยน้ำมันภายในของลูกสูบเซอร์โวจะถูกระบายออกทางช่องระบาย (Case) เมื่อความดันทางด้านเอาต์พุตลดน้อยลงกว่าค่าของแรงสปริง ทำให้แรงสปริงดันให้แผ่นเอียงมีมุมเอียงมากขึ้นอีกครั้งหนึ่ง และการส่งน้ำมันก็เพิ่มขึ้นอีกครั้งเช่นกัน สำหรับความดันของน้ำมันภายในห้องชดเชย (Compensator) จะมีรูภายในต่อเข้ากับช่องระบายเพื่อระบายน้ำมันออกทิ้ง

2.4.5 กระบอกลูกสูบไฮดรอลิก (hydraulic Cylinders)

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่า กำลังของระบบไฮดรอลิกนั้นประกอบด้วยค่า 2 ค่าด้วยกัน คือ แกลลอน / นาที (Gallon Per Minute – GPM) และปอนด์ / ตารางนิ้ว (Pound/Square Inch – PSI) เมื่อกำลังของระบบไฮดรอลิกส่งเข้าไปในกระบอกลูกสูบแล้ว จะทำให้กระบอกลูกสูบเปลี่ยนกำลังไฮดรอลิกให้เป็นกำลังทางกลไก (Mechanical Power) ในรูปของการเคลื่อนที่ในทิศทางตรง (Linear) หรือในรูปของการหมุน (Rotary)

1. ชนิดของกระบอกลูกสูบ (Cylinder Type)

กระบอกลูกสูบชนิดสองทิศทางมีก้านสูบเดี่ยว กระบอกลูกสูบแบบดูเพล็กซ์ กระบอกลูกสูบแบบแทนเต็ม กระบอกลูกสูบชนิดสองก้านสูบ

1) กระบอกลูกสูบชนิดแรก (Double Acting , Single Rod Cylinder) คือกระบอกลูกสูบชนิดสองทิศทาง มีก้านสูบเดี่ยววิ่งเข้า – ออกภายในกระบอกลูกสูบ

2) กระบอกลูกสูบชนิดที่สอง (Double Rod Cylinder) เป็นแบบสองทิศทาง แต่มีก้านสูบสองข้างต่อออกจากลูกสูบตรงกลางตัวเดียว

3) กระบอกลูกสูบชนิดที่สาม (Tandem Cylinder) เป็นแบบสองทิศทาง ที่มีลูกสูบตั้งแต่สองลูกเป็นต้นไป แต่มีก้านสูบเพียงอันเดียวสำหรับใช้ทำงาน

4) กระบอกลูกสูบชนิดที่สี่ (Duplex Cylinder) เป็นกระบอกลูกสูบชนิดสองทิศทาง แต่ก้านสูบไม่ต่อกัน

2. ความเร็วของก้านสูบขณะที่สูงว้างออก

ความเร็วของก้านสูบขึ้นอยู่กับว่าให้มีการบรรจุน้ำมันเข้าสู่ลูกสูบด้านลูกสูบใดเร็วเร็วเพียงใด ปกติมักวัดกันเป็นหน่วยฟุตต่อนาที (ft / min) ใช้สูตรคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ความเร็วของก้านสูบ (Rod Speed , ft/min)} = \frac{\text{แกลลอน / นาที} \times 19.25}{\text{พื้นที่ลูกสูบ (ตารางนิ้ว)}}$$

3. ข้อสรุปทั้งหมดของกระบอกสูบ

1) กระบอกสูบไฮดรอลิก เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของไหล (Fluid Power) ให้เป็นพลังงานกลในแนวเส้นตรง (Linear Mechanical Power)

2) กระบอกสูบไฮดรอลิก แบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ คือ ชนิดก้านสูบเดี่ยว (Single Rod) ก้านสูบคู่ (Double Rod) ชนิดทิศทางเดียว (Single Acting) ชนิดสองทิศทาง (Double Acting) แบบแทนเต็ม (Tandem) แบบดูเพล็กซ์ (Duplex)

3) Major Area คือพื้นที่รับความดันของน้ำมันด้านลูกสูบ (Cap End)

4) Minor Area คือพื้นที่รับความดันของน้ำมันด้านก้านสูบ (Rod End)

5) ความเร็วของกระบอกสูบ ขึ้นอยู่กับว่าให้อัตราการไหลของน้ำมันไปบรรจุในกระบอกสูบใดเร็วเร็วเพียงใด

ในอัตราการไหลของน้ำมันคงที่ ความเร็วของก้านสูบในจังหวะวิ่งกลับจะรวดเร็วกว่าจังหวะวิ่งออก

7) อัตราน้ำมันที่ไหลออกจากกระบอกสูบด้านก้านสูบของลูกสูบชนิดก้านสูบเดี่ยว (Single Rod) จะมีน้อยกว่าอัตราการส่งน้ำมันที่เข้าทางด้านก้านสูบ

8) อัตราน้ำมันที่ไหลออกจากกระบอกสูบด้านลูกสูบของลูกสูบชนิดก้านสูบเดี่ยว (Single Rod) จะมีมากกว่าอัตราการส่งน้ำมันที่เข้าทางด้านก้านสูบ

9) ทุกครั้งที่กระบอกสูบต้องการเคลื่อนที่โหลด ต้องมีแรงชนะความเสียดทานของโหลดบวกกับน้ำหนักของโหลด

10) ระบายออกแบบแท่นเต็ม (Tandem) จะให้ได้แรงเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างการใช้ระบายออกชนิดนี้คือ การที่ไม่สามารถขยายขนาดของระบายออกให้โตขึ้นได้ อันเนื่องจากขนาดของเนื้อที่หรือข้อจำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ

11) จุดประสงค์ในการใช้ระบายออกแบบคูเพล็กซ์ (Duplex) เพื่อต้องการค่าช่วงชักที่แน่นอนและการทำงานที่ช่วงชักนั้นซ้ำๆ กัน

12) ความเร็วของก้านสูบชนิดก้านสูบคู่ (Double Rod) ได้เท่ากันทั้งจังหวะวิ่งเข้าและวิ่งออก เมื่ออัตราการไหลคงที่

13) การกระทำที่ยากอย่างหนึ่งของระบายออกคือ การที่ให้ระบายออก 2 ตัววิ่งเข้า – ออก พร้อมๆ กัน

14) การเพิ่มความเร็วแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative) คือการเอาน้ำมันที่ระบายออกทางด้านก้านสูบของระบายออกกลับเข้ามาทางด้านลูกสูบอีกครั้งหนึ่ง

15) ระบายออกที่มีอัตราส่วน 2 ต่อ 1 คือระบายออกที่มีพื้นที่หน้าตัดด้านลูกสูบโตเป็น 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดด้านก้านสูบ ซึ่งมักจะใช้ในวงจรรีเจนเนอเรทีฟ

16) การคำนวณความเร็วและแรงของก้านสูบ เมื่อเป็นวงจรรีเจนเนอเรทีฟนั้นจะใช้พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบด้านพื้นที่ด้านลูกสูบ

17) ระหว่างที่เป็นวงจรรีเจนเนอเรทีฟ แรงของก้านสูบจะได้น้อยลงแต่ความเร็วจะเพิ่มขึ้น

18) การที่ซีลของระบายออกสูบน้ำมันจะมีผลต่อความเร็วของก้านสูบ และทำให้เกิดความดันเพิ่มขึ้นในจุดต่างๆ ในบางกรณี

19) ความดันจะเพิ่มสูงมากทางด้านก้านสูบ เมื่อระบายออกตัวนั้นถูกควบคุมอัตราการไหลแบบมิเตอร์ – เอาต์ (Meter – Out) หรือมีวาล์วกั้นกระแทก (Cushion)

2.4.6 วงจรไฮดรอลิก (Hydraulic Circuits)

ระบบไฮดรอลิก ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ ชุดต้นกำลัง (Power Unit) วาล์วควบคุมทางด้าน (Pressure Control Valve) วาล์วควบคุมทิศทางการไหลของน้ำมัน (Directional Control Valve) วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำมัน (Flow Control Valve) อุปกรณ์ทำงาน (Actuator) ระบบท่อทาง (Piping System) และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ (Accessories)

การนำเอาระบบไฮดรอลิกไปใช้งานกับเครื่องจักรจะต้องนำเอาอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้มาต่อ
 ร่วมกัน เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องจักรให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เรียกว่า วงจร
 ไฮดรอลิก การนำวงจรไฮดรอลิกไปใช้งานนั้นมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์
 ของผู้ใช้งานที่ต้องการลักษณะการทำงานเป็นแบบใด ถ้าเป็นการทำงานที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน วงจรที่ใช้จะ
 เป็นแบบธรรมดาแต่บางครั้งอาจนำวงจรต่างๆ มารวมกันเพื่อควบคุมการทำงานที่ซับซ้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับ
 กับการพิจารณาเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน [9]

2.5 โลหะที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุประเภทโลหะ (Metals) คือวัสดุที่ได้จากการถลุงสินแร่ต่างๆ ได้แก่ เหล็ก ทองแดง
 อลูมิเนียม นิกเกิล สังกะสี ทองคำ ตะกั่ว เป็นต้น โลหะเมื่อถลุงได้จากสินแร่ในตอนแรกนั้น ส่วน
 ใหญ่จะเป็นโลหะเนื้ออ่อนข้างบริสุทธิ์ โลหะเหล่านี้มักจะมีเนื้ออ่อนไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะนำมาใช้
 ในงานอุตสาหกรรมโดยตรง ส่วนมากจะนำไปปรับปรุงคุณสมบัติก่อนการใช้งาน

2.5.1 คุณสมบัติของวัสดุประเภทโลหะที่ต้องการในงานอุตสาหกรรม

1. เป็นตัวนำความร้อนได้ดี
2. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
3. มีความคงทนถาวรตามสภาพ
4. ไม่เสื่อมสลายหรือเปลี่ยนแปลงสถานะภาพง่าย
5. เป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ ยกเว้นโลหะปรอท
6. มีความแข็งและความเหนียวสูง ยกเว้นโลหะปรอท
7. ผิวมันขาว
8. มีการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045

Hardness, Brinell	187
Hardness, Knoop	209
Hardness, Rockwell B	90
Hardness, Rockwell C	10.0
Hardness, Vickers	196
Tensile Strength, Ultimate	655 MPa
Tensile Strength, Yield	585 MPa
Elongation at Break	12.0 %
Reduction of Area	35.0 %
Modulus of Elasticity	200 GPa
Bulk Modulus	140 GPa
Machinability	56 %
Shear Modulus	80.0 GPa

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045 (อบอ่อน)

Hardness, Brinell	170
Hardness, Knoop	191
Hardness, Rockwell B	86
Hardness, Vickers	178
Tensile Strength, Ultimate	585 MPa
Tensile Strength, Yield	505 MPa
Elongation at Break	12.0 %
Reduction of Area	45.0 %
Modulus of Elasticity	205 GPa
Bulk Modulus	140 GPa
Machinability	65 %
Shear Modulus	80.0 GPa

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 1045

Carbon, C	0.420 - 0.50 %
Iron, Fe	98.51 - 98.98 %
Manganese, Mn	0.60 - 0.90 %
Phosphorous, P	≤ 0.040 %
Sulfur, S	≤ 0.050 %

2.5.2 ประเภทวัสดุโลหะ วัสดุโลหะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. วัสดุโลหะประเภทเหล็ก (Ferrous Metals) หมายถึง โลหะที่มีพื้นฐานเป็นเหล็ก ประกอบอยู่ ได้แก่ เหล็กเหนียว เหล็กหล่อ เหล็กกล้า ฯลฯ เป็นวัสดุโลหะที่ใช้กันมากที่สุดในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง สามารถปรับปรุงคุณภาพและเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้หลายวิธี เช่น การหล่อ การกลึง การอัดรีดขึ้นรูป เป็นต้น

2. วัสดุโลหะประเภทไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferrous Metals) หมายถึง โลหะที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเหล็กเลยในขณะที่เป็นโลหะบริสุทธิ์ ได้แก่ ดีบุก อลูมิเนียม สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง ทองคำ เงิน ทองคำขาว แมกนีเซียม พลวง เป็นต้น วัสดุโลหะประเภทที่ไม่ใช่เหล็กนี้ บางชนิดราคาสูงกว่าเหล็กมาก จึงต้องกำหนดใช้กับงานทางอุตสาหกรรมบางประเภทที่เหมาะสมเท่านั้น เช่น ทองแดง ใช้กับงานไฟฟ้า ดีบุกใช้กับงานที่ต้องการทนต่อการกัดกร่อนเป็นสนิมอลูมิเนียมใช้กับงานที่ต้องการน้ำหนักเบา เป็นต้น

2.5.3 ความสำคัญของเหล็ก

แร่โลหะเป็นสิ่งที่เกิดในธรรมชาตินับล้านปี แต่มนุษย์ที่เพิ่งรู้จักแยกโลหะจากแร่เพื่อนำมาใช้ประโยชน์เมื่อไม่นานมานี้เอง เพราะจากการสำรวจของนักโบราณคดี ได้พบสิ่งของเครื่องใช้ภายในพีระมิดทำด้วยทองคำ เงิน ทองแดง และบรอนซ์ มนุษย์ในสมัยนั้นยังไม่รู้จักเหล็ก เพราะเตาถลุงแร่สมัยนั้นใช้สำหรับหลอมทองแดง และทองคำ ซึ่งไม่ร้อนพอที่จะใช้หลอมเหล็กให้ละลายได้ มนุษย์เพิ่งค้นพบวิธีการหลอมละลายเหล็กได้ราว 2,000 B.C.2 ปัจจุบันมนุษย์ได้นำเอาเหล็กมาใช้ประโยชน์ในกิจการต่างๆ อย่างมากมายและรู้จักวิธีการผลิตเหล็กชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมแก่การ

นำไปใช้งานเหล็กที่ผลิตนั้นถูกลงจากสินแร่ทั้งสิ้นและนำไปผ่านกระบวนการผลิต (Manufacturing Process) จนนำไปผลิตเป็นเครื่องมือ อุปกรณ์และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่นๆ ที่เกิดประโยชน์ต่อไป

เหล็กเป็นวัสดุอีกอย่างที่สำคัญที่สุดเพราะถือว่าเป็นวัสดุพื้นฐานของอุตสาหกรรมทั้งหลาย เพราะเรานำเหล็กนำมาใช้งานทั้งทางตรง เช่น ยานพาหนะ หรือเครื่องใช้ต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นจากเหล็ก และนำมาใช้งานทางอ้อม เช่น อาหาร สิ่งทอ หรือสิ่งพิมพ์ ซึ่งผลิตซึ่งจากเครื่องจักรที่สร้างขึ้นจากเหล็กแร่เหล็กที่พบในธรรมชาติเกิดเป็นสารประกอบของเหล็กกับธาตุอื่นๆ ผสมปนกันอยู่ในดินและหินแร่เหล็กที่ได้จากการทำเหมืองแร่ นั้น จะต้องนำมาผ่านกระบวนการในการถลุงเพื่อทำให้บริสุทธิ์ขึ้นเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

เหล็กกล้า (Steel) เป็น โลหะที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในปัจจุบัน เหล็กกล้ามีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.1-1.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ทำให้เหล็กกล้ามีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เหล็กกล้าถูกนำมา ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างมาก นอกจากปริมาณของธาตุคาร์บอนแล้ว ยังมีการผสมธาตุต่างๆ ในเนื้อเหล็กกล้าอีกด้วย เช่น โครเมียม นิกเกิล ทังสแตน วาเนเดียม โมลิบดีนัม เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าให้ดีขึ้น เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเฉพาะอย่าง เช่น ทนต่ออุณหภูมิได้สูง ทนต่อกาเสียดสี ทนต่อการกัดกร่อน มีความแข็งแรงสูงขึ้น เหล็กกล้าแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1. เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอน เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนเป็นหลัก อาจจะมีธาตุอื่นผสมอยู่ได้บ้างเล็กน้อย เช่น ซิลิคอน แมงกานีส กำมะถัน ฟอสฟอรัส เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกได้หลายชนิดตามปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก จะทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน และนำไปใช้งานในลักษณะต่างกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จัดได้ว่าเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้อยที่สุด คือ มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.10 – 0.30% โดยน้ำหนักกำหนดตามมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1010 - 1030 กำหนดมาตรฐานเยอรมัน คือ S137 เนื่องจากมีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่น้อย ทำให้มีความแข็งแรงต่ำไม่สามารถนำไปทำการชุบแข็งได้ เหมาะสำหรับนำไปใช้งานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก เช่น นำไปรีดเป็นแผ่น ทำถังบรรจุของเหลว นำไปทำเป็นเหล็กเส้นใช้ในงานก่อสร้าง ดังแสดงในภาพที่



ภาพที่ 2.7 เหล็กกล้าคาร์บอนดำนำมาผลิตถังบรรจุ [10]

2. เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ คือมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.31-0.55% โดยน้ำหนัก กำหนดตามมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1031-1055 กำหนดตามมาตรฐานเยอรมัน คือ St 50สามารถนำไปปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน โดยการนำไปชุบแข็ง (Hardening) คือนำชิ้นงานไปเผาให้ร้อนเพื่อให้เหล็กเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งการจะใช้อุณหภูมิสูงขนาดไหนขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ จากนั้นทำให้เย็นตัวลงโดยเร็ว เหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาเทนไซต์ (Martensite) ซึ่งเหล็กจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เหล็กกล้าชนิดนี้นำไปใช้ผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรง เช่น เพลาส่งกำลัง เฟืองในเครื่องจักรต่าง ๆ

3. เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในเนื้อสูงสุด คือมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.56 – 1.5% โดยน้ำหนัก กำหนดมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1056 – 1090 กำหนดมาตรฐานเยอรมัน คือ St 170 เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูง นำไปผลิตเครื่องมือคมตัดต่างๆ เช่น มีดคี่ง ดอกสว่าน ดอกคว้านละเอียด ดอกทำเกลียว ใบเลื่อย ตะไบ ซึ่งเครื่องมือคมตัดต่างๆ เหล่านี้ จะนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป ตามขนาด และรูปร่าง แล้วนำชิ้นงานไปปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน โดยการนำไปชุบแข็ง (Hardening) ซึ่งจะทำงานมีความแข็งแรงสูงมาก แต่เมื่อได้รับแรงกระแทกจะเปราะหักได้ง่าย

2.5.4 มาตรฐานเหล็กอเมริกัน

มาตรฐานเหล็กอเมริกันแยกเป็น 2 มาตรฐาน คือ

1. มาตรฐาน AISI (The American Iron and Steel Institute)
2. มาตรฐาน SAE (The Society of Automotive Engineers)

กำหนดมาตรฐานใช้ตัวเลข 4 ตัว เป็นตัวกำหนด โดยตัวเลขตัวที่หนึ่งบอกชนิดของเหล็กว่าเป็นเหล็กอะไร เลขตัวที่สองเป็นตัวบอกปริมาณส่วนผสมในเนื้อเหล็ก และสองตัวสุดท้ายบอกถึงปริมาณคาร์บอน

- 10 XX = เหล็กคาร์บอนธรรมดา
- 11 XX = เหล็กคาร์บอนที่เหมาะสมแก่งานปาดผิว
- 13 XX = เหล็กแมงกานีส (Mn 1.75%)
- 2 XXX = เหล็กนิกเกิล
- 3 XXX = เหล็กโครเมียมและนิกเกิล
- 40 XX = เหล็กโมลิบดีนัม (Mo 0.2-0.25%)
- 41 XX = เหล็กโมลิบดีนัม (Cr < 0.95%, Mo < 0.30%)
- 43 XX = เหล็กโมลิบดีนัม โครเมียมและนิกเกิล (Mo 0.25%, Cr < 0.80%, Ni 1.83%)
- 46 XX = เหล็กโมลิบดีนัมและ < 1.83% นิกเกิล
- 48 XX = เหล็กโมลิบดีนัมและ 3.50% นิกเกิล
- 5 XXX = เหล็กโครเมียม
- 6 XXX = เหล็กโครเมียมและวานาเดียม
- 7 XXX = เหล็กโครเมียมและวูลแฟรม
- 9 XXX = เหล็กซิลิกอนและแมงกานีส

มาตรฐาน AISI จะกำหนดมาตรฐานดังที่กล่าวมาแล้ว สถาบัน AISI ยังกำหนดมาตรฐานเหล็กกล้าเครื่องมือตามลักษณะเทคนิคการชุบแข็ง ซึ่งปัจจุบันได้รับการยอมรับจากผู้ใช้เป็นจำนวนมาก โดยแบ่งเหล็กเครื่องมือออกเป็น 7 กลุ่ม คือ

1) เหล็กกล้าชุบแข็งด้วยน้ำ (Water Hardening) ใช้สัญลักษณ์ “W” โดยแบ่งตามปริมาณคาร์บอนได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกมีปริมาณคาร์บอน 0.6-0.75% กลุ่มนี้จะให้ความสำคัญความเหนียวมากกว่าความแข็ง กลุ่มที่สองมีปริมาณคาร์บอน 0.75-0.95% ให้ความสำคัญความเหนียวและความแข็งอยู่ในเกณฑ์ปานกลางกลุ่มสามมีปริมาณ 0.95-1.4% กลุ่มนี้ให้ความสำคัญกับความแข็งสูง เหล็กเกรด “W” แบ่งตามชั้นคุณภาพจะมีอยู่ 4 ชั้นคุณภาพ คือ W1, W2, W4 และ W5 (รายละเอียดศึกษาจากคู่มือ)

2) เหล็กกล้าทนแรงกระแทก (Shack – resisting) ใช้สัญลักษณ์ “S” ใช้สำหรับงานที่มีการกระแทกซ้ำ ๆ กัน มีความเหนียวเป็นพิเศษมาตรฐานนี้ แบ่งชั้นคุณภาพออกเป็น 7 ชั้น คือ S1-S7 (รายละเอียดศึกษาจากคู่มือ)

3) เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Color Work Tool Steel) เป็นหลักใช้ทำเครื่องมือตัดสำหรับใช้งาน ณ อุณหภูมิปกติ เช่น กรรไกรตัดเหล็กงานแม่พิมพ์ตัดโลหะ เป็นต้น สัญลักษณ์แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกใช้สัญลักษณ์ “O” มี 4 ชั้น คุณภาพ O1, O2, O6, O7 เหล็กกลุ่มนี้จะชุบแข็งด้วยน้ำมัน (Oil hardening) กลุ่มที่สองใช้สัญลักษณ์ “A” คือ ต้องชุบแข็งด้วยลม (Air hardening) แบ่งชั้นคุณภาพเป็น 8 ชั้นคุณภาพ คือ A2-A10 กลุ่มสามใช้สัญลักษณ์ “D” เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมคาร์บอนและโครเมียมสูงทำให้ทนการสึกหรอได้เป็นพิเศษ แบ่งชั้นคุณภาพออกเป็น 5 ชั้น คุณภาพตั้งแต่ D2-D7

4) เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot Working Tool Steel) ใช้สำหรับงานทำเครื่องมือ ใช้งานขณะร้อน (Hot Working) ใช้สัญลักษณ์ “H” แบ่งชั้นคุณภาพเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรก เป็นชั้นคุณภาพตั้งแต่ H10-H19 ชุบแข็งโดยน้ำมันหรือลม ความแข็งหลังชุบ 40-50 HRC. กลุ่มสอง คือ ชั้นคุณภาพ H21- H26 ชุบด้วยน้ำหรือน้ำมัน ความแข็งหลังชุบเท่ากับกลุ่มแรกแต่สามารถรักษาคุณสมบัติทางด้านความแข็ง ณ อุณหภูมิที่สูงกว่า กลุ่มสามชั้นคุณภาพ H41-H43 มีคุณสมบัติพิเศษกว่ากลุ่มแรกด้านทานการแตกร้าวได้ดีกว่า และมีราคาถูกกว่า การชุบต้องใช้เวลาที่ควบคุมบรรยากาศ

5) เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High Speed Tool Steels) เป็นวัสดุสำหรับสร้างเครื่องมือตัด เช่น ดอกสว่าน มีด กัด ฯลฯ มาตรฐาน AISI จัดเหล็กกลุ่มนี้ออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรก คือ กลุ่มทังสแตนเป็นหลัก (Tungsten Base) ใช้สัญลักษณ์ “T” แบ่งออกเป็นชั้นคุณภาพได้ 7 ชั้น ตั้งแต่ T1-T15(รายละเอียดศึกษาจากคู่มือ)

6) เหล็กกล้าเครื่องมือแม่พิมพ์พลาสติก (Plastic Mold Steel) เป็นเหล็กมาตรฐานผลิตขึ้นมาใช้สำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก ใช้สัญลักษณ์ “P” แบ่งออกตามการอบชุบได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรก เป็นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาก่อน ชั้นคุณภาพ P20 และ P21 สามารถนำไปใช้งานได้เลย กลุ่มที่สองเป็นเหล็กที่ใช้สำหรับการชุบแข็งพื้นผิว (Case Hardening Steel) ชั้นคุณภาพมีตั้งแต่ P2-P5 กลุ่มสาม คือ กลุ่มที่ใช้สำหรับงานที่มีแรงกดคั้นมากและความแข็งที่ผิวสูง การควบคุมขนาดภายหลังการชุบแข็งที่แน่นอนสามารถชุบแข็งให้ความแข็งทั้งชิ้นไม่ปรากฏมาตรฐานในกลุ่ม P แต่จะอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค (AISI 420) (ดูรายละเอียดจากคู่มือ)

7) เหล็กกล้าเครื่องมือพิเศษ (Special Purpose Tool Steel) เป็นเหล็กกล้าที่ผลิตขึ้นมา มีจุดประสงค์การใช้งานเฉพาะด้าน สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่มสัญลักษณ์ “L” ประกอบด้วยส่วนผสมคาร์บอน 0.5-1.0% มีธาตุหลักคือโครเมียม 0.75-1.5% มี 3 ชั้นคุณภาพ คือ L2, L3, L6 (รายละเอียดดูจากคู่มือ) ส่วนกลุ่มสัญลักษณ์ “F” มี 2 ชั้นคุณภาพ ธาตุผสมหลักมีเพียงธาตุเดียวคือทังสเตน จึงให้คุณภาพทางด้านความแข็งสูงกว่าเหล็กเกรด W หลายเท่า แบ่งชั้นคุณภาพออกเป็น 2 ชั้น คือ F1 และ F2 (รายละเอียดดูจากคู่มือ) [10]

2.6 กระบวนการเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุ

2.6.1 การอบอ่อนหรือการอบให้อ่อนตัวสูง (Annealing)

มีความมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กที่ผ่านการผลิตต่าง ๆ มา เช่น การขึ้นรูปร้อน (Forging , Hot Rolling) การขึ้นรูปเย็น (Cold Rolling , Drawing) การเชื่อม หรือผ่านการหล่อ (Casting) ซึ่งเหล็กที่ผ่านขั้นตอนการผลิตดังกล่าวนี้ จะมีคุณสมบัติที่ไม่ดีหลายประการ ดังนี้

เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน จะมีคุณสมบัติที่ไม่สม่ำเสมอตามส่วนที่มีมุมแหลม ซึ่งอัตราการเย็นตัวสูงจะมีความแข็งมากกว่าส่วนอื่นๆ โครงสร้างของเหล็กบริเวณผิวจะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กเพราะถูกแรงกระแทกหรืออัดมากกว่าเนื้อเหล็กภายใน ทำให้มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอถึงภายในเช่นเดียวกัน

เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น มักจะมีความเครียดที่เกิดจากการถูกแรงอัด หรือบีบเหล็กค้างอยู่มีส่วนทำให้มีความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอ สูญเสียความเหนียว (Ductility)

เหล็กที่ผ่านงานเชื่อม เช่นเดียวกัน การเชื่อมเป็นการทำให้เหล็กร้อนเป็นบางจุด การขยายตัวเมื่อถูกความร้อนและการหดตัวเมื่อถูกปล่อยให้เย็นย่อมจะเป็นการยากที่จะทำให้ได้ทั่วถึง มักจะเกิดความเครียดเหลือค้าง และ โครงสร้างของเนื้อเหล็กบริเวณจุดที่ทำการเชื่อมจึงต่างกับเนื้อเหล็กในส่วนอื่นๆที่ไม่ถูกความร้อนจากการเชื่อม คุณสมบัติของเหล็กจะขาดความสม่ำเสมอ

เหล็กที่ผ่านงานหล่อ ย่อมมองเห็นได้ง่ายว่าโครงสร้างและคุณสมบัติของเหล็กจะมีส่วนที่แตกต่างกันมากเพราะอัตราการเย็นตัวของเหล็กในแบบหล่อ (ซึ่งส่วนมากใช้ทรายเป็นวัสดุที่ทำแบบหล่อ) จะแตกต่างกันทั้งส่วนที่หนาและส่วนที่บาง ยิ่งส่วนที่เป็นแ่งมุมการเย็นตัวจะยิ่งเร็วกว่าส่วนอื่น จึงมักจะมีความแข็งสูง

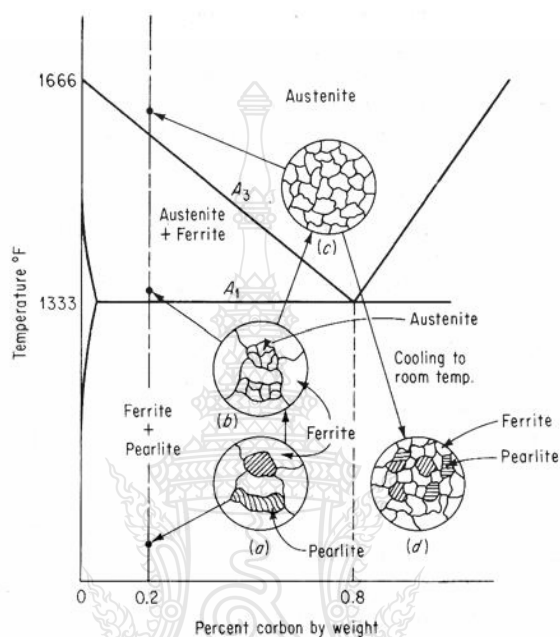
จากที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่า การที่จะนำเอาเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีขึ้นรูปต่างๆไปใช้งาน หรือนำไปตัด เจาะ กลึง ใส ย่อมจะทำให้อุปสรรคในลักษณะต่างๆ ที่พอจะมองเห็นได้ชัดเจน เช่น การกลึงหรือใส ถ้าเหล็กมีความแข็งไม่เท่ากันทุกส่วน การปรับมุมของมีดกลึง หรือตั้งอัตราความเร็วในการตัด จะเกิดปัญหามากมาย และผลงานที่ได้รับก็ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปมาก่อนจะนำไปใช้งานหรือฟอร์มรูปร่างในขั้นต่อๆ ไปจำเป็นจะต้องผ่านการอบให้อ่อนตัว ซึ่งลักษณะของการทำงานมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์สุดท้าย

2.6.2 การอบอ่อนสมบูรณ์ (Full Annealing)

การอบอ่อนสมบูรณ์ประกอบด้วยทำให้ความร้อนกับเหล็ก ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม (Proper Temperature) แล้วปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) อย่างช้าๆ ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของเฟสออสเทนไนท์ไปสู่เฟสอื่นๆ (ส่วนใหญ่โครงสร้างที่ได้ คือ เฟอร์ไรท์ อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี และอัตราการเย็นตัวเป็นสำคัญ) โดยปกตินิยมให้เย็นตัวในเตา (Air-Cooled) หรือปล่อยให้เย็นในวัสดุกันความร้อน (Insulating Material) จนถึงอุณหภูมิห้อง

จุดประสงค์ของการอบอ่อนเป็นไปได้ทั้ง ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง (Refine Grain) ทำให้เหล็กมีความอ่อนตัว (Soften) ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (Improve Electrical and Magnetic Properties) และในบางกรณีเพื่อปรับปรุงความสามารถในการกลึง ใส (Improve Machinability) เนื่องจากอุปกรณ์เตาที่ซับซ้อน และชิ้นงานเองต้องปล่อยให้เย็นไปพร้อมๆ กัน ด้วยเหตุนี้การอบอ่อนจึงเป็นกระบวนการที่เย็นตัวอย่างช้าๆ ใกล้เคียงกับระบบสมดุลในแผนภูมิเหล็ก เหล็กคาร์ไบด์ผสมดีว่ามีเหล็กที่มีคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ และมีเกรนหยาบ (จัดเป็นเหล็กกล้าไฮโปยู

เทคนิค) หากต้องการปรับปรุงขนาดเกรนให้เล็ก (Refine Grain) สามารถทำได้โดยการอบอ่อน (Annealing) ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน ๐.๒ ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง สามารถอธิบายได้ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.8

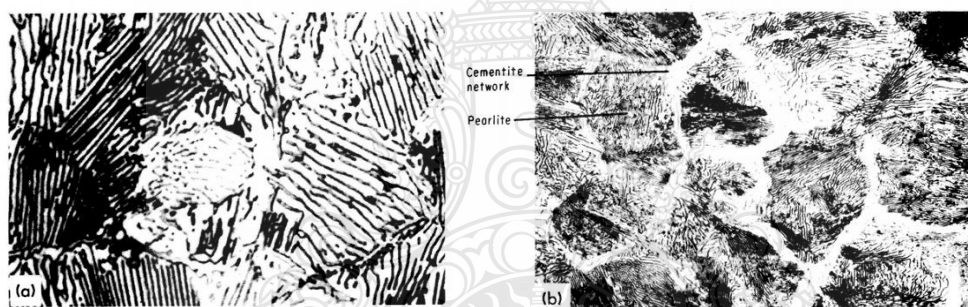


ภาพที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการอบอ่อนในเหล็กกล้าคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ [11]

- (a) โครงสร้างเดิมที่มีเกรนหยาบของเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไรต์
- (b) เนื้อเส้น A1 เล็กน้อย เพิร์ลไรต์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนต์ ในขณะที่เฟอร์ไรต์ไม่เปลี่ยนแปลง
- (c) เนื้อเส้น A3 มีเพียงเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนต์
- (d) หลังจากเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กของเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไรต์

เมื่อให้ความร้อนกับเหล็กจนถึงอุณหภูมิ ณ จุด (a) โครงสร้างพื้นฐานยังคงเป็นเกรนหยาบของเฟอร์ไรต์-เพิร์ลไรต์ จนกระทั่งให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ จนเนื้อเส้น A1 เล็กน้อย เพิร์ลไรต์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยปฏิกิริยายูเทคตอยด์เป็นเกรนขนาดเล็กของออสเทนไนต์ ณ จุด (b) ถ้าปล่อยให้

เย็นตัวจากอุณหภูมิ ณ จุด (b) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนตามต้องการแต่เมื่อให้ความร้อนต่อไปอยู่ระหว่างเส้น A1 และ A3 ทำให้เกรนของเฟอร์ไรท์ขนาดโตบางส่วนเปลี่ยนแปลงไปเป็น ออสเตนไนท์ จนกระทั่งให้ความร้อนเหนือเส้น A3 โครงสร้างเป็นออสเตนไนท์ที่มีขนาดเล็กทั้งหมด (จุด C) หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาโครงสร้างสุดท้ายที่ได้ คือ เกรนขนาดเล็กของ เฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์ ด้วยเหตุนี้อาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้สำหรับอบอ่อนเหล็กกล้าไฮโปยูเทคติก คือ 10°C (50°F) เหนือเส้น A3 สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ (เหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์) แนะนำให้ใช้อุณหภูมิสำหรับอบอ่อนที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_{3,1} ประมาณ 10°C (50°F) อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงพบว่าหากอบอ่อนเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคติก ณ อุณหภูมิเหนือเส้น A_{3,1} ประมาณ 10°C (50°F) พบว่าโครงสร้างประกอบด้วยเกรนหยาบของเพิร์ลไรท์ล้อมรอบด้วยโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ (Pro-Eutectoid Cementite) ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค

- (a) เหล็กกล้าคาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังขยาย 500 เท่า
 (b) เหล็กกล้าคาร์บอน 1.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ที่กำลังขยาย 300 เท่า [11] โครงสร้างเพิร์ลไรท์ ล้อมรอบด้วยโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ ข้อสังเกตความหนาของชั้นโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์แปรตามปริมาณคาร์บอน (1)

เนื่องจากโครงข่ายซีเมนไตต์ (Cementite Network) เปราะและมีแนวโน้มเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกด้วยเหตุนี้จึงไม่แนะนำให้ทำอบอ่อนชิ้นงาน (Annealing) ในเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (คาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์) เป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำไปใช้งานนอกจากนี้ชั้นของโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ยังทำให้การกลึง ไซ เป็นไปได้ยาก การศึกษาอัตราส่วนโครงสร้างของเฟอร์ไรท์-

เฟิร์ลไรท์ (ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์) หรือโครงสร้างเฟิร์ลไรท์-ซีเมนไตต์ (ในเหล็กกล้าคาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์) ในเหล็กที่ผ่านการอบอ่อน (Annealing) ดังแสดงในภาพที่ 2.10

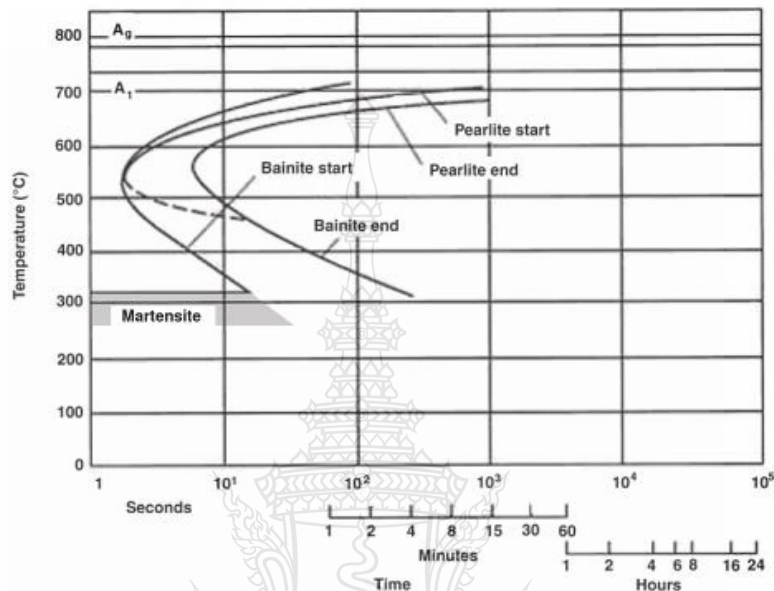


Fig. 1 Time-temperature transformation diagram of an unalloyed steel containing 0.45% C. Austenitizing temperature: 880 °C. Source: Ref 1

ภาพที่ 2.10 TTT-diagram ของเหล็ก AISI 1045 [11]

นอกจากนี้ยังสามารถประมาณการค่าความแข็งแรงดึง (Approximate Tensile Strength) ของเหล็กกล้าคาร์บอน (น้อยกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน) ได้จากสมการ

$$Approx\ Tensile\ Strength = \frac{4000\% Ferrite + 120000\% Pearlite}{100} \tag{2.1}$$

ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ผ่านการอบอ่อน แล้วประกอบด้วย 25% เฟิร์ลไรท์ และ 75% เพอร์ไรท์ จากสมการที่ 2.1

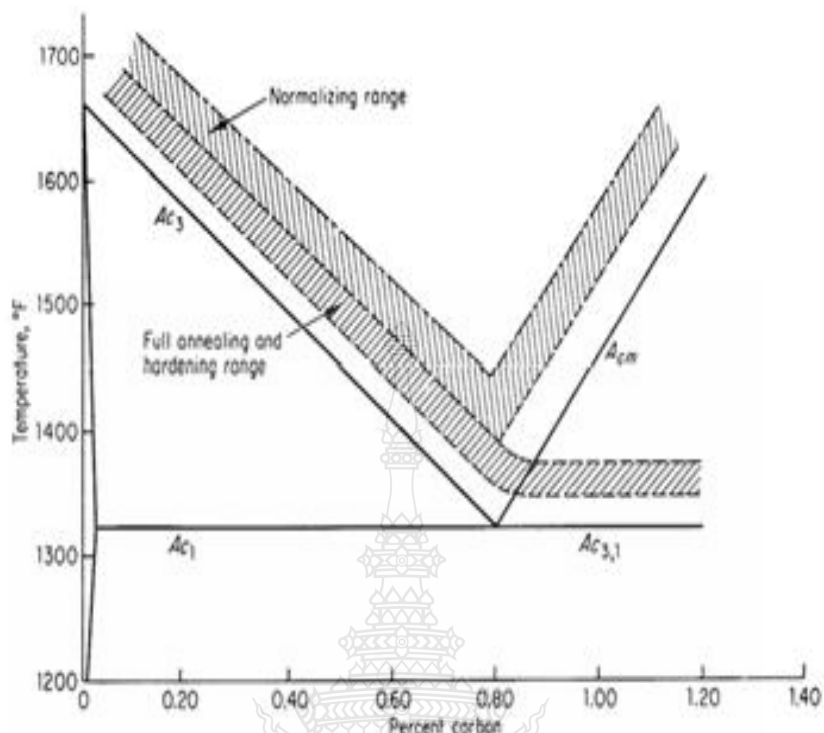
$$Approx\ Tensile\ Strength = 4000(0.75) + 120000(0.25) = 60000\ psi$$

อย่างไรก็ตามหลักการดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้ประมาณค่าความแข็งแรงดึงในเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงข่ายซีเมนต์ไตต์ (Cementite Network) ล้อมรอบทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงดังแสดงในตาราง 1 และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อนในเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีคาร์บอนต่างๆ ดังแสดงได้ในตารางที่ 2.4 และแสดงในภาพที่ 2.11

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลของเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อน (Annealing) และการอบปกติ

(Normalizin) [11]

Carbon, %	Yield Point, 1000 psi	Tensile Strength, 1000 psi	Elongation, % in 2 inch	Reduction in Area, %	BHN
Annealed:					
0.01	18	41	47	71	90
0.20	36	59	37	64	115
0.40	44	75	30	48	145
0.60	49	96	23	33	190
0.80	52	115	15	22	220
1.00	52	108	22	26	195
1.20	51	102	24	39	220
1.40	50	99	19	25	215



ภาพที่ 2.11 ช่วงอุณหภูมิสำหรับการอบชุบความร้อน (Hardening Range) การอบอ่อน (Annealing) และการอบปกติ (Normalizing) ในเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon Steels) [11]

ในกรณีของเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ อัตราการให้ความร้อนประมาณ $30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ ต่อชั่วโมงขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นเหล็ก ถ้ารูปร่างเป็นแท่งตันอาจจะเผาที่อัตราสูงและควรจะใช้อัตราต่ำเมื่อแท่งเหล็กมีความหนาที่แตกต่างกันมากเมื่อเผาจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วควรที่จะทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 30 - 60 นาที ต่อความหนาเฉลี่ย 25 มม. หลังจากนั้นปล่อยให้เหล็กเย็นช้าๆ ในอัตรา $150^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ ต่อชั่วโมง ในทางปฏิบัติปล่อยให้เย็นในเตา (Furnace cooled) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กจะเป็นไปในลักษณะใกล้เคียงสภาพสมดุล โครงสร้างที่เป็นอยู่ก่อนการอบอ่อน ซึ่งอาจจะเป็นมาร์เทนไซต์ เบนไนท์ หรือซอร์ไบท์ จะเปลี่ยนเป็นเฟอไรต์ สำหรับเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์จะเป็นเฟอไรต์กับซีเมนต์ไตต์ ส่วนยูเทคตอยด์ไม่มีปัญหาจะได้โครงสร้างเป็นเฟอไรต์เพียงอย่างเดียว [11]

2.7 การตรวจสอบวัสดุทางโลหะวิทยา (Metallographic Investigation Methods)

คุณสมบัติและประโยชน์ที่สำคัญของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานคือ คุณภาพ โลหะวิทยาของรอยเชื่อม ซึ่งเกิดจากอัตราความเร็วของการกระจายความร้อนในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของโลหะในช่วงที่เกิดพลาสติกในรูปของงานร้อนหรือบางกรณีจะเป็นงานเย็นระหว่างช่วงการอัด ดังนั้นโครงสร้างของเม็ดเกรนจะละเอียดมาก เมื่อโครงสร้างของโลหะในช่วงที่เกิดแรงบิดเพิ่มมากขึ้น จากผลที่เกิดขึ้นจะเป็นการเนียนตัดผ่านออกไซด์หรือโลหะที่เรียกว่า “ Mastication ” ทำให้เชื่อมโลหะต่างชนิดกันได้ แตกต่างจากการเชื่อมแบบทำราบคือจะไม่เกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนของการหลอมละลาย ผลของการเชื่อมมีลักษณะทางโลหะวิทยาที่ดี แต่ถ้ามีอัตราการเย็นตัวอาจเกิดการเสียหายได้ จากการทดสอบจะพบว่าเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมมากขึ้นหรือเกิดอุณหภูมิของการเชื่อมสูงสุด ควรจะมีการหล่อเย็นเพื่อให้อุณหภูมิต่ำลง สำหรับเหล็กที่คาร์บอน 0.45 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสูงสุดที่จำเป็นคือ 1300°C และต้องไม่ปล่อยให้เกิดอุณหภูมิของการเติบโตของเกรน ซึ่งเกิดในช่วง 100°C เราเพียงขยายอัตราการเย็นตัวของโลหะ โดยยืระยะเวลาที่อุณหภูมินี้ในการปฏิบัติรอยต่อของการอัดจะทำการลดขนาดของเกรน แต่ถ้าใช้เวลานานมากเกินไปจะทำให้ปริมาณรอยยุบมาก ดังนั้นในการเชื่อมแบบเสียดทานกับเหล็กเหนียวที่มีความแข็งแรงสูงจึงควรทำการอบอ่อนภายหลังการเชื่อม

2.7.1 การตรวจสอบ โครงสร้างมหภาค (Macroscopic)

การตรวจสอบงานเชื่อม โลหะด้วยการตรวจสอบแบบมหภาคเพื่อจุดประสงค์บางประการ ดังนี้ ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม จำนวนชั้นของแนวเชื่อม บริเวณที่มีผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) สแตกฝั่งในการเชื่อมของแนวเชื่อม และรูพรุนของงานเชื่อมการเตรียมชิ้นทดสอบ (Macro specimen) โดยการกัดผิวแล้วกัดด้วยน้ำยาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) หรือใช้กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่าเข้าช่วย การตรวจสอบที่ให้ผลดีที่สุดนั้นผู้ตรวจสอบต้องรับผิดชอบและควบคุมการตรวจสอบตามวิธีอย่างถูกต้อง และพิจารณารอยบกพร่องที่ปรากฏเปรียบเทียบกับเกณฑ์การตัดสินตรวจสอบเพื่อสรุปผลว่าชิ้นงานนั้นยอมรับได้หรือไม่

2.7.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope)

1. การเตรียมชิ้นตรวจสอบ

1) การเตรียมชิ้นตรวจสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาด

2) การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ หรือผิวชิ้นงาน ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 200 400 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหน้าเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นงานตรวจสอบ ไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย [12]

อนึ่ง การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด

3) การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium oxide) หรืออาจใช้เพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05 – 0.3 ไมครอน และการขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผลขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

4) การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อขึ้นตรวจสอบถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบรอยแล้ว ซึ่งผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของกล้องจุลทรรศน์จากคู่มือการใช้เครื่องให้เข้าใจและเกิดทักษะเสียก่อน

2.7.3 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) คือ เครื่องมือขยายขอบเขตของประสาทสัมผัสทางตาให้เห็นสิ่งที่ไม่สามารถเห็นด้วยตาเปล่า เช่น จุลินทรีย์ เซลล์เม็ดเลือด เป็นต้น

1. ประโยชน์ของกล้องจุลทรรศน์

- 1) ช่วยในการมองเห็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กกว่าตาเราจะมองเห็น
- 2) ช่วยในการศึกษาหาข้อมูลหลักฐานทางชีววิทยา

2. หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องช่วยตาในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเซลล์ให้ละเอียดยิ่งขึ้นซึ่งกล้องจุลทรรศน์มีความสามารถขยาย (Magnification) ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุด ซึ่งอยู่ใกล้กันที่สุดให้มองเห็น แยกเป็นสองจุดได้ (Two point of discrimination) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ส่องผ่านเลนส์ ซึ่งถ้าแสงมีความยาวคลื่นที่สั้น จะช่วยเพิ่ม resolving power และความสามารถในการรวมแสงของเลนส์วัตถุ (Numerical aperture of objective lens / NA) โดยที่ค่า NA ยิ่งมากภาพที่ได้ก็จะยิ่งคมชัดมากขึ้นตาม

3. ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์

- 1) ลำกล้อง (Body tube) เป็นส่วนที่เชื่อมโยงระหว่างเลนส์ใกล้ตากับเลนส์ใกล้วัตถุ มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกกระทบ
- 2) แขน (Arm) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ยึดระหว่างส่วนลำกล้องกับฐาน เป็นตำแหน่งที่จับเวลายกกล้อง
- 2) แท่นวางวัตถุ (Specimens stage) เป็นแท่นใช้วางแผ่นสไลด์ที่ต้องการศึกษา
- 4) ที่หนีบสไลด์ (Stage clip) ใช้หนีบสไลด์ให้ติดอยู่กับแท่นวางวัตถุ ในกล้องรุ่นใหม่จะมี Mechincal stage แทนเพื่อควบคุมการเลื่อนสไลด์ให้สะดวกขึ้น
- 5) ฐาน (Base) เป็นส่วนที่ใช้ในการตั้งกล้อง ทำหน้าที่รับน้ำหนักตัวกล้องทั้งหมด

6) กระจกเงา (Mirror) ทำหน้าที่สะท้อนแสงจากธรรมชาติหรือแสงจากหลอดไฟภายในห้องให้ส่องผ่านวัตถุโดยทั่วไปกระจกเงามี 2 ด้าน ด้านหนึ่งเป็นกระจกเงาเว้า อีกด้านเป็นกระจกเงาระนาบ สำหรับกล้องรุ่นใหม่จะใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งสะดวกและชัดเจน

7) เลนส์รวมแสง (Condenser) ทำหน้าที่รวมแสงให้เข้มข้นเพื่อส่งไปยังวัตถุที่ต้องการศึกษา

8) ไดอะแฟรม (Diaphragm) อยู่ที่เลนส์รวมแสงทำหน้าที่ปรับปริมาณแสงให้เข้าสู่เลนส์ในปริมาณที่ต้องการ

9) ปุ่มปรับภาพหยาบ (Coarse adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพโดยเปลี่ยนระยะโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ (เลื่อนลำกล้องหรือแท่นวางวัตถุขึ้นลง) เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน

10) ปุ่มปรับภาพละเอียด (Fine adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพ ทำให้ได้ภาพที่ชัดเจนมากขึ้น

11) เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) จะติดอยู่กับจานหมุน (Revolving nose piece) ซึ่งจานหมุนนี้ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ ตามปกติเลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยาย 3 – 4 ระดับ คือ 4x 10x 40x 100x ภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพจริงหัวกลม

12) เลนส์ใกล้ตา (Eye piece) เป็นเลนส์ที่อยู่บนสุดของลำกล้อง โดยทั่วไปมีกำลังขยาย 10x หรือ 15x ทำหน้าที่ขยายภาพที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดภาพที่ตาผู้ศึกษาสามารถมองเห็นได้ โดยภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนหัวกลับ

4. ประเภทของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงแบบธรรมดา ประกอบด้วยเลนส์ 2 ชนิด คือ เลนส์ใกล้วัตถุ และเลนส์ใกล้ตาโดยใช้แสงผ่านวัตถุแล้วขึ้นมาที่เลนส์จนเห็นภาพที่บนวัตถุอย่างชัดเจน

1) กล้องที่ใช้แสงแบบสเตอริโอ เป็นกล้องที่ประกอบด้วยเลนส์ที่ทำให้เกิดภาพแบบ 3 มิติ ใช้ศึกษาวัตถุที่มีขนาดใหญ่ แต่ตาเปล่าไม่สามารถแยกรายละเอียดได้จึงต้องใช้กล้องชนิดนี้ช่วยขยาย กล้องชนิดนี้มีข้อแตกต่างจากกล้องทั่วไป คือ ภาพที่เห็นเป็นภาพเสมือนมีความชัดลึกและเป็นภาพสามมิติ เลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยายต่ำ (น้อยกว่า 1 เท่า) และใช้ศึกษาได้ทั้งวัตถุโปร่งแสงและวัตถุทึบแสง [12] ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 กล้อง Microscope [12]

2.8 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึง ถ้าวัดตามลักษณะของชิ้นทดสอบหลังการทดสอบ จัดว่าเป็นการทดสอบแบบทำลาย DT (Destructive Testing) หรือถ้าวัดตามลักษณะของแรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบ ก็จัดว่าเป็นการทดสอบแบบแรงคงที่ (Static Load Testing) การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบวัสดุที่สำคัญที่สุด ทั้งนี้เพราะในการออกแบบส่วนใหญ่จะใช้ค่าซึ่งได้จากการทดสอบนี้ไปใช้ในการคำนวณ เพื่อกำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน

วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบแรงดึง เพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ ค่าความต้านแรงดึง R_m (Tensile Strength) ความเค้นคราก R_e (Yield Stress) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว A (Elongation) ของวัสดุ เป็นต้น ในการทดสอบโดยทั่วไปชิ้นทดสอบจะถูกดึงจนขาดออกจากกัน โดยในขณะที่ทำการทดสอบแรงที่ใช้ในการดึงและระยะยืดของชิ้นทดสอบจะถูกบันทึกไว้ด้วยเครื่องบันทึก (Recorder)

2.8.1 ขั้นตอนในการทดสอบ

ในการทดสอบแรงดึง ก่อนอื่นชิ้นทดสอบจะถูกนำมาทำรอย โดยการขีดหรือตอกด้วยเหล็กนำศูนย์ เพื่อกำหนดความยาวพิกัด L_0 (ดูภาพที่ 2.11) จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกจับยึดบริเวณปลายทั้งสองข้างด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (ดูภาพที่ 2-10) เครื่องทดสอบจะค่อยๆดึงชิ้นทดสอบช้าๆ ขณะที่ทำ

การดึงเครื่องจะทำการบันทึกเส้นโค้ง แรงดึง F – ระยะยืด L (ดูภาพที่ 2.13) ในช่วงแรกเส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงมีความชันสูง โดยระยะยืดมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดึง ซึ่งในช่วงนี้ถ้ายกเลิกการดึงซึ่งงานทดสอบจะหดกลับไปยังความยาวเดิม จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดหยุ่น (Elastic) เมื่อจุดที่แรงเริ่มตกลงนี้เรียกว่าแรงที่จุดคราก F_c (Yield Point) ในขณะที่ขึ้นทดสอบยังคงยืดตัวต่อไปจนกระทั่งแรงดึงเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แต่คราวนี้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งความชันลดลงเรื่อยๆ ช่วงนี้ถ้ายกเลิกการดึงจะพบว่าชิ้นทดสอบมีความยาวเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดตัวถาวร (Plastic) เมื่อชิ้นทดสอบถูกดึงต่อไปอีกจะพบว่าแรงดึงจะเริ่มลดลง และถ้าสังเกตที่ชิ้นทดสอบจะพบว่าชิ้นทดสอบจะมีลักษณะคอดลง ซึ่งจุดที่คอดนี้คือจุดที่ชิ้นทดสอบจะขาดออกจากกัน แรงสูงสุด F_m และแรงที่จุดคราก F_c จะถูกนำไปคำนวณค่าความต้านแรงดึง R_m (Tensile Strength) และค่าความเค้นคราก R_c (Yield Stress)

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad 2.2$$

$$R_c = \frac{F_c}{S_n} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

ชิ้นทดสอบที่ขาดออกจากกันหลังการทดสอบ จะถูกนำมาต่อกันเพื่อวัดขนาดความยาวพิคัดสุดท้าย L_u (ดูภาพที่ 2.2) และค่าที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าความยืด A (Elongation)

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad 2.3$$

1. การวัดขนาดชิ้นทดสอบ

ก่อนอื่นต้องทำการวัดขนาดชิ้นทดสอบ โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบ การวัดต้องทำที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของความยาวเริ่มต้นและบริเวณตรงกลาง จากนั้นจึงนำค่าทั้งสามมาคิดค่าเฉลี่ย ค่าที่ต่ำกว่า 10 มม. ให้วัดให้ได้ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ส่วนค่าที่สูงกว่า 10 มม. ให้วัดได้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง หลังจากนั้นจึงทำการจัดแบ่งความยาวพิคัดออกเป็น 10 ส่วนเท่าๆ กัน เพื่อใช้ในการหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว หรือความยืด A

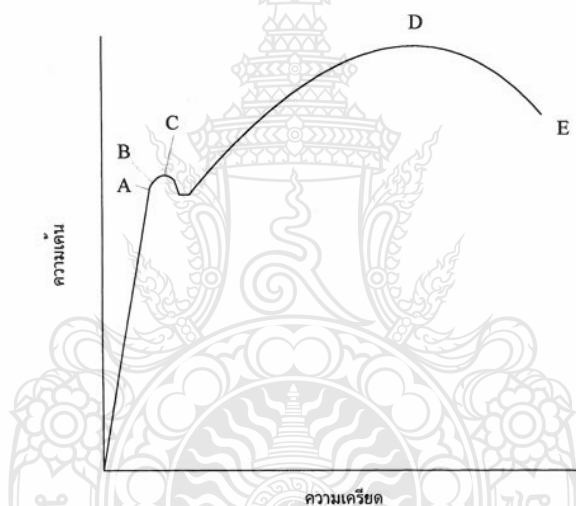
2. การจับยึดชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบจะต้องถูกจับยึดกับเครื่องทดสอบแรงดึง โดยที่ต้องระมัดระวังให้แกนกลางของชิ้นทดสอบเป็นแนวเดียวกันกับแนวของแรงดึงของเครื่องเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดัดงอ (Bending)

3. ความเร็วในการดึง

เนื่องจากความเค้นคราก R_e (Yield Stress) และค่าความต้านแรงดึงสูงสุด R_m (Tensile Strength) ขึ้นอยู่กับความเร็วในการดึงด้วย ดังนั้นความเร็วในการดึงจึงต้องถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐาน เช่น ความเร็วในการดึงเพื่อหาค่า R_e จะใช้ความเร็วไม่เกิน 30 N/mm^2 ต่อวินาที ดังแสดงได้ในภาพที่

2.14

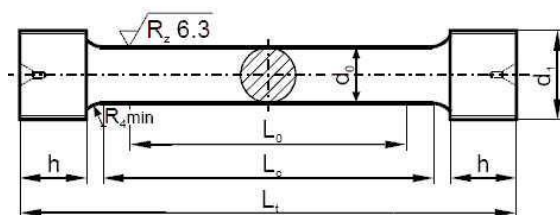


ภาพที่ 2.14 แผนภาพแรงดึง – ระยะยืด [13]

2.8.2 รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ

รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบตลอดจนวิธีการผลิต เพื่อใช้ในการทดสอบแรงดึงสำหรับโลหะทั่วไปได้ถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐาน เช่น ตามมาตรฐาน DIN 50125 หรือมาตรฐาน DIN 50120 สำหรับการทดสอบแรงดึงแนวเชื่อมเหล็กกล้า ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.15 และดังแสดงในตารางที่ 2.5

Zugprobe DIN 50125-B14~70



d_0 : Probendurchmesser L_0 : Anfangsmesslänge ($L_0=5d_0$)
 d_1 : metrisches ISO-Gewinde L_c : Versuchslänge ($L_c>L_0+d_0$)
 h : Kopfhöhe L_t : Gesamtlänge
 Bezeichnung einer Zugprobe (Form B) mit Probendurchmesser
 $d_0=14$ mm und Anfangsmesslänge $L_0=70$ mm:

ภาพที่ 2.15 ชิ้นทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125) [13]

ตารางที่ 2.5 รูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบชนิดเพลากลมแบบ A (DIN 50125) หน่วยเป็น มม.

เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นทดสอบ d_0	เส้นผ่านศูนย์กลางปลายจับ d_1	ระยะปลายจับ h อย่างน้อย	ความยาวพิกัด L_0	ความยาวช่วงขนาด L_c	ความยาวรวม L_t อย่างน้อย
6	8	25	30	36	95
8	10	30	40	48	115
10	12	35	50	60	140
12	15	40	60	72	160
14	17	45	70	84	180
16	20	50	80	96	205
18	22	55	90	108	230
20	24	60	100	120	250
22	30	70	125	150	300



ภาพที่ 2.16 เครื่องทดสอบแรงดึง [14]

จากเครื่องทดสอบแรงดึง(ภาพที่ 2.16)จะได้แผ่นภาพ แรง F ความยาว ΔL เพิ่มขึ้น L แผ่นภาพนี้ไม่สามารถใช้เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกับวัสดุชนิดอื่น ซึ่งขนาดและรูปร่างแตกต่างกันได้ เช่น ชิ้นทดสอบซึ่งมีความหนามากกว่า และสั้นกว่าจะใช้แรงดึงจนชิ้นทดสอบขาดสูงกว่าและถูกยืดน้อยกว่าชิ้นทดสอบซึ่งบางกว่าและยาวกว่า แต่ทั้งนี้ไม่ได้หมายความว่าชิ้นทดสอบที่ใช้แรงดึงสูงกว่าจะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเสมอไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำแรงดึงให้แรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยความยาวโดยที่

$$\text{ความเค้น } \sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{N/mm}^2) \quad 2.4$$

$$\text{ความเครียด } \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 (\%)$$

F = แรงดึง (N)

S_0 = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (N/mm^2)

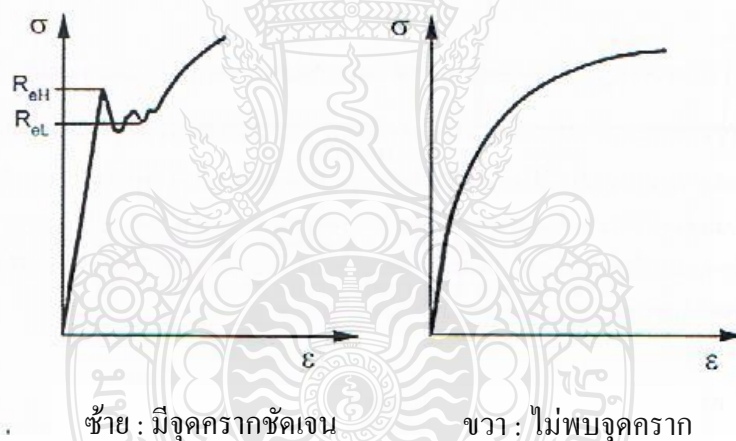
ΔL = ระยะยืด (mm)

L_0 = ความยาวพิกัด (mm)

1. การหาค่าความเค้นคราก R_c (Yield Stress)

เส้นโค้งของแผ่นภาพ $\sigma - \epsilon$ (Stress - Strain Diagram) นี้จะมีอยู่ด้วยกันสองลักษณะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ คือ ลักษณะที่หนึ่งส่วนต่อระหว่างช่วงยืดหยุ่นกับช่วงพลาสติก เป็นไปอย่างต่อเนื่องอีกลักษณะหนึ่งเป็นไปได้โดยไม่ต่อเนื่อง โดยมีจุดหักอย่างชัดเจน (ดูภาพที่ 2.12) ลักษณะหลังนี้จุดหักจะเป็นจุดกำหนดค่าความเค้นคราก R_c ส่วนลักษณะแรกจะต้องใช้ค่าความเค้นพิสูจน์ R_p (Proof Stress) ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.18 และสามารถแทนค่าความเค้นครากได้จากการคำนวณโดยนำแรงที่จุดคราก F_c หารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ S_0 ดังแสดงในภาพที่ 2.17

$$\left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right) = \frac{F_c}{S_0} \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right)$$



ภาพที่ 2.17 แผ่นภาพความเค้น - ความเครียด ($\sigma - \epsilon$ Strain Diagram)

2. ความยืด A (Elongation)

ค่าความยาวชิ้นทดสอบหลังจากถูกดึงขาด L_u วัดได้โดยการนำชิ้นทดสอบที่ถูกดึงขาดมาต่อเข้ากันโดยต้องระวังให้แกนของส่วนที่ขาดอยู่ในแนวเดียวกัน และต้องถูกประกบกันให้สนิทขณะทำการวัด

ข้อสังเกต ผลการทดสอบจะใช้ได้เสมอ ไม่ว่าจะรอยขาดจะอยู่บริเวณใดในช่วงความยาวพิกัด L_0 ถ้าค่า A ที่ได้จากการทดสอบมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของวัสดุนั้น แต่ในกรณีที่ตำแหน่งของรอยขาดถ้าวัดจากขอบที่ใกล้ที่สุดมีค่าน้อยกว่า $1/3 L_0$ และค่า A ที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของวัสดุนั้น ให้ถือว่าผลการทดสอบยังใช้ไม่ได้ต้องทำการทดสอบใหม่ เพราะถ้าตำแหน่งรอยขาดอยู่ในช่วง $1/3 L_0$ ถึง $2/3 L_0$ ค่า A ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าเนื่องจากช่วงที่มีการยืดตัวของวัสดุมากที่สุดจะอยู่บริเวณใกล้รอยขาด ในขณะที่บริเวณที่ห่างออกไปวัสดุมีการยืดตัวน้อยลงไปตามลำดับ

ในการกำหนดขนาดความยาวพิกัด L_0 ต้องกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐาน ในกรณีที่ไม่สามารถกำหนดได้ตามมาตรฐาน ต้องระบุไว้ในรายงานอย่างชัดเจนถึงขนาด L_0 ที่ใช้ทั้งนี้ในการทดสอบวัสดุถ้าเพิ่มขนาดความยาวพิกัด L_0 ขึ้น ค่าความยืด A ที่ได้จากการทดสอบจะลดลง ในขณะที่ถ้าลดความยาวของพิกัด L_0 ลง ค่าความยืด A จะเพิ่มขึ้นทั้งๆที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ทั้งนี้เป็นเพราะบริเวณใกล้รอยขาดเนื้อวัสดุจะยืดตัวถาวรมากที่สุด ในขณะที่ห่างออกไปจะยืดตัวถาวรน้อยลงตามลำดับ แต่การคำนวณค่าความยืดเป็นการคำนวณเฉลี่ยทั้งความยาวพิกัด L_0

3. ยิงโมดูลัส E (Young' Modulus)

ในแผนภาพ $\sigma - \epsilon$ พบว่าในช่วงต้นของเส้นโค้งวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) เส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยที่ค่าความเค้น σ จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียด ϵ ตามกฎของฮุก (Hooke's law)

$$\text{ยังโมดูลัส } E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (N/mm^2)$$

สมการนี้จะใช้ได้เฉพาะในช่วงยืดหยุ่นเท่านั้น ค่ายังโมดูลัสของวัสดุเป็นค่าซึ่งบ่งถึงความต้านทานของวัสดุต่อการยืดตัวในช่วงยืดหยุ่น ในตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบค่ายังโมดูลัส E ของวัสดุแต่ละชนิด [13]

2.8.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกล(Mechanical Testing)

1. การวัดความแข็ง (Hardness Testing)

ความแข็งเป็นความต้านทานต่อการผิดรูปอย่างถาวรของวัสดุ วัสดุที่มีความแข็งสูงก็จะมีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย ดังนั้นการวัดความแข็งเป็นวิธีที่สะดวก และประหยัดในการที่จะทราบค่า Ultimate tensile strength ของวัสดุต่างๆ (ตารางที่ 1)

เทคนิคของการวัดค่าความแข็งแบ่งได้ 4 แบบ (ตารางที่ 2) ได้แก่

- 1) Brine hardness test
- 2) Rockwell and Superficial Rockwel
- 3) Vickers microharness test
- 4) Knoop microhardness test

โดยมีหลักการที่เหมือนกันคือ เครื่องวัดความแข็งจะมีหัวกด (Indenter) ที่มีรูปร่างทรงกลมหรือปิรามิดสำหรับกดลงบนพื้นผิววัสดุด้วยแรงขนาดต่างๆกัน ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกดขนาดต่างๆกันด้วย จากนั้นจะทำการวัดขนาดรอยกดเพื่อนำมาคำนวณความแข็ง

2. การวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

ใช้สัญลักษณ์ HBN or HB หัวกดที่ใช้จะเป็นเหล็กกล้าชุบแข็งทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. และมีความแข็ง 850 HV10-1500 HV10 จะสามารถวัดความแข็งของโลหะที่มีความแข็งไม่เกิน 300-650 HB แรงที่ใช้สามารถเลือกได้จาก 500, 1500 และ 3000 kgf ความแข็งตามบริเนลสามารถหาได้จาก

$$HB = \frac{\text{แรงทดสอบ}}{\text{พื้นที่ของรอยกด}}$$

ผิวงานที่จะทดสอบต้องเรียบปราศจากวัสดุหล่อลื่น, ออกไซด์ และเหมาะกับวัสดุที่อ่อนเหนียว ความหนาของชิ้นงานต้องมีขนาดอย่างน้อย 8 เท่าของความหนาของรอยกด เวลาที่ใช้ในการทดสอบอยู่ระหว่าง 15-25 วินาที หลังจากนั้นจึงวัดขนาดของรอยกดและเทียบค่าความแข็งได้จากตารางเทียบความแข็ง

สมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical Properties) หมายถึงความสามารถในการรับแรง หรือภาระ (Load) ในลักษณะต่างๆ โดยสมบัติทางกลของวัสดุที่สำคัญได้แก่ ความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength)

ความแข็ง (Hardness) คือ ความต้านทานต่อการผิดรูปอย่างถาวรของวัสดุ วิธีการที่วัดความแข็งได้อย่างแม่นยำ ทำได้โดยอาศัยเครื่องวัดความแข็ง (Hardness Tester) โดยเครื่องวัดความแข็งจะมีตัวกด (Indenter) สำหรับกดลงบนพื้นผิววัสดุด้วยแรงขนาดต่างๆกัน ซึ่งจะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาด

ต่างๆ กันด้วย จากนั้นจะทำการวัดรอยบุ๋มนั้นเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความแข็งในแต่ละวิธีการวัดความแข็ง ซึ่งจะมีวิธีการคำนวณหาค่าแตกต่างกันออกไป

3. การวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness test)

ในการปฏิบัติการทางวัสดุศาสตร์นี้เราจะใช้การวัดความแข็งแบบ Rockwell หัวกดที่ใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ

- 1) Diamond Cone 120° (เพชรทรงกรวย) ใช้กับโลหะแข็ง
- 2) Steel Ball (เหล็กกล้าทรงกลม) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/16, 1/8, 1/4 หรือ 1/2 นิ้ว ใช้กับโลหะทั่วไป

4. วิธีการใช้เครื่อง ROCKWELL SCALE HARDNESS TESTER (MODEL: AR - 10)

- 1) เลือกหัวกด และ Load ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุ
- 2) วางชิ้นงานบนฐานรอง (Anvil) หมุนฐานรองขึ้นให้หัวกดสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงาน เครื่องจะกดผิวหน้าโดยใช้ Minor Load (ภาพที่ 1)
- 3) ใช้มือทั้งสองข้างหมุนแขน handle ตามเข็มนาฬิกาอย่างสม่ำเสมอ จนเข็มทั้ง 2 บนหน้าปัดเข้าไปอยู่ในตำแหน่ง SET แล้วหยุด หากหมุนเกินให้เปลี่ยนตำแหน่งวัด แล้วเริ่มต้นใหม่
- 4) กดเป็นสปริงให้ไฟดับ The load control จะเริ่มกดชิ้นงาน โดย Major load
- 5) เมื่อไฟติดอีกครั้ง อ่านค่าความแข็งที่ได้จากหน้าปัด
- 6) หมุนฐานรองลง วัดตำแหน่งต่อไป

5. ข้อควรระวัง

- 1) ระวังอย่าให้ชิ้นงานกระแทกกับหัวกดในขณะที่นำชิ้นงานวางหรือเอาออกจากฐานรอง
- 2) ใช้ Load ให้เหมาะสมกับ Scale และประเภทของชิ้นงาน
- 3) หมุน Handle ใ้ Load อย่างสม่ำเสมอ
- 4) Set Load duration time switch ที่ Auto Unload
- 5) ชิ้นงานที่จะนำมาวัดความแข็ง ต้องผ่านการขัดผิวหน้าโยผงขัดมันอย่างน้อย 6 μm และด้านฐานต้องเรียบเสียก่อน มิเช่นนั้นชุดเครื่องมือและหัวกดจะได้รับความเสียหายได้
- 6) จุดวัดความแข็งไม่ควรอยู่ใกล้กันมากเกินไป

6. การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

จะใช้หัวกดเป็นเพชรรูปพีระมิด (Square-Based Diamond Pyramid) ที่มีมุม 136° ระหว่างด้านของหน้าเพชร (ภาพที่ 3) แรงที่ใช้กดต่างๆไปจะนิยมเลือกใช้ระหว่าง 2-1000 N. ทั้งนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาทดสอบ ค่าความแข็งจะหาได้จากอัตราส่วนของแรงที่ใช้ในการกดต่อพื้นที่ของขนาดรอยกดมีหน่วยเป็น mm^2 โดยหาได้จากเส้นทแยงมุมของรอยกดแล้วแทนค่าสูตรดังต่อไปนี้

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

โดย $F = \text{Applied load, (N)}$

$d = \text{Diagonal length of square-impression, (mm)}$

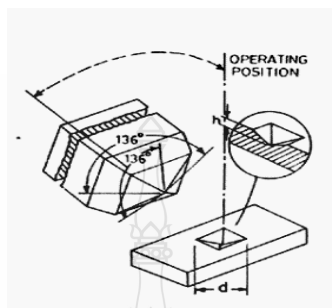
7. เงื่อนไขในการทดสอบความแข็งแบบ Vickers

- 1) ผิวชิ้นทดสอบจะต้องเรียบ ปราศจากออกไซด์ วัสดุชนิดอื่นๆเช่น สารหล่อลื่นทุกชนิด
- 2) ความหนาของชิ้นทดสอบจะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาค่าต่ำสุด เท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด d
- 3) ตามเกณฑ์จะทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง 10°C หรือ 35°C
- 4) ระยะห่างระหว่างรอยกด ให้ถือเกณฑ์ดังนี้
- 5) เหล็กกล้า ทองแดง และทองเหลือง อย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด
- 6) โลหะเบา เช่น ดีบุก ตะกั่ว อย่างน้อยที่สุด 6 เท่าของความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

8. Micro-Vickers Hardness Testing (Mitutoyo Model:MVK-H3)

Micro Hardness Test เป็นการวัดความแข็งในระดับจุลภาค รอยกดและการวัดค่าความแข็งจะมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ มีบริเวณที่จะวัดความแข็งน้อย เช่น เกรนของเหล็กเป็นต้น และจะต้องมีการเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานให้เรียบ

หน่วยที่ใช้วัด คือ VICKERS (HV) หรือ Diamond Pyramid Hardness เนื่องจากหัวกดเป็นเพชรรูปปิระมิด ทำมุม 136° ใช้ Load ตั้งแต่ 2-1000 N โดยใช้เวลาในการกด 10-15 วินาที และรอยกดจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 รูปหัวเพชรและรอยกด [15]

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

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

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

เมื่อ 0.102 คือ ค่าคงที่ ที่คูณเข้าเพื่อการเปลี่ยนหน่วยจาก kp/mm^2 เป็น N/mm^2 ดังนี้

$$\begin{aligned} HV &= \frac{0.102 \times 2 F \sin(136^{\circ}/2)}{d^2} \\ &= \frac{0.1891 F}{d^2} \quad \text{N/mm}^2 \end{aligned}$$

เมื่อ $F = \text{Test Force (N)}$

$d = \text{ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของรอยกด (mm)} = (d_1 + d_2)/2$

9. เงื่อนไขการทดสอบ

1) เนื่องจากรอยกคบนผิวชั้นทดสอบมีขนาดเล็กมาก จึงต้องให้ผิวชั้นทดสอบมีวเรียบปราศจากออกไซด์ หรือผ่านการกัดกรดมาก่อน เพื่อที่จะได้เห็น โครงสร้างจุลภาค และสามารถเลือก กคบน โครงสร้างที่ต้องการได้

2) ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยใต้ผิวชั้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาค่าสุด เท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกค (d)

3) อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง 10 - 35°C

4) ระยะห่างระหว่างรอยกคให้ถือตามเกณฑ์ดังนี้

ก. เหล็กกล้า (Steel) ทองเหลือง (Brass) และทองแดง (Copper) ห่างอย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของค่าความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกค

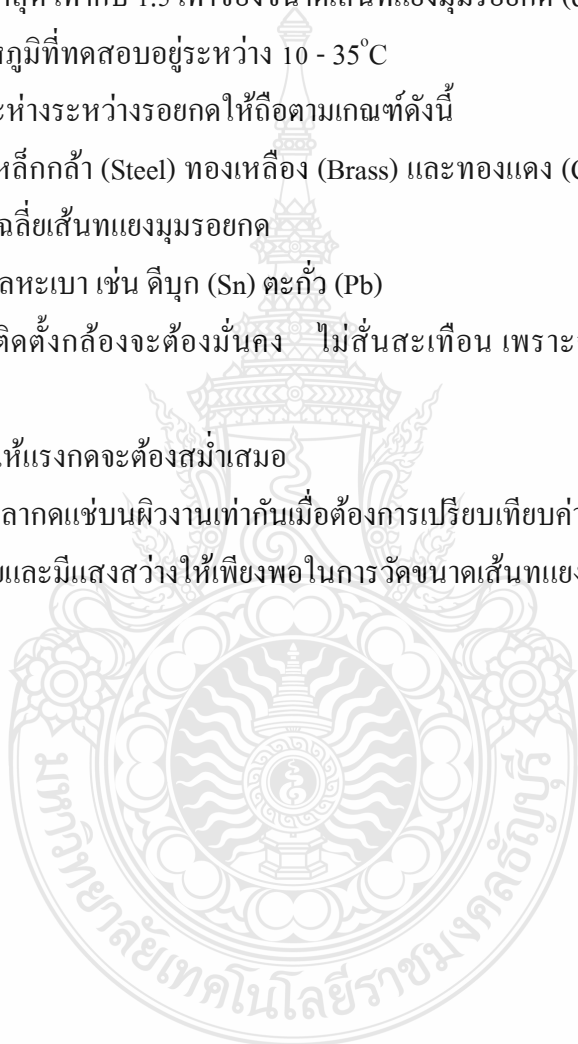
ข. โลหะเบา เช่น ดีบุก (Sn) ตะกั่ว (Pb)

5) การติดตั้งกล้องจะต้องมั่นคง ไม่สั่นสะเทือน เพราะจะส่งผลให้ค่ารอยกคที่ได้คลาดเคลื่อน

6) การให้แรงกดจะต้องสม่ำเสมอ

7) ให้เวลากดแช่บนผิวงานเท่ากันเมื่อต้องการเปรียบเทียบค่า

8) ขยายและมีแสงสว่างให้เพียงพอในการวัดขนาดเส้นทแยงมุมรอยกค [15]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินการเพื่อจะทำวิจัย เริ่มจากการศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและนำมาวิเคราะห์เพื่อเสนอหัวข้องานวิจัย จากนั้นทำการรวบรวมข้อมูล บันทึกข้อมูล ออกแบบการวิจัยและจัดหาวัสดุอุปกรณ์ในการวิจัย ทำการวิจัยตามแผนการดำเนินงานที่วางไว้

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัย	2554		2555			2556				
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษางานวิจัย	---									
2. ศึกษาหาข้อมูล	---	---	---	---	---					
3. เสนองานวิจัย			---							
4. ออกแบบการวิจัย			---	---	---					
5. ทำการวิจัย			---	---	---	---	---			
6. เก็บข้อมูลผลการวิจัย			---	---	---	---	---			
7. วิเคราะห์ผลการวิจัย			---	---	---	---	---	---	---	
8. สรุปผลการวิจัย						---	---	---		
9. ทำวิทยานิพนธ์						---	---	---	---	
10. สอบวิทยานิพนธ์								---	---	---

--- วางแผนการดำเนินการ

— ดำเนินงานจริง

3.2 การออกแบบ / เครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องกลึงที่หาได้ในโรงงานอุตสาหกรรม ในการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องกลึงแนวอน โดยประยุกต์เอาหลักการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจะมีการนำเอาชุดไฮดรอลิกมาติดตั้งแทนด้วยันศูนย์ท้ายแทน จะใช้สำหรับออกแรงดันให้ชิ้นงานเกิดการเสียดทาน โดยชิ้นงานที่หนึ่งอยู่ที่หัวจับเครื่องกลึง และชิ้นงานอีกหนึ่งชิ้นอยู่ที่ชุดไฮดรอลิกท้ายแทนอันศูนย์ ข้อดีที่นำเอาชุดไฮดรอลิกมาใช้ในการเชื่อมนั้นแรงดันที่ใช้จะสามารถควบคุมให้คงที่ตามการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

3.2.1 เครื่องกลึงแนวอน

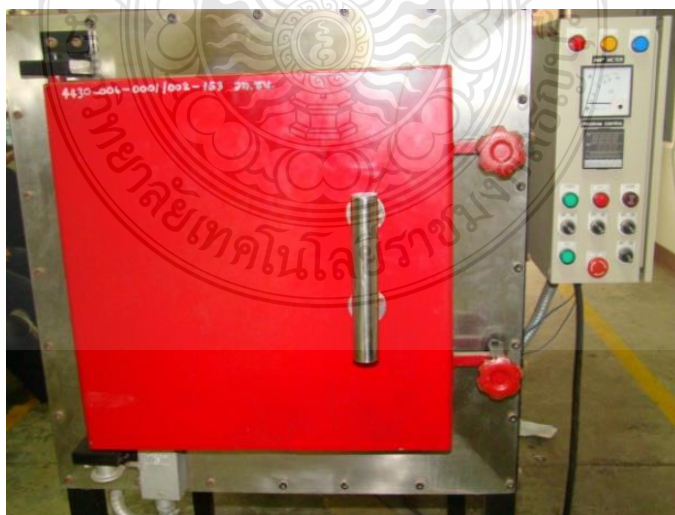
เครื่องกลึงแนวอนจะนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องทดสอบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เครื่องกลึงที่ใช้ต้องมีเบรกที่สามารถหยุดหัวจับเครื่องได้ โดยใช้ระยะเวลาในการหยุดน้อยที่สุด โดยใช้เวลาเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาที ลักษณะของเครื่องกลึงที่ใช้ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 เครื่องกลึงแนวนอน

3.2.2 ตู้ที่ใช้ในการอบชิ้นงาน

ตู้อบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างชิ้นงานด้วยวิธีการอบอ่อน ซึ่งจะใช้อุณหภูมิในการอบอ่อนชิ้นงานที่แตกต่างกัน โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนคือ 790°C 870°C และ 950°C ตามลำดับ ลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการอบชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ตู้อบชิ้นงาน

3.2.3 ชุดไฮดรอลิก

ชุดไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แทนแทนยันศูนย์ท้ายแทนทำให้ชิ้นงานเคลื่อนที่เกิดแรงเสียดทาน เป็นผลทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนซึ่งทำให้ชิ้นงานติดกัน โดยแรงดันที่ใช้ในการกดแช่ชิ้นงาน (P_1) คือ 14 บาร์ และแรงดันที่ใช้ในการอัดคือ 20 บาร์ 30 บาร์ และ 40 บาร์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ชุดไฮดรอลิก

3.2.4 นาฬิกาจับเวลา

นาฬิกาจับเวลานำมาใช้เพื่อทำการจับเวลาในการเชื่อมชิ้นงาน ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเชื่อมแต่ละครั้งจะแตกต่างกัน โดยเวลาที่ใช้ในการกดแช่ชิ้นงานคือ 4 วินาที และเวลาที่ใช้ในการกดอัดชิ้นงานคือ 2, 3 และ 4 วินาทีตามลำดับ

3.3 ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานทดสอบ / ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การสร้างชิ้นงานทดสอบ

1. นำเหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ตัดให้มีความยาว 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เหล็กกล้า AISI 1045 ขนาด 10 x 100 มิลลิเมตร

2. นำเหล็กที่ได้ขนาดตามที่กำหนดไว้มาทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน โดยใช้เวลาในการกดแช่ชิ้นงาน 4 วินาที ความดัน 14 บาร์ และเวลาในการกดอัดชิ้นงาน 2 , 3 และ 4 วินาที ความดันที่ใช้ 20 , 30 และ 40 บาร์ ตามลำดับ จำนวนชิ้นงานที่ทำการทดสอบทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.5, 3.6 และ 3.7

จากการทำ Pre-Test เชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าตัวแปรในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045

ตารางที่ 3.2 ความเร็วรอบของเครื่องกลึงในการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์ ความดันกดอัดชิ้นงาน 20 บาร์ เวลา 2 วินาที

ความเร็วรอบ (รอบ / นาที)	การเชื่อมติดกัน	เวลาที่ชิ้นงานเกิดความร้อน (วินาที)
1,500	✓	9
1,800	✓	4
2,200	✓	2

จากตารางที่ 3.2 พบว่าที่ความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาทีซึ่งงานเกิดความร้อนในการเสียดทานโดยใช้เวลาในการเสียดทานน้อยที่สุดคือ 2 วินาทีแต่ระยะเวลาในการเชื่อมนั้นเกิดขึ้นเร็วเกินไปจึงทำให้ความคุมความดันในการเชื่อมได้ยาก ความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาทีซึ่งงานเกิดความร้อนในการเสียดทานใช้เวลาในการเสียดทานคือ 4 วินาทีเป็นความเร็วรอบและเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็กกล้า AISI 1045 เพราะเวลาในการเชื่อมซึ่งงานนั้นมีเวลาในการควบคุมความดันในการเชื่อมซึ่งงาน และความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาทีซึ่งงานเกิดความร้อนในการเสียดทานโดยใช้เวลาในการเสียดทานมากที่สุดคือ 9 วินาทีซึ่งใช้เวลาในการเชื่อมนานเกินไปจึงไม่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ดังภาคผนวก ก. ภาพที่ ก.1- ภาพที่ ก.3

ตารางที่ 3.3 เวลาที่ใช้ในการเชื่อมซึ่งงานด้วยความเสียดทานที่ความดันกดซึ่งงาน 14 บาร์

ความดันกดอัดซึ่งงาน 20 บาร์

เวลา (วินาที)	การเชื่อมติดกัน	ลักษณะรอยเชื่อม	หมายเหตุ
1	✓	เล็ก	รอยเชื่อมไม่สมบูรณ์
2	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
3	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
4	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
5	✓	ใหญ่	ใช้เนื้อวัสดุมากเกินไป

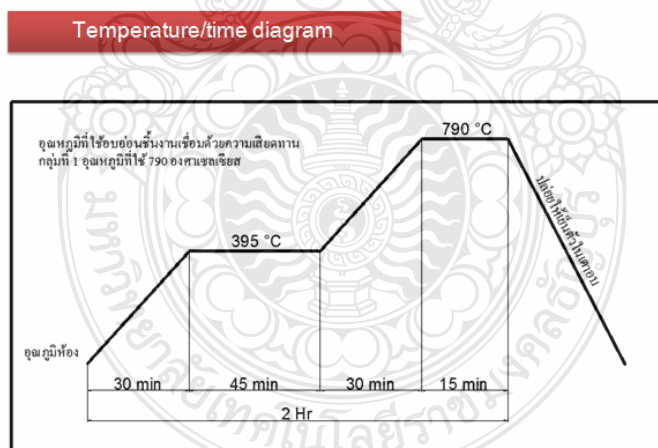
จากตารางที่ 3.3 พบว่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมซึ่งงานคือ 2 วินาที 3 วินาที และ 4 วินาทีซึ่งเชื่อมซึ่งงานติดกันสมบูรณ์และเนื้อของวัสดุเกิดน้อยทำให้ไม่สิ้นเปลืองวัสดุ ดังภาคผนวก ก. ภาพที่ ก.4 – ก.8

ตารางที่ 3.4 ความดันที่ใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่ความดันกดแช่ชิ้นงาน 14 บาร์

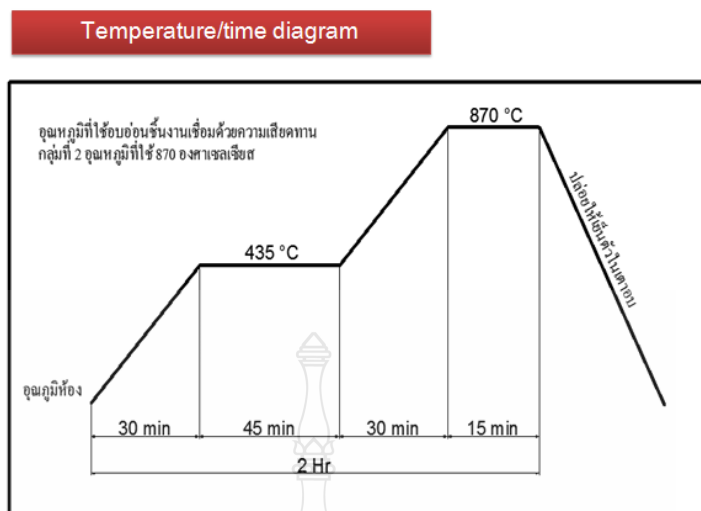
เวลา 2 วินาที

ความดัน (บาร์)	การเชื่อมติดกัน	ลักษณะรอยเชื่อม	หมายเหตุ
20	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
30	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
40	✓	พอดี	ใช้เนื้อวัสดุน้อย
50	✓	ใหญ่	ใช้เนื้อวัสดุมากเกินไป

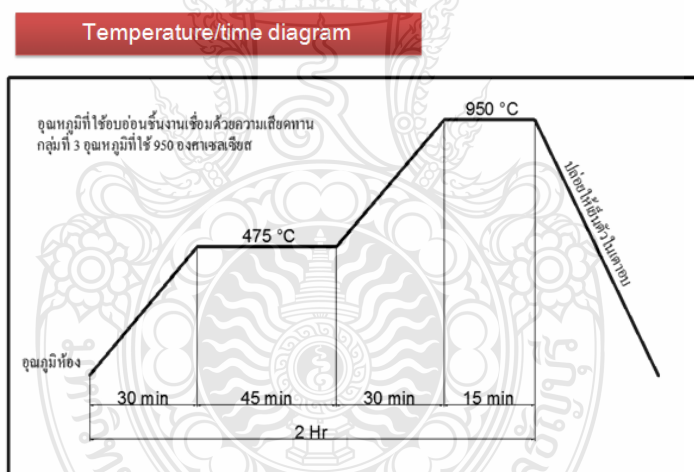
จากตารางที่ 3.4 พบว่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทาน ความดันที่เหมาะสมในการเชื่อมชิ้นงานคือ 20 บาร์ 30 บาร์ และ 40 บาร์ ซึ่งเชื่อมชิ้นงานติดกัน สมบูรณ์และเนื้อของวัสดุเกิดน้อยทำให้ไม่สิ้นเปลืองวัสดุ และเมื่อทำการเพิ่มความดันมากขึ้นจะให้ ทนต่อค่าแรงดึงได้น้อยลงรอยเชื่อมจะมีลักษณะคิบใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุ ดังภาพผนวก ก. ภาพที่ ก.9 - ก.12



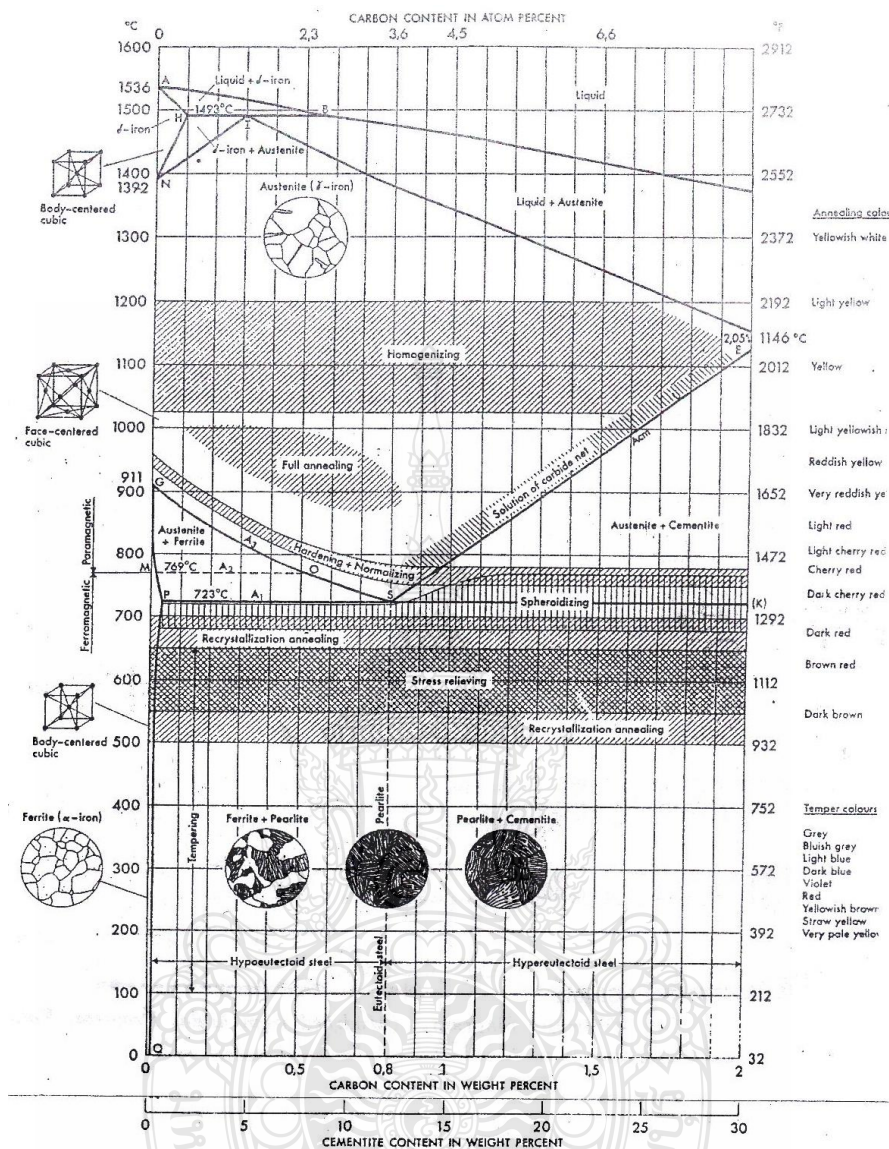
ภาพที่ 3.6 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเหล็ก AISI 1045 ที่ 790 °C



ภาพที่ 3.7 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเหล็ก AISI 1045 ที่ 870 °C



ภาพที่ 3.8 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนเหล็ก AISI 1045 ที่ 950 °C



ภาพที่ 3.9 ช่วงอุณหภูมิการอบอ่อนเหล็กกล้า

จากภาพที่ 3.6 3.7 3.8 และ 3.9 ช่วงอุณหภูมิการอบอ่อนเหล็กกล้าในช่วงอุณหภูมิในการอบอ่อนเหล็กกล้า AISI 1045 ซึ่งมีปริมาณคาร์บอน 0.45 ได้แบ่งอุณหภูมิช่วงในการอบอ่อนเป็น 3 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนคือ 790°C 870°C และ 950°C เพื่อหาอุณหภูมิช่วงที่ให้คุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3.5 3.6 3.7 และ 3.8

ตารางที่ 3.5 จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่อุณหภูมิปกติ

เวลา ความดัน	2 วินาที	3 วินาที	4 วินาที
20 บาร์	10	10	10
30 บาร์	10	10	10
40 บาร์	10	10	10

ตารางที่ 3.6 จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่อุณหภูมิมอบอ่อน 790°C

เวลา ความดัน	2 วินาที	3 วินาที	4 วินาที
20 บาร์	10	10	10
30 บาร์	10	10	10
40 บาร์	10	10	10

ตารางที่ 3.7 จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่อุณหภูมิมอบอ่อน 850°C

เวลา ความดัน	2 วินาที	3 วินาที	4 วินาที
20 บาร์	10	10	10
30 บาร์	10	10	10
40 บาร์	10	10	10

ตารางที่ 3.8 จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่อุณหภูมิอบอ่อน 970°C

เวลา ความดัน	2 วินาที	3 วินาที	4 วินาที
20 บาร์	10	10	10
30 บาร์	10	10	10
40 บาร์	10	10	10

3.3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. นำเหล็กกล้า AISI 1045 มาจับยึดที่หัวจับเครื่องกลึง และอีกหนึ่งชิ้นมาจับยึดที่หัวจับของชุดไฮดรอลิก ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การจับยึดชิ้นงานกับเครื่องกลึง

2. กำหนดความดันที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งความดันที่ใช้ในการกดแช่คือ 14 บาร์ และความดันที่ใช้ในการกดอัด 20 บาร์

3. ตั้งความเร็วรอบของเครื่องกลึง 1,800 รอบ/นาที จากนั้นเปิดเครื่องกลึงทำการเชื่อมชิ้นงาน

4. ใช้ความดัน 14 บาร์เพื่อให้กระบอกไฮดรอลิกเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานที่จับยึดที่หัวจับของเครื่องกลึง โดยใช้เวลาในการกดแช่ชิ้นงานคือ 4 วินาที (เป็นเวลาที่เหล็กเกิดความร้อนเมื่อเกิดการเสียดทาน)
5. เพิ่มความดันในช่วงระยะเวลาที่สองคือ 20, 30 และ 40 บาร์ เพื่อทำการกดแช่ชิ้นงาน และใช้เวลาในการกดแช่ชิ้นงานคือ 2, 3 และ 4 วินาทีตามลำดับ
6. หยุดเครื่องกลึงแบบทันที ดังแสดงในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 การเชื่อมเสร็จสมบูรณ์หยุดเครื่องกลึงแบบทันที

7. ถอดชิ้นงานทดลองออกจากเครื่องกลึง
8. ตรวจสอบการเชื่อมด้วยสายตาว่าชิ้นงานเชื่อมติดกันหรือไม่
9. ทำการทดลองวัสดุเหล็กกล้า AISI 1045 ที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อนเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1-9 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนคือ 790°C 870°C และ 950°C ตามลำดับ

3.4 วิธีการทดสอบ / วิธีการวัดผล

3.4.1 ตรวจสอบการเชื่อมติดกันของวัสดุเหล็กกล้า AISI1045 บริเวณแนวเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมด้วยสภาวะอุณหภูมิในการอบอ่อน ความดัน และเวลาที่แตกต่างกัน

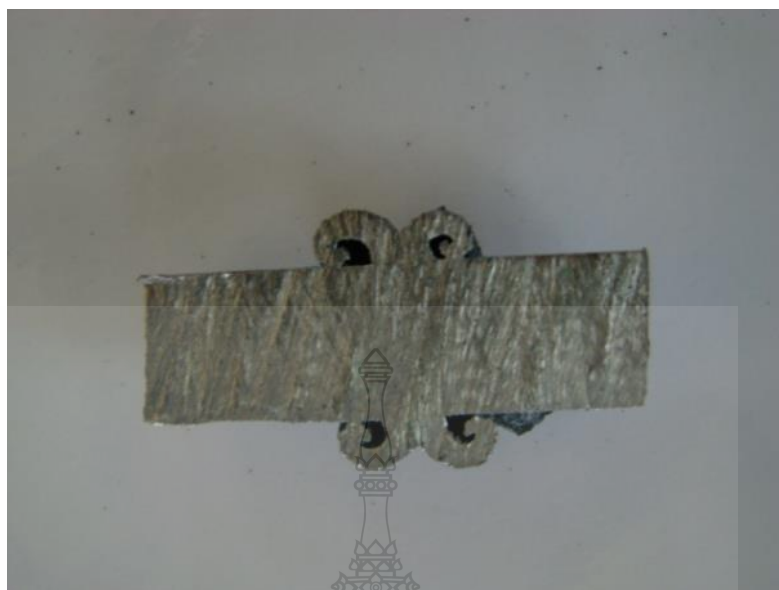
1. ผ่าด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์ ดังภาพที่ 3.12, 3.13 และ 3.14



ภาพที่ 3.12 เครื่องไมโครคัตเตอร์



ภาพที่ 3.13 ชิ้นงานก่อนเลื่อย



ภาพที่ 3.14 ชิ้นงานที่ผ่านการเลื่อยเสร็จแล้ว

2. นำชิ้นงานไปหล่อเรซิน ดังแสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเรซิน

- นำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเรซินเสร็จแล้วไปขัดผิวด้วยเครื่องขัด ดังแสดงในภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 เครื่องขัดกระดาษทราย

- นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดเสร็จแล้วมากัดสารละลายไนตริก 5 เปอร์เซ็นต์และแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์
- นำชิ้นงานไปเป่าด้วยความร้อนเพื่อให้ชิ้นงานแห้ง
- นำชิ้นงานไปส่องกล้อง Microscope ดังแสดงในภาพที่ 3.17

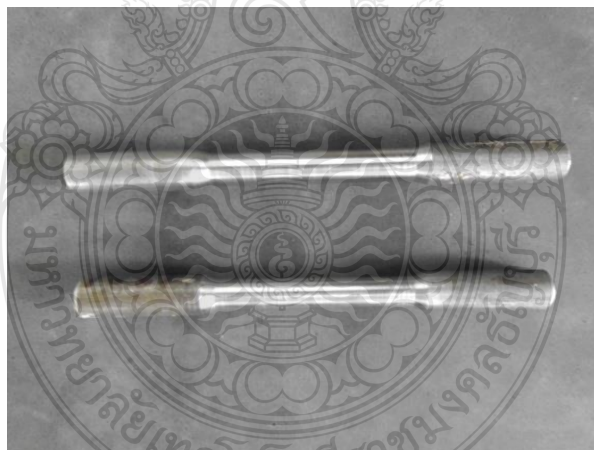


ภาพที่ 3.17 กล้อง Microscope

3.4.2 ตรวจสอบแรงดึงเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจากเครื่องทดสอบแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 3.18 และนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ไปกลึง ดังแสดงในภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.18 เครื่องทดสอบแรงดึง

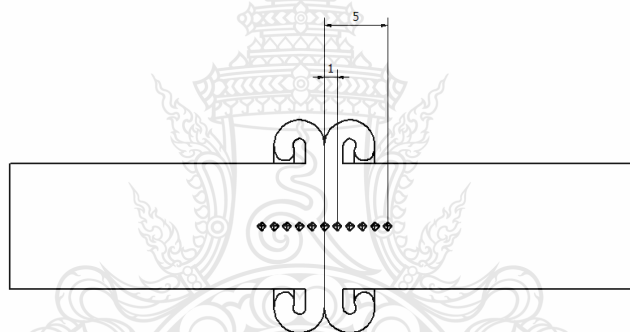


ภาพที่ 3.19 ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงและทดสอบแรงดึงมาตรฐาน DIN 50125

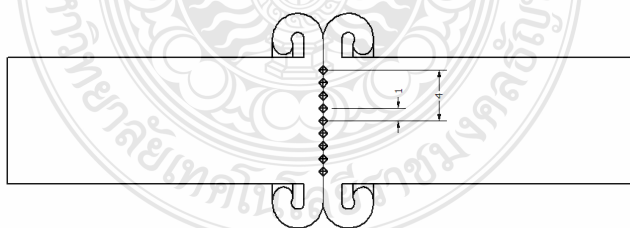
3.4.3 ทดสอบความแข็งแรงรอยเชื่อมของชิ้นงานด้วยเครื่อง Microhardness ดังแสดงในภาพที่ 3.20 ลักษณะการกดวัดความแข็งในแนวนอน (Horizontal) ดังแสดงในภาพที่ 3.21 และลักษณะการกดวัดความแข็งในแนวตั้ง (Vertical) ดังแสดงในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.20 เครื่อง Microhardness



ภาพที่ 3.21 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งในแนวนอน (Horizontal)



ภาพที่ 3.22 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งในแนวตั้ง (Vertical)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์

จากการดำเนินการศึกษาอิทธิพลการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทาน ได้ศึกษาหาวิธีในการเชื่อมด้วยความเสียดทานโดยการเชื่อมในสภาวะที่อุณหภูมิในการอบอ่อนที่แตกต่างกันและได้กำหนดความดันและเวลาในการเชื่อมชิ้นงาน ในส่วนของบทนี้เป็น การนำเสนอและอภิปรายผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อม โลหะเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทาน จะได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการวิจัย

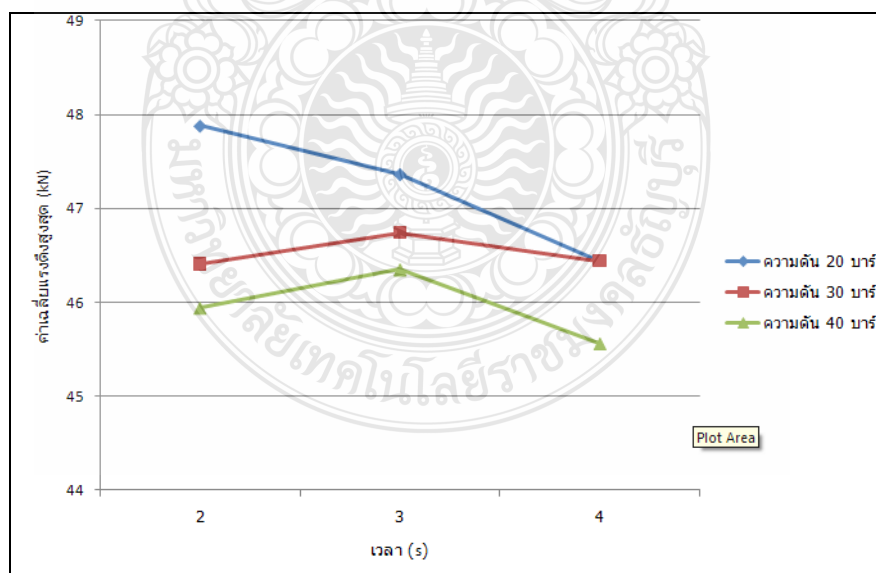
4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้า AISI 1045 หลังจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานเสร็จแล้ว นำชิ้นงานไปทำการกลึงตามการทดสอบมาตรฐาน DIN 50125 จากนั้นนำไปทดสอบ แรงดึงซึ่ง ชิ้นงานจะถูกดึงยึดออกเสมอ (ปราศจากการกระแทก) จนชิ้นงานขาดออกจากกัน ความเร็วในการยึด ตัวจะต้องต่ำ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ค่าที่ได้จากการทดสอบผิดพลาด แรงดึงและความยาวที่ยึดออกของชิ้น ทดสอบจะถูกวัดค่าหรือถูกพิมพ์เป็นค่าและกราฟออกมาให้ทราบ

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะ อุณหภูมิปกติ

ความดัน (bar)	เวลา (s)	ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด (kn)
20	2	47.88
	3	47.36
	4	46.44
30	2	46.41
	3	46.74
	4	46.44
40	2	45.94
	3	46.35
	4	45.56

จากความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิปกติ สามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้



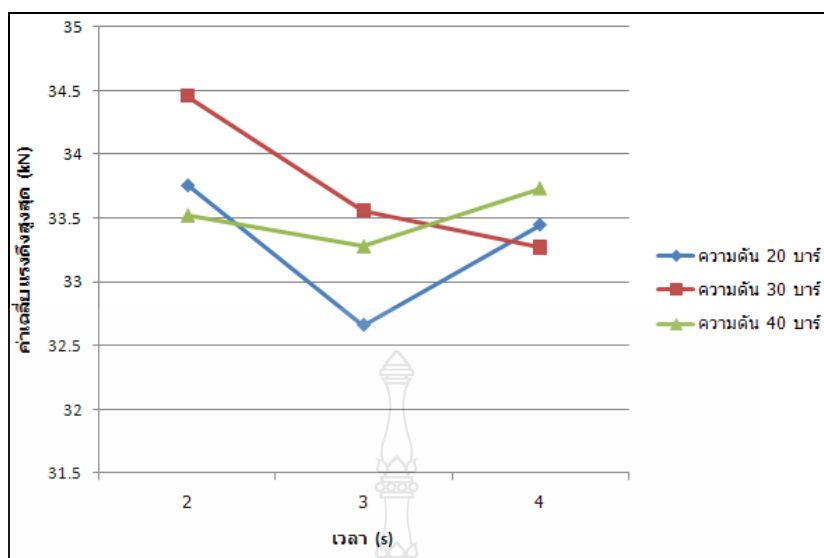
ภาพที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะ อุณหภูมิปกติ

จากภาพที่ 4.1 พบว่าการเชื่อมด้วยความเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิปกติ ความดันและเวลาที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าที่ค่าความดัน 20 บาร์ และเวลา 2 วินาที ให้ค่าแรงดึงสูงสุดหมายความว่า การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิปกติ ความดันและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานยึดติดกันนั้นที่ความดันและเวลาต่ำจะทำให้ทนต่อแรงดึงสูงสุดแต่เมื่อเพิ่มความดันและเวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานขึ้นจะทำให้ทนต่อแรงดึงได้ต่ำ

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิการอบอ่อน 790°C

ความดัน (bar)	เวลา (s)	ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด (kn)
20	2	33.76
	3	32.66
	4	33.45
30	2	34.46
	3	33.56
	4	33.27
40	2	33.52
	3	34.28
	4	33.73

จากความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิ 790°C ที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทาน สามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้



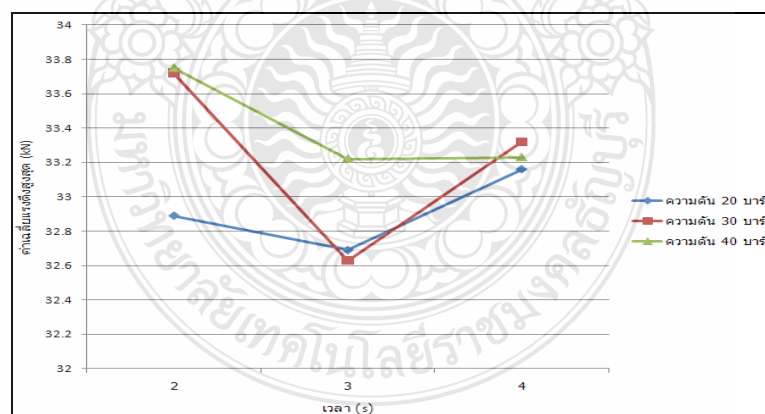
ภาพที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทาน ที่สภาวะอุณหภูมิการอบอ่อน 790°C

จากภาพที่ 4.2 พบว่าการเชื่อมด้วยความเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่อุณหภูมิในการอบอ่อน 790°C ที่ความดันและเวลาแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาที ให้ค่าแรงดึงสูงสุด หมายความว่า การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่อุณหภูมิในการอบอ่อน 790°C ทำให้เหล็กกล้า AISI 1045 ยึดติดกันและทำให้ทนต่อแรงดึงมากที่สุด

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิการอบอ่อน 870°C

ความดัน (bar)	เวลา (s)	ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด (kn)
20	2	32.89
	3	32.69
	4	33.16
30	2	33.72
	3	32.63
	4	33.32
40	2	33.75
	3	33.22
	4	33.23

จากความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิ 870°C ที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทาน สามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้



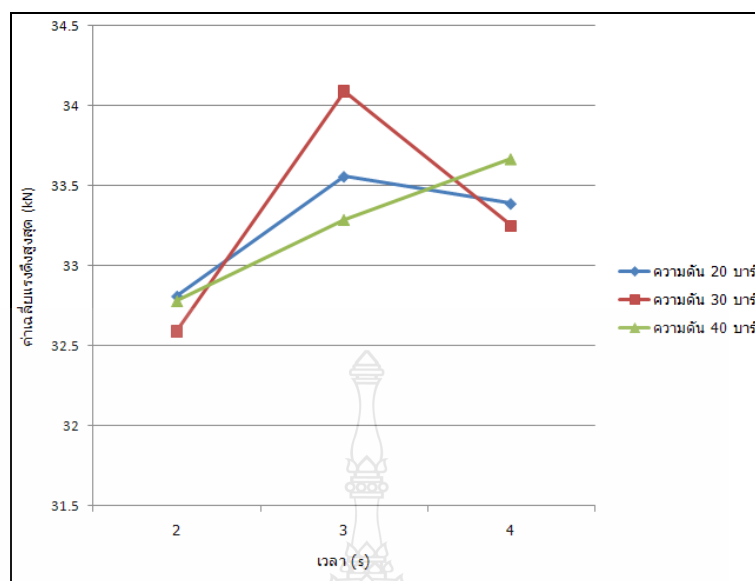
ภาพที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิการอบอ่อน 870°C

จากภาพที่ 4.3 พบว่าการเชื่อมด้วยความเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่อุณหภูมิในการอบอ่อน 870°C ที่ความดันและเวลาแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาทีกับความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาที ให้ค่าแรงดึงสูงสุดหมายความว่าเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่อุณหภูมิในการอบอ่อน 790°C ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาทีกับความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาที ทำให้เหล็กกล้า AISI 1045 ยึดติดกันและทำให้ทนต่อแรงดึงมากที่สุด

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะอุณหภูมิการอบอ่อน 950°C

ความดัน (bar)	เวลา (s)	ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด (kn)
20	2	32.81
	3	33.56
	4	33.39
30	2	32.59
	3	34.09
	4	33.25
40	2	32.78
	3	33.29
	4	33.67

จากความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิ 950°C ที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทาน สามารถนำเสนอเป็นกราฟ ได้ดังนี้



ภาพที่ 4.4 ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่สภาวะ อุณหภูมิการอบอ่อน 950°C

จากภาพที่ 4.4 พบว่าการเชื่อมด้วยความเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่อุณหภูมิในการอบอ่อน 950°C ที่ความดันและเวลาแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาที ให้ค่าแรงดึงสูงสุดหมายความว่า การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่อุณหภูมิในการอบอ่อน 950°C ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาที ทำให้เหล็กกล้า AISI 1045 ยึดติดกันและทำให้ทนต่อแรงดึงมากที่สุด

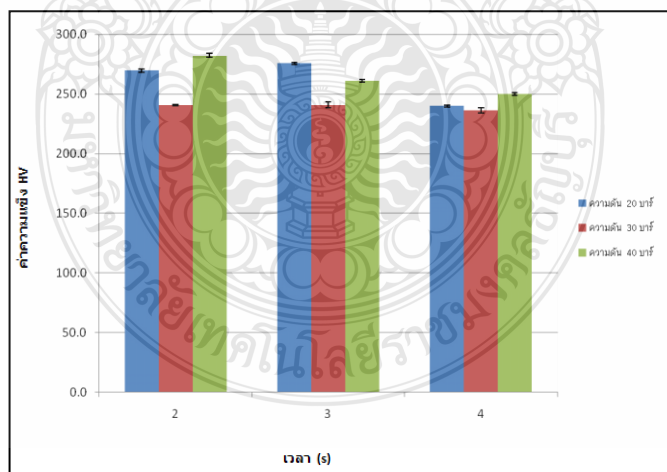
4.1.2 ผลการทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของเหล็กกล้า AISI 1045 หลังจากการเชื่อมด้วยความเสียดทานเสร็จแล้ว นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Microhardness ซึ่งจะทดสอบในแนวนอน (Horizontal) และทดสอบในแนวตั้ง (Vertical) โดยกำหนดให้จุดกึ่งกลางของชิ้นงานอยู่ที่ตำแหน่งจุด 0 มิลลิเมตร ค่าที่อ่านได้บริเวณรอยเชื่อมจะแสดงในรูปแบบของตารางและกราฟดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิปกติ

ความดัน (bar)	เวลา (s)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)
20	2	269.8
	3	275.8
	4	240.1
30	2	240.4
	3	240.4
	4	236.1
40	2	282.0
	3	261.0
	4	250.0

จากความสัมพันธ์ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิปกติ สามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้



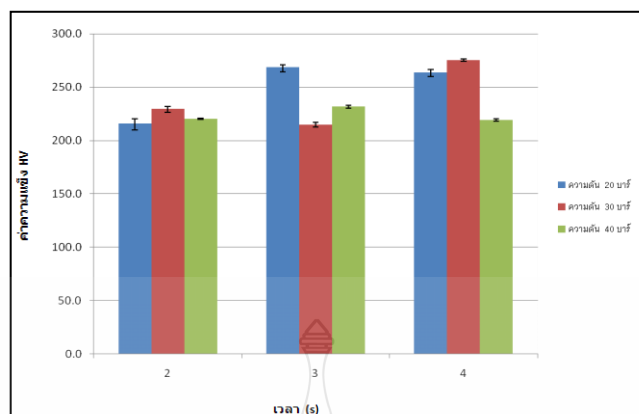
ภาพที่ 4.5 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิปกติ

จากภาพที่ 4.5 พบว่าค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่อุณหภูมิปกติ ความดันและเวลาในการเชื่อมที่ต่างกันค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาที มีค่าความแข็งของรอยเชื่อมมากที่สุดและที่ความดัน 40 บาร์เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการเชื่อมสูงขึ้นจะทำให้รอยเชื่อมมีค่าลดลงเพราะเหล็กได้รับความร้อนในการเชื่อมมากขึ้นจะทำให้เหล็กมีความแข็งลดลง

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 790°C

ความดัน (bar)	เวลา (s)	ค่าความแข็งเนลีย์ (HV)
20	2	215.8
	3	268.7
	4	264.0
30	2	229.6
	3	215.0
	4	275.4
40	2	220.5
	3	231.6
	4	219.4

จากความสัมพันธ์ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 790°C สามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้



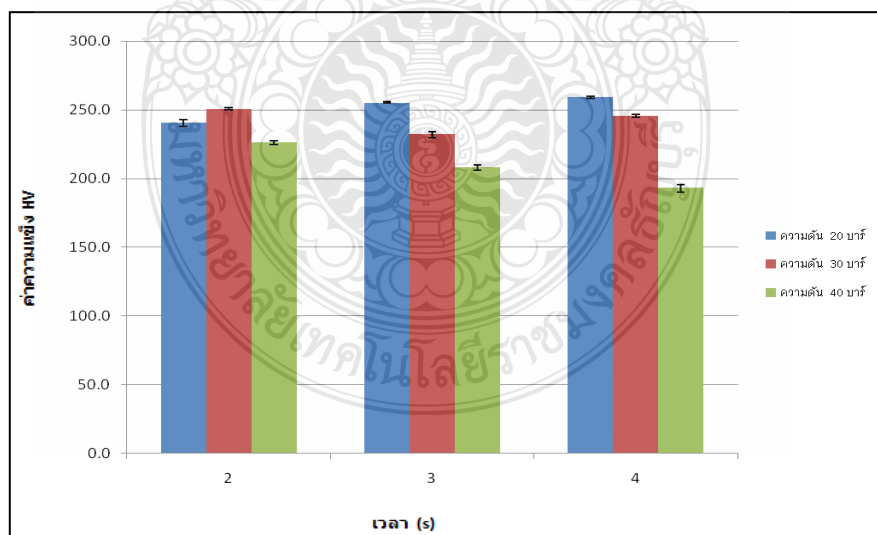
ภาพที่ 4.6 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อม ในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 790°C

จากภาพที่ 4.6 พบว่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่อุณหภูมิ 790°C ความดันและเวลาในการเชื่อมที่ต่างกันค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที มีค่าความแข็งของรอยเชื่อมมากที่สุดเมื่อทำการเพิ่มความดันในการเชื่อมค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม จะมีความแข็งลดลงเพราะชิ้นงานที่นำมาเชื่อมทำการอบอ่อนเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางกลมีค่าความ แข็งลดลงแรงกดอัดสูงขึ้นชิ้นงานมีเกรนเล็กลงความแข็งก็ลดลงด้วย

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 870°C

ความดัน (bar)	เวลา (s)	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HV)
20	2	240.4
	3	255.2
	4	259.2
30	2	250.4
	3	232.4
	4	245.4
40	2	226.2
	3	208.0
	4	193.3

จากความสัมพันธ์ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 870°C สามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้



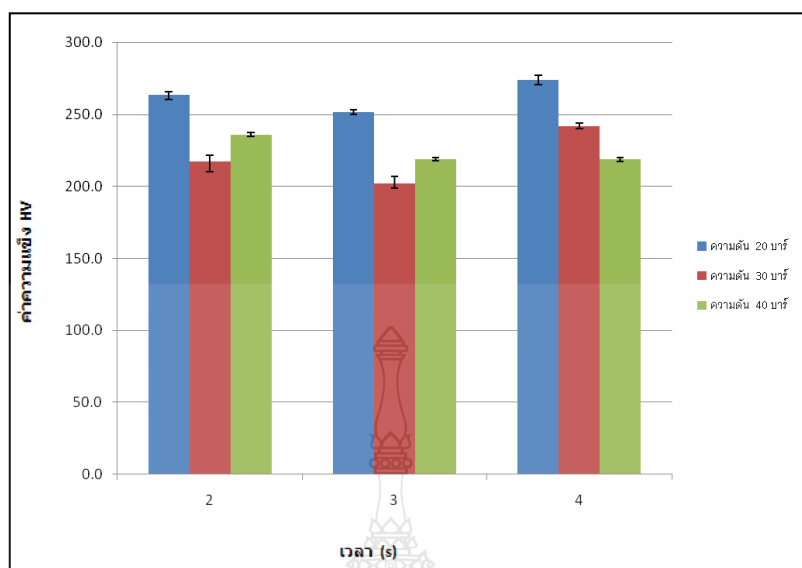
ภาพที่ 4.7 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 870°C

จากภาพที่ 4.7 พบว่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่อุณหภูมิ 870 °C ความดันและเวลาในการเชื่อมที่แตกต่างกันค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที มีค่าความแข็งของรอยเชื่อมมากที่สุดเมื่อทำการเพิ่มความดันในการเชื่อมค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมจะมีความแข็งลดลงเพราะชิ้นงานที่นำมาเชื่อมทำการอบอ่อนเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางกลมีค่าความแข็งลดลงแรงกดอัดสูงขึ้นชิ้นงานมีเกรนเล็กลงความแข็งก็ลดลงด้วย

ตารางที่ 4.8 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 950°C

ความดัน (bar)	เวลา (s)	ค่าความแข็งเนลีย์ (HV)
20	2	263.4
	3	251.8
	4	273.8
30	2	217.2
	3	202.1
	4	241.7
40	2	235.7
	3	218.8
	4	218.8

จากความสัมพันธ์ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อมในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 950°C สามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้



ภาพที่ 4.8 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่แนวเชื่อม
ในแนวนอน (Horizontal) สภาวะอุณหภูมิ 950 °C

จากภาพที่ 4.8 พบว่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่อุณหภูมิ 870 °C ความดันและเวลาในการเชื่อมที่แตกต่างกันค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที มีค่าความแข็งของรอยเชื่อมมากที่สุดเมื่อทำการเพิ่มความดันในการเชื่อมค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมจะมีความแข็งลดลงเพราะชิ้นงานที่นำมาเชื่อมทำการอบอ่อนเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางกลมีค่าความแข็งลดลงและได้รับแรงกดอัดสูงขึ้นชิ้นงานมีเกรนเล็กลงความแข็งก็ลดลงด้วย

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึงของความดันที่อุณหภูมิปกติ

เพื่อทดสอบว่าเวลาและความดันมีผลต่อค่าแรงดึงหรือไม่จึงวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้วิธี ANOVA – Two way ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB 14 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบความแปรปรวนเป็นค่าแรงดึงของความดัน 20 บาร์ ,30 บาร์และ 40 บาร์ ซึ่งเป็นชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิปกติดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าแรงดึงขึ้นงานที่อุณหภูมิปกติ

ความดัน (บาร์)	เวลา (s)			Totals
	2	3	4	
20	47.88	47.36	46.44	141.68
30	46.41	46.74	46.44	139.59
40	45.94	46.35	45.56	137.85
Block Totals	140.23	140.45	138.44	419.12

สมมติฐานการทดสอบ

1) ความดันมีผลต่อค่าแรงดึงหรือไม่

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

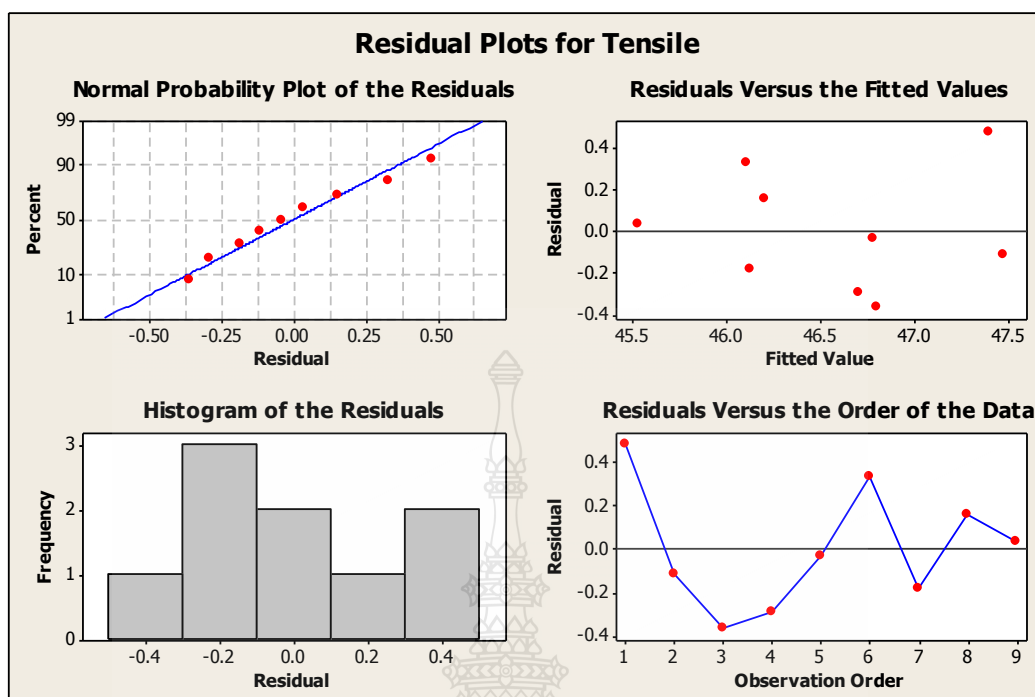
H_1 : อย่างน้อย 1 ค่าแตกต่างกัน

2) เวลา มีผลต่อค่าแรงดึงหรือไม่

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$$

H_1 : อย่างน้อย 1 ค่าแตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม MINITAB 14 ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.10 และแสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลอื่นที่เกี่ยวข้องดังนี้



ภาพที่ 4.9 กราฟ Residual Plots of Tensile

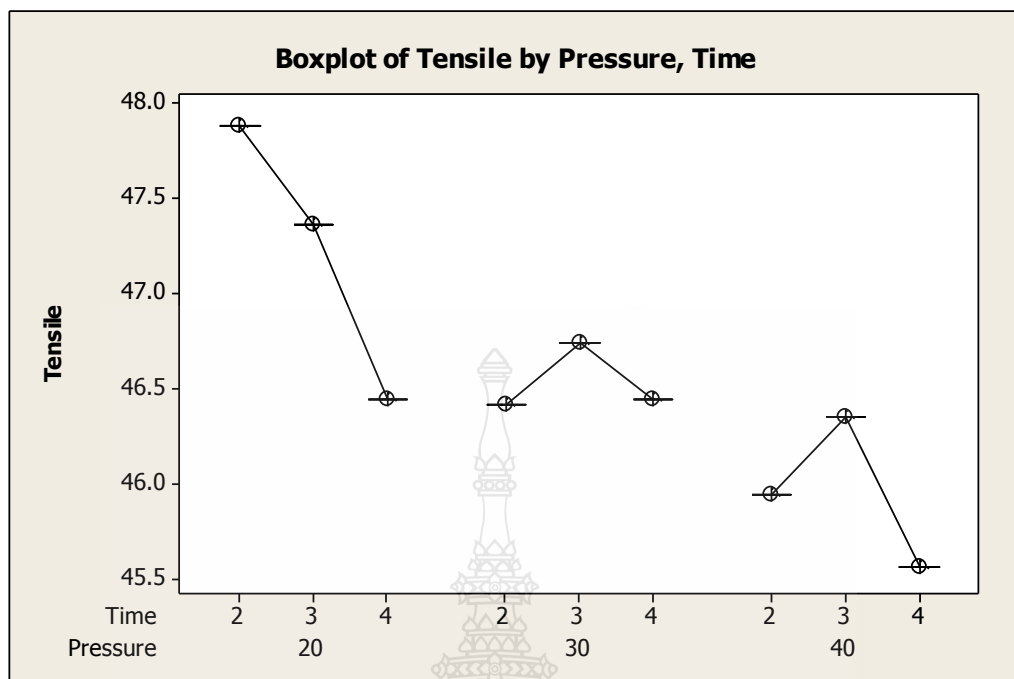
ตารางที่ 4.10 Two – way ANOVA : Tensile versus Pressure, Time

Source	DF	SS	MS	F_0	P
Pressure	2	2.45162	1.22581	7.76	0.042
Time	2	0.81029	0.40514	2.56	0.192
Error	4	0.63198	0.15799		
Total	8	3.89389			

สรุป

จากสมมติฐาน $F_{0.05,2,4} = 6.94$ สรุปได้ว่า $F_0 > 6.94$ ความดันมีผลต่อค่าแรงดึงของอุณหภูมิปกติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากสมมติฐาน $F_{0.05,2,4} = 6.94$ สรุปได้ว่า $F_0 < 6.94$ เวลาไม่มีผลต่อค่าแรงดึงของอุณหภูมิปกติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

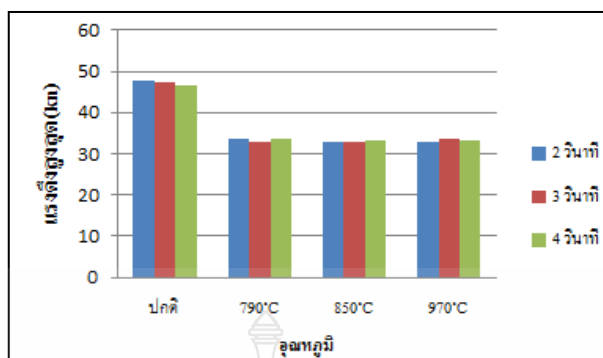


ภาพที่ 4.10 กราฟ Boxplot of Tensile by Pressure, Time

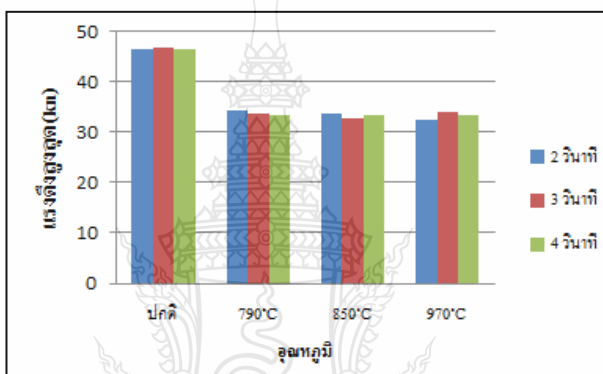
จากภาพที่ 4.10 กราฟ Boxplot of Tensile by Pressure, Time แสดงค่าความดันและเวลากับค่าแรงดึง โดยที่ความดันเพิ่มขึ้นค่าแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อเวลาไม่มีผลต่อแรงดึงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของอนุกรมปกติ

4.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึง

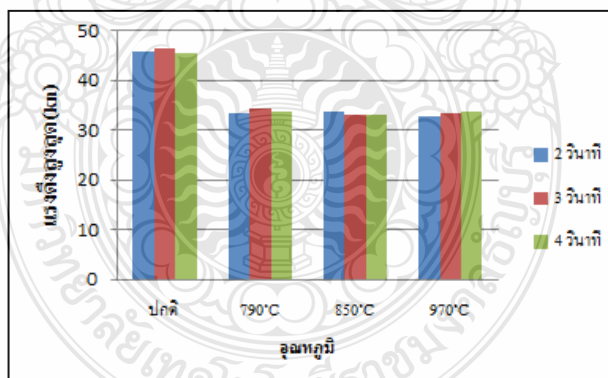
จากความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดระหว่างความดันและเวลาที่อนุกรมปกติ 790°C 870°C และ 950°C ที่ใช้ในการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียหาย สามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้



ก. เปรียบเทียบแรงดึงสูงสุดที่ 20 บาร์



ข. เปรียบเทียบแรงดึงสูงสุดที่ 30 บาร์



ค. เปรียบเทียบแรงดึงสูงสุดที่ 40 บาร์

ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิปกติ 790°C , 870°C และ 950°C ที่ใช้ในการอบอ่อน

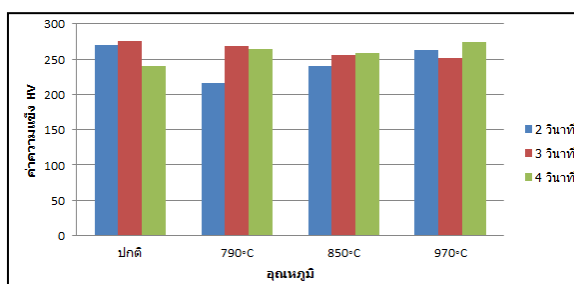
จากภาพที่ 4.11 แสดงค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดระหว่างความดันและเวลาแตกต่างกันที่ อุณหภูมิปกติ 790°C 870°C และ 950°C ที่ใช้ในการอบอ่อน จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิปกติ ความดันกับ เวลาที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 แตกต่างกัน จะให้ค่าแรงดึงสูงสุดไม่แตกต่างกันมากซึ่ง มากกว่าการนำเหล็กกล้า AISI 1045 ไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 790°C 870°C และ 950°C ความดันกับเวลา ที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 แตกต่างกัน จะให้ค่าแรงดึงต่ำกว่าอุณหภูมิปกติ

จากความสัมพันธ์ค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิปกติ 790°C 870°C และ 950°C ที่ใช้ในการอบอ่อน เปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยความเสียดทาน ที่สภาวะอุณหภูมิปกติกับการนำชิ้นงานไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 790°C 870°C และ 950°C แล้วนำไป เชื่อมด้วยความเสียดทาน พบว่าที่สภาวะอุณหภูมิปกติจะทำให้เหล็กทนต่อแรงดึงมากกว่าการนำ ชิ้นงานไปอบอ่อนที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนที่ต่างกัน เพราะชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนจะทำให้ เหล็กอ่อนลงแต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น และชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิที่ต่างกันเหล็กจะทน ต่อค่าแรงดึงได้ไม่ต่างกันเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนยังอยู่ในช่วงของอุณหภูมิการอบอ่อน ของเหล็กกล้า AISI 1045 ทำให้ค่าแรงดึงที่ได้นั้น ไม่แตกต่างกัน

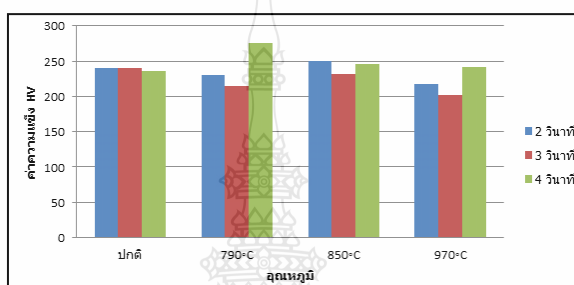
4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบความแข็ง

จากความสัมพันธ์ของค่าความแข็งระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิปกติ 790°C 870°C และ 950°C ที่ใช้ในการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทาน บริเวณแนวเชื่อม สามารถนำเสนอเป็นกราฟได้ดังนี้

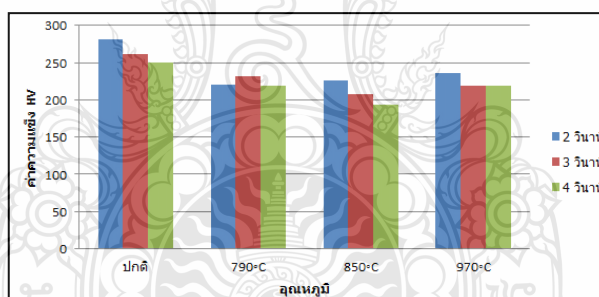




ก.เปรียบเทียบความแข็งที่ 20 บาร์



ข.เปรียบเทียบความแข็งที่ 30 บาร์



ค.เปรียบเทียบความแข็งที่ 40 บาร์

ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ค่าความแข็งระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิปกติ 790°C 870°C และ 950°C ที่ใช้ในการอบอ่อน

จากภาพที่ 4.12 พบว่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิปกติ 790°C 870°C และ 950°C ที่ใช้ในการอบอ่อนที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาทีที่อุณหภูมิปกติของเหล็กกล้า AISI 1045 มีค่าความแข็งสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบผลกับค่าความดัน เวลา อุณหภูมิแตกต่างกัน

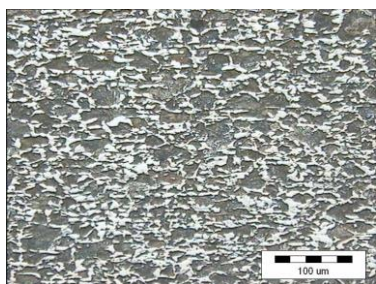
จากความสัมพันธ์ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมระหว่างความดันและเวลาที่อุณหภูมิปกติ 790°C 870°C และ 950°C ที่ใช้ในการอบอ่อนที่ความดันที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาที มีค่าความแข็งของรอยเชื่อมมากที่สุดเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการเชื่อมสูงขึ้นจะทำให้รอยเชื่อมมีค่าลดลง เพราะเหล็กได้รับความร้อนในการเชื่อมมากขึ้นจะทำให้เหล็กมีความแข็งลดลง การนำเหล็กกล้า AISI 1045 ไปทำการอบอ่อนเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติแล้วเชื่อมด้วยความเสียดทานจะมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิปกติของเหล็กเพราะคุณสมบัติของการอบอ่อนทำให้เหล็กได้รับความร้อนเกรนมีขนาดเล็กลงทำให้ความแข็งของชิ้นงานที่อบอ่อนลดลง

4.2.4 การวิเคราะห์แนวเชื่อมด้วยความเสียดทานที่อุณหภูมิปกติ 790°C 870°C และ 950°C ด้วยกล้อง Microscope (ขยาย 200 เท่า)

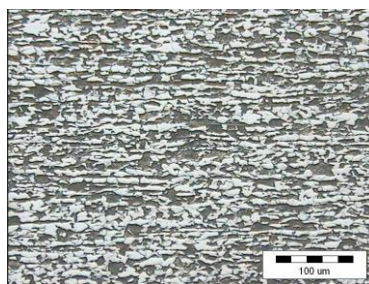
1. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิปกติ ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที



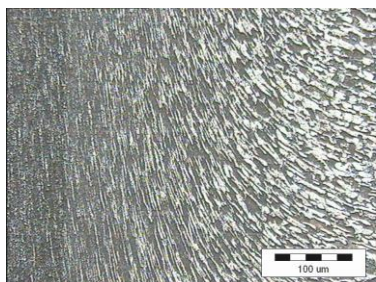
ภาพที่ 4.13 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิปกติ ความดัน 40 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที



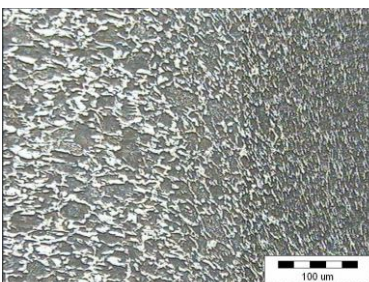
ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย



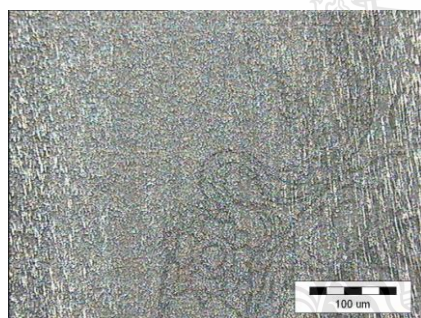
ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างเนวรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
หลักด้านซ้าย



ง. โครงสร้างระหว่างเนวรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
หลักด้านขวา



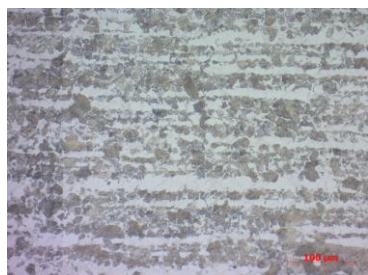
จ. โครงสร้างบริเวณเนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.14 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิปกติ
ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

2. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิ 790°C
ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที



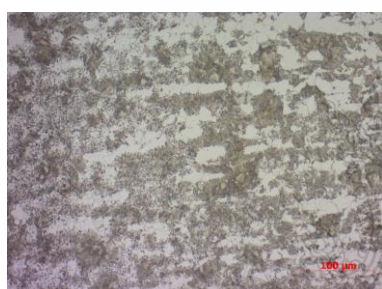
ภาพที่ 4.15 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 790°C
ความดัน 40 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที



ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย



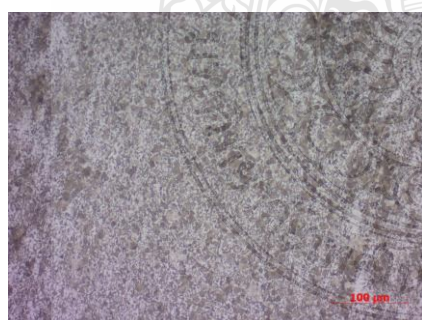
ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
หลักด้านซ้าย



ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
หลักด้านขวา



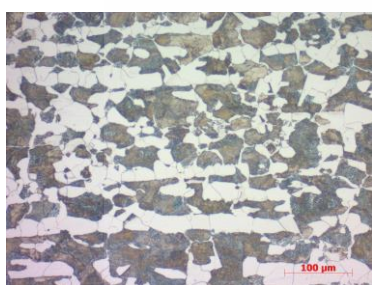
จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.16 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 790°C
ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

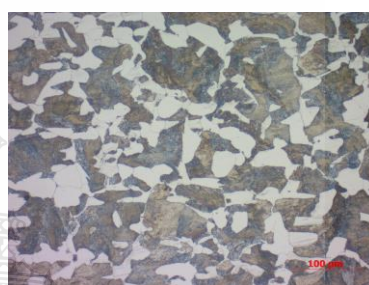
3. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิ 870 °C ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที



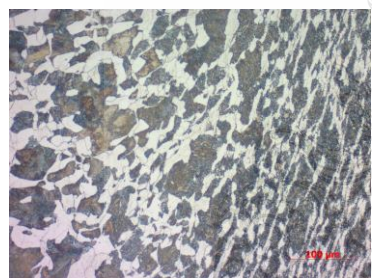
ภาพที่ 4.17 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 870 °C ความดัน 40 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที



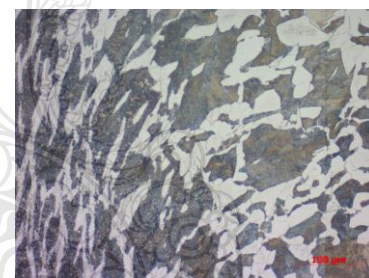
ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย



ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านซ้าย



ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านขวา



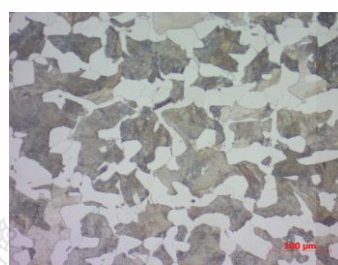
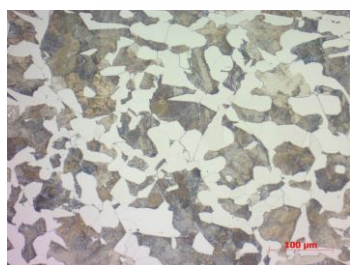
จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.18 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 870 °C ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

4. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิ 950°C ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที

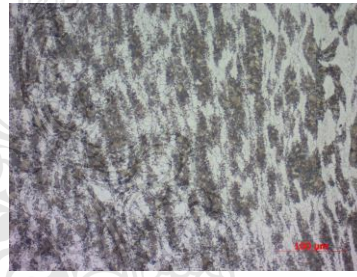
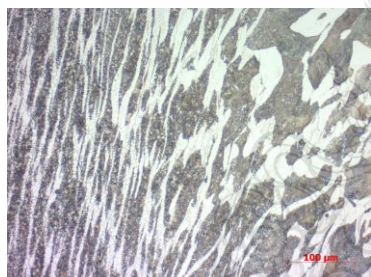


ภาพที่ 4.19 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950°C ความดัน 40 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที



ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย

ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านซ้าย

ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านขวา



จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.20 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950 °C ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

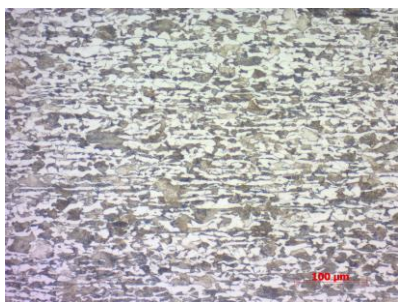
จากภาพที่ 4.14 4.16 และ 4.20 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมด้วยความเสียดทานของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิปกติ ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาที คือชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงกับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน แล้วทำการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยกล้อง Microscope กำลังขยาย 200 เท่า ในการตรวจสอบแนวการเชื่อมพบว่าแนวการเชื่อมยึดติดกันสมบูรณ์ไม่เกิดการแตกร้าวที่รอยเชื่อมและมีเกรนเล็กกลวงโดยแนวเชื่อมของชิ้นงานไม่มีความแตกต่างกัน

5. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิปกติ ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที

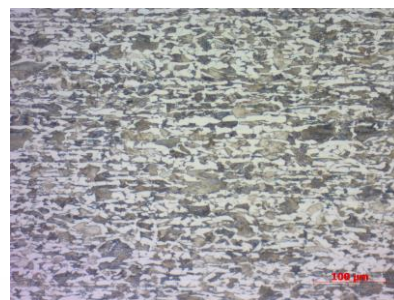


ภาพที่ 4.21 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิปกติ ความดัน 30 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที

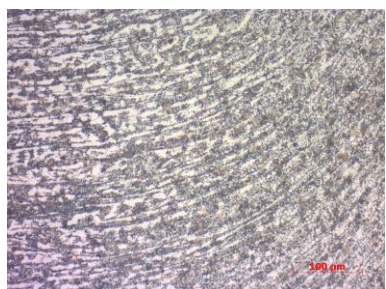




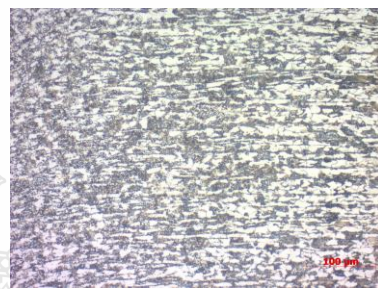
ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย



ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านซ้าย



ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านขวา



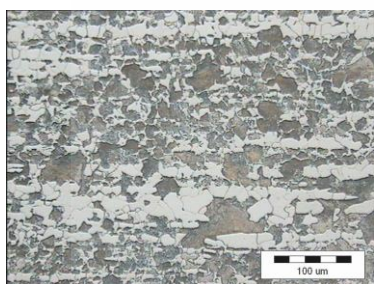
จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.22 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิปกติ ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

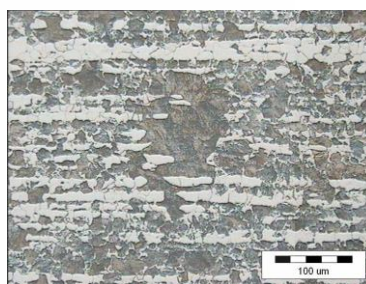
6. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิ 790°C ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที



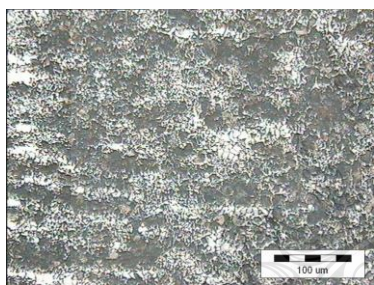
ภาพที่ 4.23 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 790 °C
ความดัน 30 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที



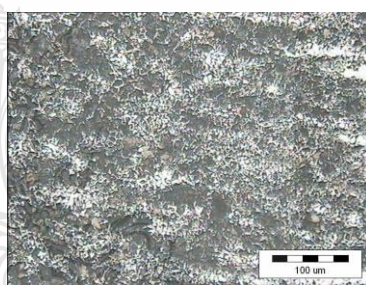
ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย



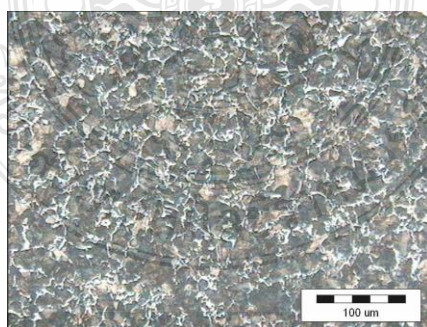
ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
หลักด้านซ้าย



ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
หลักด้านขวา



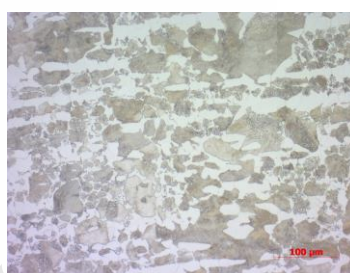
จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.24 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 790°C
ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

7. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิ 870°C ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที

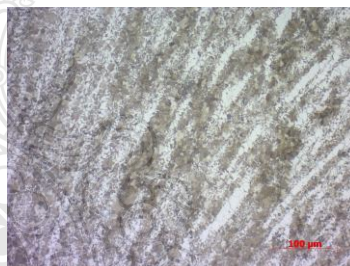
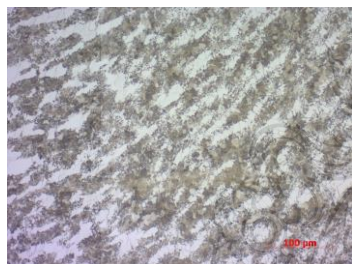


ภาพที่ 4.25 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 870°C ความดัน 30 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที



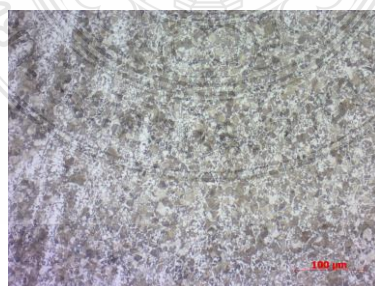
ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย

ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านซ้าย

ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านขวา



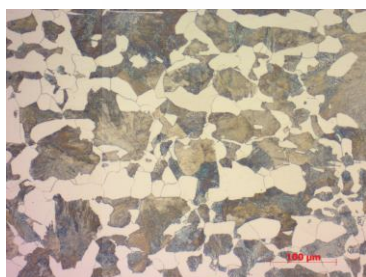
จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.26 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 870°C ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

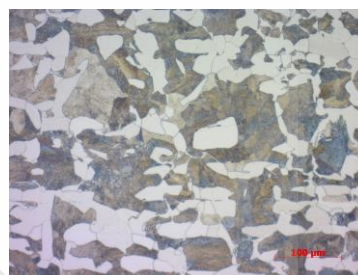
8. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิ 950°C ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที



ภาพที่ 4.27 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950°C ความดัน 30 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที



ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย



ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านซ้าย



ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านขวา



จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

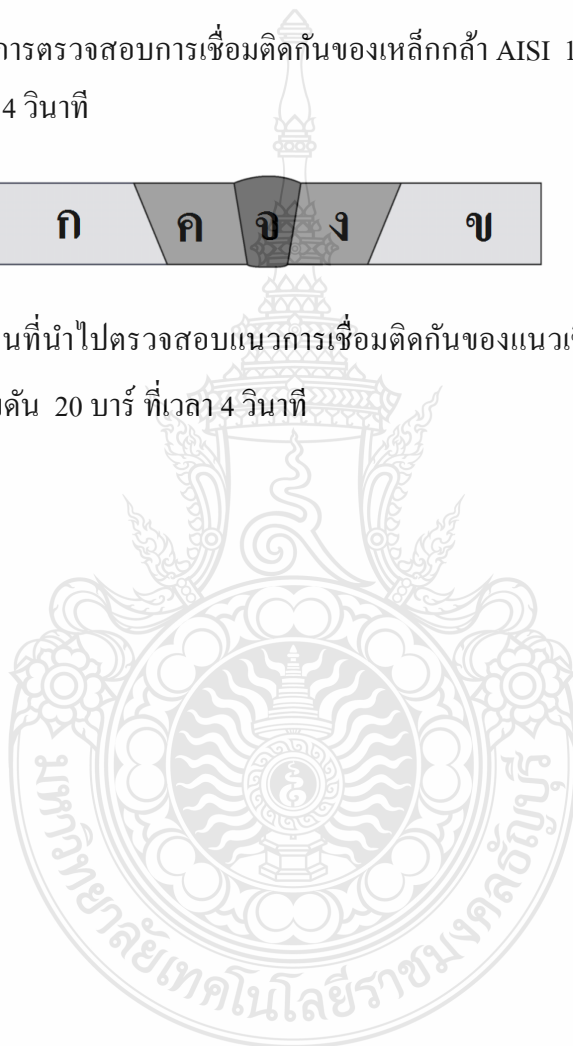
ภาพที่ 4.28 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950°C ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

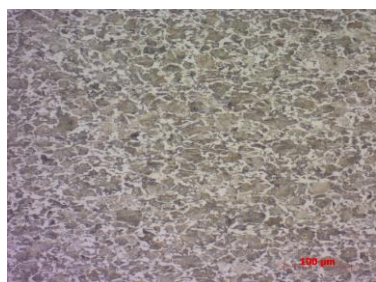
จากภาพที่ 4.22, 4.24, 4.26 และ 4.28 ซึ่งงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมด้วยความเสียดทานของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 790°C ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาที คือชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งกับอุณหภูมิในการอบอ่อนแตกต่างกัน ซึ่งความดันและเวลาเท่ากัน ทำการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยกล้อง Microscope กำลังขยาย 200 เท่า ในการตรวจสอบแนวการเชื่อมพบว่าไม่มีแนวการเชื่อมยึดติดกันสมบูรณ์ไม่เกิดการแตกร้าวที่บริเวณรอยเชื่อมและมีเกรนเล็กลง

9. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิปกติ ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที



ภาพที่ 4.29 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิปกติ ความดัน 20 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที

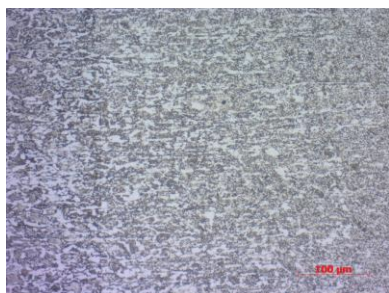




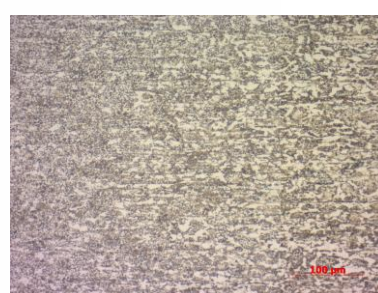
ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย



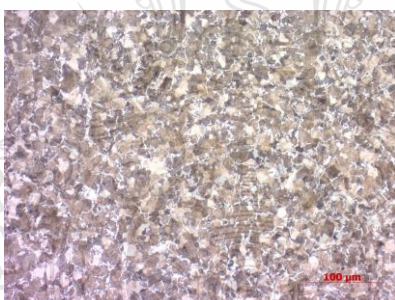
ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
หลักด้านซ้าย



ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
หลักด้านขวา



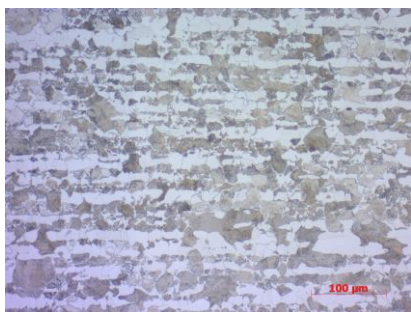
จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.30 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิปกติ
ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

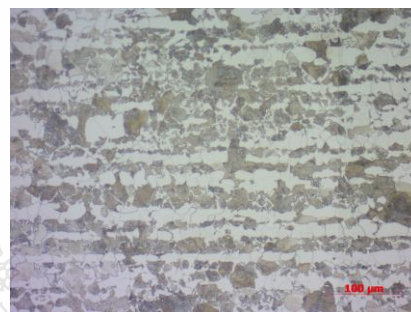
10. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิ 790°C
ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที



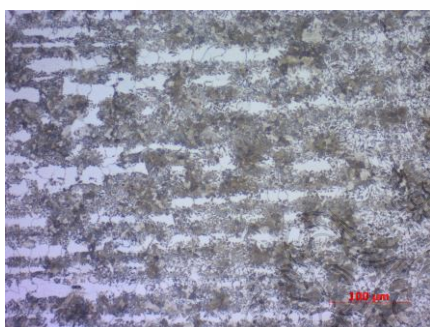
ภาพที่ 4.31 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 790°C
ความดัน 20 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที



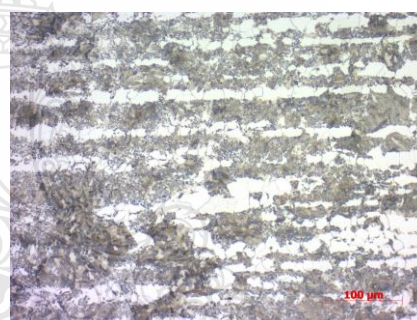
ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย



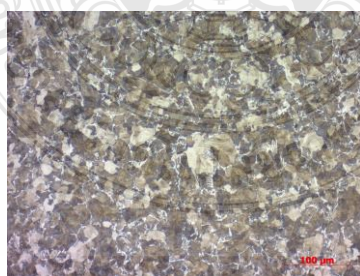
ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
หลักด้านซ้าย



ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงาน
หลักด้านขวา



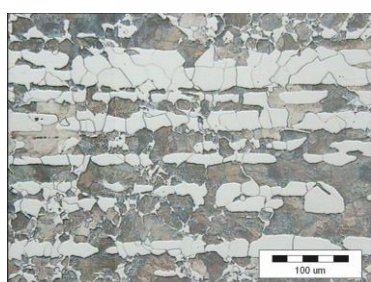
จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.32 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 790°C
ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

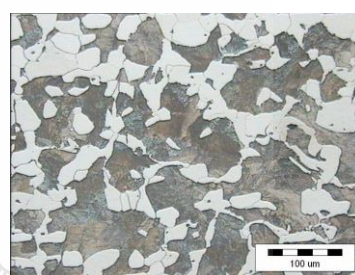
11. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิ 870°C ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที



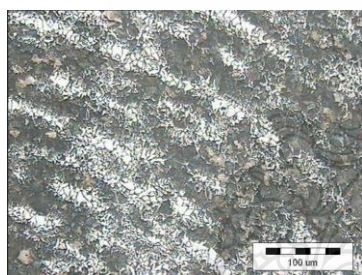
ภาพที่ 4.33 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 870°C ความดัน 20 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที



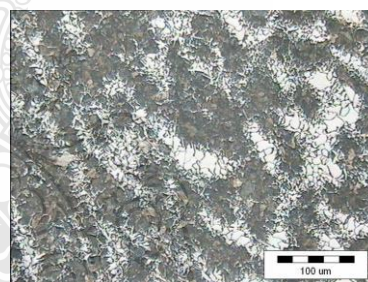
ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย



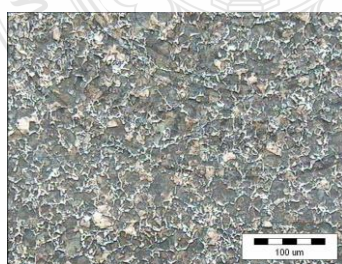
ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านซ้าย



ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านขวา



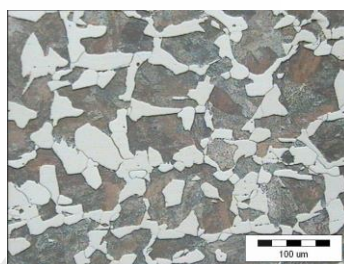
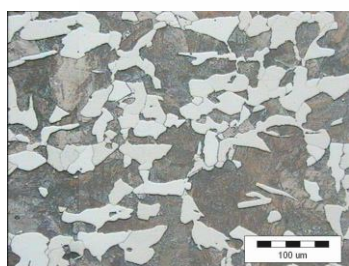
จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.34 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 870°C ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

12. ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่สภาวะอุณหภูมิ 950°C ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที

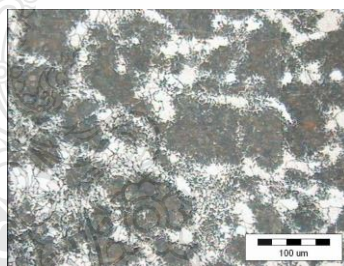
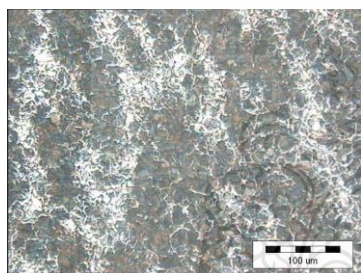


ภาพที่ 4.35 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950°C ความดัน 20 บาร์ ที่เวลา 4 วินาที



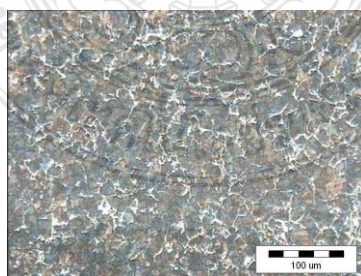
ก. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านซ้าย

ข. โครงสร้างบริเวณชิ้นงานหลักด้านขวา



ค. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านซ้าย

ง. โครงสร้างระหว่างแนวรอยเชื่อมกับชิ้นงานหลักด้านขวา



จ. โครงสร้างบริเวณแนวรอยเชื่อม

ภาพที่ 4.36 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950°C ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาที กำลังขยาย 200 เท่า

จากภาพที่ 4.30, 4.32, 4.34 และ 4.36 ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบแนวการเชื่อมด้วยความเสียดทานของแนวเชื่อมเหล็กอุณหภูมิ 950°C ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาทีคือชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งและอุณหภูมิในการอบอ่อนที่แตกต่างกัน ทำการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยกล้อง Microscope กำลังขยาย 200 เท่า ในการตรวจสอบแนวการเชื่อมพบว่า มีแนวการเชื่อมยึดติดกันสมบูรณ์ไม่เกิดการแตกร้าวที่บริเวณรอยเชื่อมและมีเกรนเล็กลง

จากการวิเคราะห์รอยเชื่อมด้วยความเสียดทานรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเสียดทานมีการยึดติดกันสมบูรณ์และไม่เกิดการแตกร้าวที่รอยเชื่อม การเชื่อมด้วยความเสียดทานเป็นการทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนสูงทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างเดิมของชิ้นงานเกรนละเอียดขึ้นซึ่งมีปัจจัยที่ทำให้เกรนละเอียดหรือเกรนมีขนาดเล็กลงมีอยู่ 2 ประการคือ ชิ้นงานเกิดความร้อนและชิ้นงานได้รับแรงกดอัด โดยชิ้นงานที่ทำการทดลองนั้นได้รับปัจจัยทั้ง 2 ประการที่ทำให้เกิดเกรนละเอียดชิ้นงานมีความแข็งลดลง ซึ่งค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีค่าสูงเกิดจากชิ้นงานหลังการเชื่อมนั้นเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์

จากการวิเคราะห์ผล พบว่าอุณหภูมิในการอบอ่อนมีผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานเหล็กที่ไม่ผ่านการอบอ่อนจะทนต่อค่าแรงดึงได้สูงกว่าเหล็กที่ผ่านการอบอ่อนและค่าความแข็งของรอยเชื่อมเหล็กที่ไม่ผ่านการอบอ่อนจะมีค่าความแข็งของบริเวณรอยเชื่อมน้อยกว่าเนื้อวัสดุเดิมของชิ้นงานส่วนเหล็กที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันจะมีค่าความแข็งของรอยเชื่อมมีค่าสูงกว่าเนื้อวัสดุเดิมของชิ้นงาน

บทที่ 5

สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ

หลังจากที่ได้ดำเนินการทำการทำปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทาน ทำให้ทราบถึงแนวโน้ม ทิศทาง และปัญหาของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 เมื่อมีการเพิ่มตัวแปรให้กับการเชื่อมความเสียดทาน เช่น อุณหภูมิในการอบอ่อน ความดันและเวลาในการเชื่อม เป็นต้น ในการดำเนินโครงการนี้ได้ผลการทดลองที่มีความแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติการเปลี่ยนโครงสร้างของเหล็กกล้า AISI 1045 และสามารถสรุปผลโครงการได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทำโครงการ

5.1.1 การเชื่อมชิ้นงานด้วยความเสียดทานระหว่างอุณหภูมิปกติของชิ้นงานและการนำชิ้นงานไปทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 790 °C , 870 °C และ 950 °C พบว่าที่อุณหภูมิปกติของชิ้นงานหลังจากเชื่อมชิ้นงานค่าแรงดึงจะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน แต่ค่าความแข็งของรอยเชื่อมชิ้นงานที่อุณหภูมิปกติบริเวณของรอยเชื่อมจะมีค่าน้อยกว่าบริเวณเนื้อของวัสดุและค่าความแข็งของรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนบริเวณของรอยเชื่อมจะมีค่ามากกว่าบริเวณของเนื้อวัสดุ ซึ่งการเชื่อมชิ้นงานต้องการให้รอยเชื่อมนั้นมีค่าความแข็งมากกว่าเนื้อวัสดุเดิมของชิ้นงาน การนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงจุดขาดของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนจะขาดบริเวณรอยเชื่อมส่วนชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 790 °C , 870 °C และ 950 °C จะไม่ขาดบริเวณรอยเชื่อม

5.1.2 ความดันที่ใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทานคือ 20 บาร์ 30 บาร์และ 40 บาร์นำชิ้นงานที่ทดลองเสร็จแล้วไปทดสอบแรงดึงและทดสอบความแข็งซึ่งความดันมีผลต่อค่าแรงดึงในการเชื่อมชิ้นงานเมื่อทำการเพิ่มความดันในการเชื่อมสูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานทนต่อค่าแรงดึงได้น้อยลงและค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมนั้นมีค่าลดลงด้วย

5.1.3 เวลาที่ใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทานคือ 2 วินาที 3 วินาทีและ 4 วินาทีเวลานำชิ้นงานที่ทดลองเสร็จแล้วไปทดสอบแรงดึงและทดสอบความแข็งซึ่งเวลาไม่มีผลต่อค่าแรงดึงชิ้นงานเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการเชื่อมสูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานมีค่าแรงดึงไม่แตกต่างกัน

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินโครงการ

- 5.2.1 ปรับเปลี่ยนจากเหล็กกล้า AISI 1060 เป็นเหล็กกล้า AISI 1045
- 5.2.2 ผิวหน้าตัดก่อนการเชื่อมไม่เรียบทำให้เชื่อมไม่ติด
- 5.2.3 การควบคุมความดันในการกดอัดไม่คงที่
- 5.2.4 การไม่ได้ศูนย์ของชิ้นงานระหว่างชิ้นงานที่อยู่หัวจับเครื่องกลึงกับชิ้นงานที่อยู่หัวจับไฮดรอลิก

5.3 ข้อเสนอแนะในการทดลอง

- 5.3.1 การควบคุมความดันและเวลาสามารถสร้างชุดควบคุมขึ้นมาเพื่อควบคุมแบบอัตโนมัติ
- 5.3.2 ก่อนนำชิ้นงานไปเชื่อมควรทำความสะอาดบริเวณผิวชิ้นงาน
- 5.3.3 การเลื่อยชิ้นงานควรใช้เครื่องในการแบ่งครึ่งชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบ



บรรณานุกรม

- [1] Mumin Sahin, H. Erol Akata and Turgut Gulmez . 2550. Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding Department of Mechanical Engineering, Trakya University.
- [2] เศรษฐา สุเพ็งคำ, และคณะ. 2546. เครื่องเชื่อมแรงเสียดทาน ปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง คณะอุตสาหกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [3] สุรสิงห์ อารยางค์กูร และคณะ. 2551. การเชื่อมเหล็กกล้าด้วยความเสียดทาน วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [4] งานเชื่อมโลหะ . [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
http://www.mtec.or.th/images/users/78/55FAQ_Arc_metal/01_Welding.pdf
- [5] มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร. 2542. คู่มือการเชื่อมมิก-แม็ก. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น
- [6] อติศักดิ์ วรรณะวัลย์. 2521. วิศวกรรมกรรมการเชื่อม. กรุงเทพฯ : พิมพ์ครั้งที่ 2
- [7] Sahin Mumin. 2547. Simulation of friction welding using a developed computer program Department of Mechanical Engineering, Trakya University.
- [8] Advantage Fabricated Metals. **Shielded Metal Arc Welding**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<http://www.Advantagefabricatedmetals.com/images/smaw.gif>
- [9] ณรงค์ ต้นชีวะวงศ์. 2539. ระบบไฮดรอลิก. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย- ญี่ปุ่น).
- [10] โลหะเหล็ก AISI 1045. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<http://www.teacher.snru.ac.th/preechasat/admin/news/files/IT%2002.doc>
- [11] มนต์ สติธิจินดา. 2543. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (ไทย- ญี่ปุ่น).
- [12] Sammak. **Microscope**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
http://www.princess-it.org/kp9/hrh-rojects/file/20060327_sammakkee/Aee/Lunla/index.htm
- [13] มานะ ต้นตระบันฑิตย์. 2546. งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : ทีเอสบี โปรดักส์.
- [14] เครื่องทดสอบแรงดึง. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<http://ayutthaya.olxthailand.com/iid-163350218>

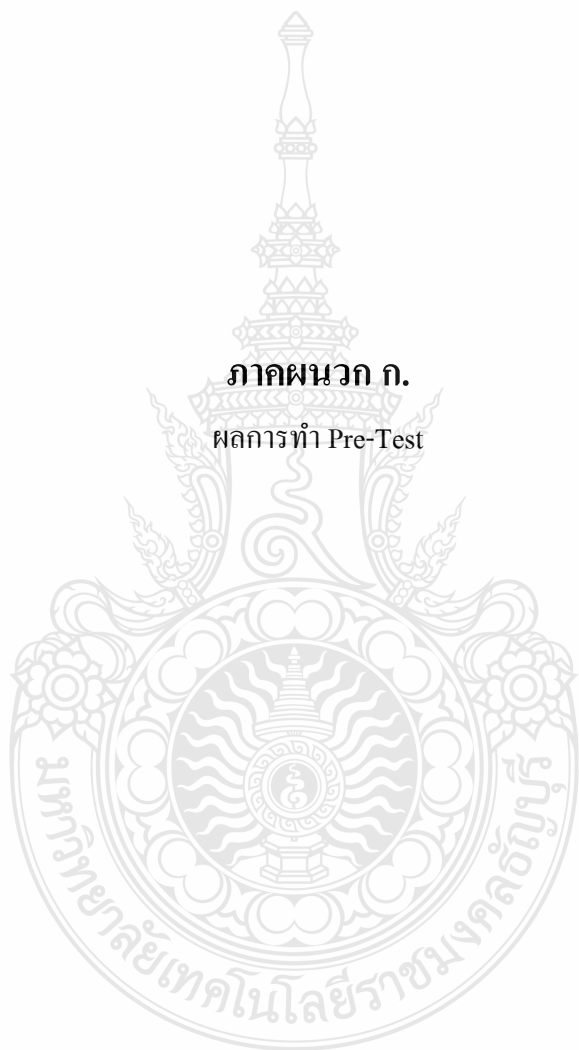
[15] Sammak. **Microhardness**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :

<http://host.psu.ac.th/~chanya.ch/instrument/mh.htm>



ภาคผนวก ก.

ผลการทำ Pre-Test





ภาพที่ ก.1 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที เวลา 2 วินาที ความดัน 20 บาร์



ภาพที่ ก.2 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาที เวลา 2 วินาที ความดัน 20 บาร์



ภาพที่ ก.3 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานด้วยความเร็วรอบ 2,200 รอบ/นาที เวลา 2 วินาที ความดัน 20 บาร์



ภาพที่ ก.4 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เวลา 1 วินาที ความดัน 20 บาร์



ภาพที่ ก.5 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เวลา 2 วินาที ความดัน 20 บาร์



ภาพที่ ก.6 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เวลา 3 วินาที ความดัน 20 บาร์



ภาพที่ ก.7 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เวลา 4 วินาที ความดัน 20 บาร์



ภาพที่ ก.8 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เวลา 5 วินาที ความดัน 20 บาร์



ภาพที่ ก.9 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เวลา 2 วินาที ความดัน 20 บาร์



ภาพที่ ก.10 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เวลา 2 วินาที ความดัน 30 บาร์



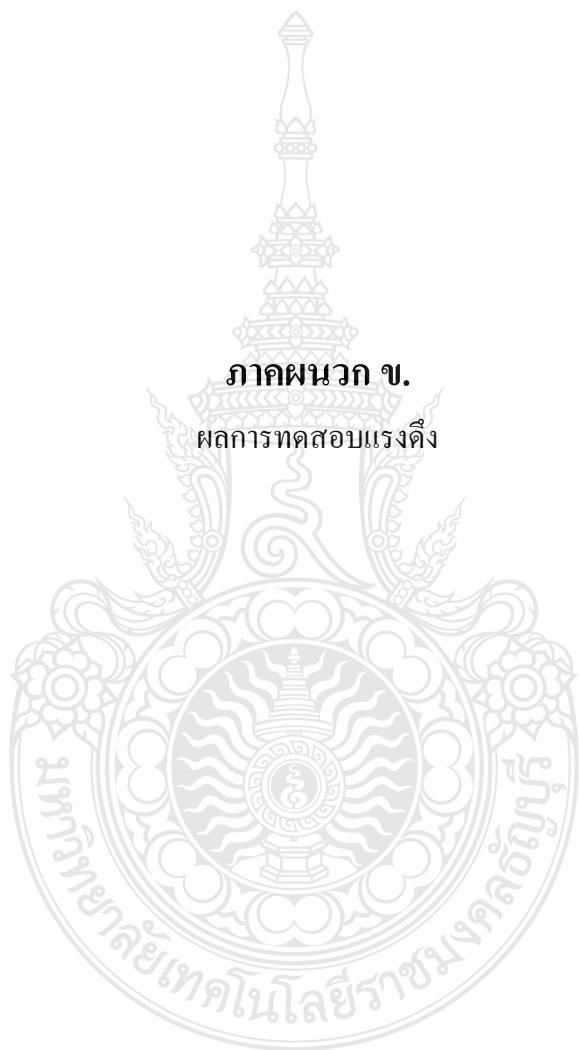
ภาพที่ ก.11 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เวลา 2 วินาที ความดัน 40 บาร์



ภาพที่ ก.12 ชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานที่เวลา 2 วินาที ความดัน 50 บาร์

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบแรงดึง



ตาราง ข.1 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่อุณหภูมิปกติ

ชิ้นงาน		แรงดึงสูงสุด (kN)			ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด (kN)
ความดัน (บาร์)	เวลา (วินาที)	1	2	3	
20	2	46.62	49.04	47.98	47.88
	3	49.08	45.43	47.56	47.36
	4	46.35	46.54	46.43	46.44
30	2	45.93	46.97	46.32	46.41
	3	46.31	48.23	45.67	46.74
	4	47.27	45.54	46.50	46.44
40	2	45.58	46.27	45.98	45.94
	3	45.93	47.12	46.00	46.35
	4	44.93	46.01	45.75	45.56

ตาราง ข.2 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่อุณหภูมิ 790°C

ชิ้นงาน		แรงดึงสูงสุด (kN)			ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด (kN)
ความดัน (บาร์)	เวลา (วินาที)	1	2	3	
20	2	34.15	33.36	33.76	33.76
	3	32.75	32.58	32.65	32.66
	4	33.46	33.45	33.45	33.45
30	2	34.04	34.81	34.54	34.46
	3	33.45	33.56	33.67	33.56
	4	33.57	32.96	33.27	33.27
40	2	33.76	32.92	33.87	33.52
	3	34.32	34.01	34.50	34.28
	4	33.62	33.91	33.65	33.73

ตาราง ข.3 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่อุณหภูมิ 870°C

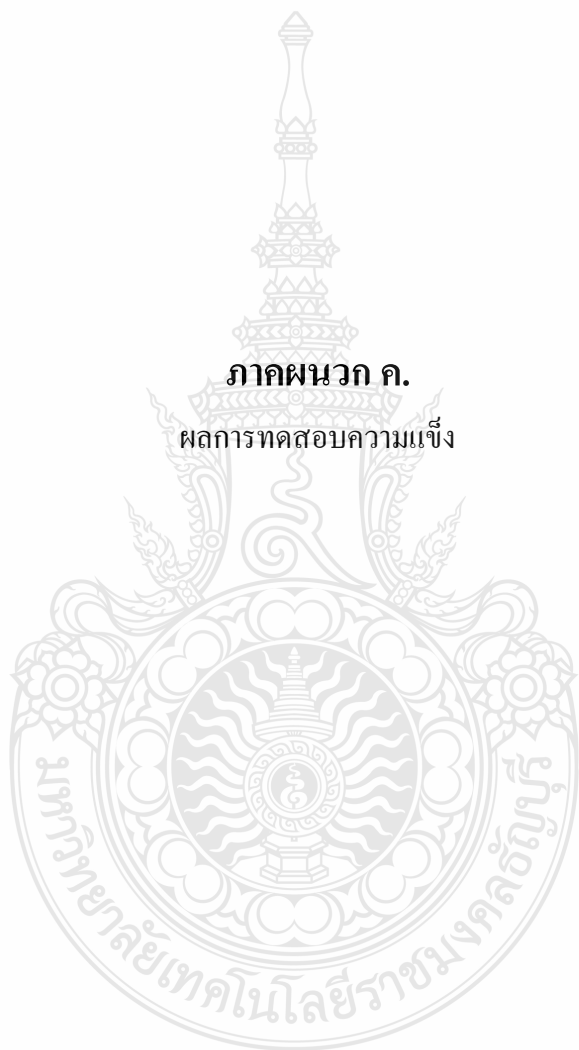
ชิ้นงาน		แรงดึงสูงสุด (kN)			ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด (kN)
ความดัน (บาร์)	เวลา (วินาที)	1	2	3	
20	2	32.77	33.10	32.80	32.89
	3	32.79	32.62	32.66	32.69
	4	33.12	33.12	33.23	33.16
30	2	33.52	33.66	33.97	33.72
	3	32.64	32.72	32.54	32.63
	4	33.65	32.82	33.50	33.32
40	2	33.3	34.21	33.75	33.75
	3	33.32	33.11	33.22	33.22
	4	33.17	33.22	33.30	33.23

ตาราง ข.4 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานที่อุณหภูมิ 950°C

ชิ้นงาน		แรงดึงสูงสุด (kN)			ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุด (kN)
ความดัน (บาร์)	เวลา (วินาที)	1	2	3	
20	2	33.43	32.25	32.75	32.81
	3	33.65	33.57	33.45	33.56
	4	32.88	33.32	33.98	33.39
30	2	32.78	32.40	32.59	32.59
	3	34.01	34.56	33.70	34.09
	4	33.47	33.03	33.25	33.25
40	2	32.6	32.96	32.78	32.78
	3	33.05	32.85	33.97	33.29
	4	33.7	33.8	33.50	33.67

ภาคผนวก ค.

ผลการทดสอบความแข็ง



ตาราง ค.1 ค่าความแข็งแรงของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็งแรง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	327.4	324.4	284.2	280.3	277.1	270.6	272.7	270.0	287.2	290.0	310.7
2	320.6	310.1	285.1	279.6	274.3	270.8	278.2	289.1	285.0	310.6	316.5
3	318.9	300.1	286.1	281.3	275.4	268.1	275.6	278.9	286.4	299.8	318.5
เฉลี่ย	322.3	311.5	285.1	280.4	275.6	269.8	275.5	279.3	286.2	300.1	315.2

ตาราง ค.2 ค่าความแข็งแรงของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็งแรง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	288.3	287.2	284.3	278	270.6	283.0	280.5	283.4	285
2	282.1	273.4	275.8	275	270.8	270.1	279.1	280.4	284.5
3	274.3	276.3	275.8	269.6	268.1	276.9	275.6	280.3	283
เฉลี่ย	282	279	278.6	274.2	269.8	276.7	278.4	281.4	284.2

ตาราง ค.3 ค่าความแข็งแรงของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็งแรง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	301.6	311.5	267.5	237.5	259.7	276.1	270.8	268.7	266.2	292.8	288.3
2	300.8	300.1	263.1	265.7	265.3	275.0	271.4	250.0	265.0	290.7	290.2
3	295.1	298.4	262.8	270.1	268.9	276.4	272.2	259.7	267.5	286.4	295.1
เฉลี่ย	299.2	303.3	264.5	257.8	264.6	275.8	271.5	259.5	266.2	290.0	291.2

ตาราง ค.4 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	283.2	280.1	271.4	248.7	276.1	267.8	276.7	279.1	285.3
2	280.4	279.9	270.8	268.9	275.0	270.1	275.7	283.8	286.1
3	284.4	285.3	270.0	276.1	276.4	270.9	277.0	280.3	278.9
เฉลี่ย	282.7	281.8	270.7	264.6	275.8	269.6	276.5	281.1	283.4

ตาราง ค.5 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	289.3	293.7	270.1	240.0	251.6	238.9	250.1	260.1	280.1	286.1	321.8
2	300.0	290.2	280.1	266.2	250.1	240.7	252.0	266.2	284.1	293.7	305.6
3	301.1	290.0	284.1	261.2	252.0	240.9	248.1	261.2	281.1	290.2	300.0
เฉลี่ย	296.8	291.3	278.1	255.8	251.2	240.2	250.1	262.5	281.1	290.0	309.1

ตาราง ค.6 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	276.3	267.3	263.1	265.9	238.9	260.3	270.0	268.2	275.3
2	270.3	263.4	255.9	260.1	240.7	265.9	260.1	267.3	271.3
3	268.3	266.9	265.1	250.2	240.9	260.1	265.9	270.1	271.9
เฉลี่ย	271.6	265.9	261.4	258.7	240.2	262.1	265.3	268.5	272.8

ตาราง ก.7 ค่าความแข็งแรงของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ (mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็งแรง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	289.0	302.8	300.5	281.9	251.9	240.2	249.8	280.1	290.1	290.1	298.2
2	299.2	296.1	289.2	280.5	250.3	240.0	248.1	280.5	288.8	296.1	299.2
3	299.2	295.7	288.8	278.8	252.8	241.0	250.1	278.8	280.8	295.7	307.6
เฉลี่ย	295.8	298.2	292.8	280.4	251.7	240.4	249.3	279.8	286.3	294.0	301.7

ตาราง ก.8 ค่าความแข็งแรงของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ (mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็งแรง HV									
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
1	250.2	250.1	247.3	247.9	240.2	241.2	247.2	249.5	252.4	
2	247.1	242.1	240.2	240.3	240.0	248.9	245.1	250.3	251.2	
3	248.3	246.2	247.3	243.1	241.0	240.2	242.3	248.7	250.2	
เฉลี่ย	248.5	246.1	244.9	243.8	240.4	243.4	244.9	249.5	251.3	

ตาราง ก.9 ค่าความแข็งแรงของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ (mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็งแรง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	296.7	292.6	270.4	256.6	235.1	243.3	261.5	291.9	304	308.7	311.9
2	308.7	291.9	270.0	259.0	259.0	238.2	259.0	290.3	300.1	300.2	310.0
3	300.2	290.3	272.2	258.2	238.2	239.9	258.2	288.0	290.3	310.0	301.1
เฉลี่ย	301.9	291.6	270.9	257.9	244.1	240.5	259.6	290.1	298.1	306.3	307.7

ตาราง ค.10 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	233.1	237.7	233.6	235.7	243.3	237.5	235.4	235.1	230.1
2	240.1	235.3	235.4	237.1	238.2	238.2	243.3	236.1	232.6
3	243.3	238.9	235.4	241.0	239.9	235.1	240.0	238.9	248.9
เฉลี่ย	238.8	237.3	234.8	237.9	240.5	236.9	239.6	236.7	237.2

ตาราง ค.11 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	286.1	276.1	271.7	265.3	249.2	234.1	229.7	239.1	276.7	277.2	285.3
2	285.9	277.2	276.7	265.0	250.0	235.6	234.1	240.9	270.3	275.0	286.1
3	285.5	275.0	270.3	264.3	250.0	238.6	235.6	241.1	275.0	276.7	285.9
เฉลี่ย	285.8	276.1	272.9	264.9	249.7	236.1	233.1	240.4	274.0	276.3	285.8

ตาราง ค.12 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	232.9	235.3	233.8	222.2	234.1	218.6	233.5	230.4	236.5
2	235.7	230.2	235.9	237.4	235.6	229.7	234.1	235.8	234.9
3	236.8	233.8	237.4	240.9	238.6	238.6	233.8	234.7	237.8
เฉลี่ย	235.1	233.1	235.7	233.5	236.1	229.0	233.8	233.6	236.4

ตาราง ค.13 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	319.3	319.7	328.3	300.1	285.4	284.0	273.7	294.8	311.5	326.6	301.6
2	319.7	320.8	294.8	300.0	289.0	280.9	275.7	300.0	310.9	319.3	319.3
3	320.8	310.8	300.0	300.0	284.0	281.1	278.9	300.1	309.8	300.0	319.7
เฉลี่ย	319.9	317.1	307.7	300.0	286.1	282.0	276.1	298.3	310.7	315.3	313.5

ตาราง ค.14 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	271.2	266.9	277.1	268.2	284.0	265.6	249.5	260.9	273.2
2	270.1	265.3	275.7	273.7	280.9	273.7	284.0	280.9	276.9
3	275.2	277.3	278.9	275.7	281.1	275.7	285.4	279.3	273.7
เฉลี่ย	272.2	269.8	277.2	272.5	282.0	271.7	273.0	273.7	274.6

ตาราง ค.15 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	310.0	300.1	296.2	288.8	245.1	262.4	300.3	297.2	298.2	310.0	320.1
2	315.8	310.2	295.1	295.1	240.9	260.0	297.2	296.2	300.1	310.0	315.0
3	317.7	300.0	294.3	294.3	240.1	260.6	298.2	295.1	310.2	315.8	319.0
เฉลี่ย	314.5	303.4	295.2	292.7	242.0	261.0	298.6	296.2	302.8	311.9	318.0

ตาราง ค.16 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	260.7	257.3	254.5	256.9	262.4	244.9	253.9	255.3	256.3
2	265.5	255.5	260.1	258.7	260.0	240.9	254.5	256.1	257.8
3	264.3	257.3	263.1	259.9	260.6	240.1	260.1	260.1	258.9
เฉลี่ย	263.5	256.7	259.2	258.5	261.0	242.0	256.2	257.2	257.7

ตาราง ค.17 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	323.1	317.3	302.4	298.0	277.8	248.7	267.5	289.7	296.0	307.7	312.7
2	320.1	320.1	300.1	285.2	276.8	250.1	274.8	290.2	295.1	302.4	310.4
3	319.5	318.3	305.1	294.4	275.6	251.1	271.2	293.1	297.1	300.1	315.8
เฉลี่ย	320.9	318.6	302.5	292.5	276.7	250.0	271.2	291.0	296.1	303.4	313.0

ตาราง ค.18 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิปกติ

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	256.8	260.4	257.8	268.5	248.7	255.7	251.3	253.4	254.9
2	256.8	257.8	255.0	260.3	250.1	253.3	255.7	263.5	267.8
3	259.3	260.2	254.5	258.8	251.1	251.9	253.3	260.9	255.9
เฉลี่ย	257.6	259.5	255.8	262.5	250.0	253.6	253.4	259.3	259.5

ตาราง ค.19 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียหายในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	174.3	180.2	185.0	197.0	208.9	217.1	200.7	189.5	177.2	155.6	147.5
2	175.8	181.3	183.8	197.0	200.1	220.4	204.0	190.1	178.9	156.8	150.0
3	174.3	180.0	185.9	195.2	200.0	210.0	201.9	193.0	175.7	168.0	151.0
เฉลี่ย	174.8	180.5	184.9	196.4	203.0	215.8	202.2	190.9	177.3	160.1	149.5

ตาราง ค.20 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียหายในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	238.9	240.1	241.9	227.1	217.1	240.0	239.1	230.3	235.6
2	240.5	241.2	240.0	230.5	220.4	238.3	240.4	235.4	238.9
3	239.2	243.2	239.4	231.2	210.0	240.1	238.7	234.8	240.5
เฉลี่ย	239.5	241.5	240.4	229.6	215.8	239.5	239.4	233.5	238.3

ตาราง ค.21 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียหายในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	187.6	189.8	193.7	221.0	254.5	264.6	255.6	225.4	196.0	191.5	184.1
2	186.1	192.8	196.7	220.1	253.2	270.5	254.5	223.2	195.8	192.3	188.0
3	185.5	193.3	198.8	219.8	255.6	271.1	254.3	221.9	197.2	192.2	189.0
เฉลี่ย	186.4	192.0	196.4	220.3	254.4	268.7	254.8	223.5	196.3	192.0	187.0

ตาราง ค.22 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	274.3	270.3	285.8	274.1	264.6	264.0	274.4	267.9	275.4
2	270.3	269.4	268.9	273.2	270.5	273.0	272.4	274.3	273.2
3	271.5	265.4	265.1	272.5	271.1	275.0	275.3	270.1	274.2
เฉลี่ย	272.0	268.4	273.3	273.3	268.7	270.7	274.0	270.8	274.3

ตาราง ค.23 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	174.0	165.7	217.1	239.7	253.7	260.0	255.1	219.5	186.3	174.9	171.9
2	170.1	173.1	215.1	240.1	255.3	265.3	268.9	240.1	185.2	175.3	170.1
3	170.1	177.9	200.1	240.0	253.1	266.6	269.8	230.3	187.4	176.5	170.1
เฉลี่ย	171.4	172.2	210.8	239.9	254.0	264.0	264.6	230.0	186.3	175.6	170.7

ตาราง ค.24 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	260.4	265.4	247.8	273.7	260.0	260.0	251.3	255.5	260.3
2	258.8	260.4	255.2	267.9	265.3	265.3	255.2	259.9	258.9
3	258.9	261.3	251.0	269.9	266.6	266.6	251.0	260.4	265.7
เฉลี่ย	259.4	262.4	251.3	270.5	264.0	264.0	252.5	258.6	261.6

ตาราง ค.25 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	169.8	165.1	169.4	183.0	187.7	226.6	208.3	178.4	169.6	163.4	168.1
2	163.4	164.4	168.5	180.2	193.3	232.1	194.1	183.3	169.4	167.2	165.3
3	162.2	167.2	170.1	181.1	196.9	230.2	195.3	181.1	168.5	165.5	162.2
เฉลี่ย	165.1	165.6	169.3	181.4	192.6	229.6	199.2	180.9	169.2	165.4	165.2

ตาราง ค.26 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV									
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
1	245.3	241.3	240.5	242.7	226.6	227.9	235.6	236.6	239.1	
2	238.9	240.1	235.5	240.1	232.1	230.0	233.1	235.3	240.1	
3	235.7	239.3	234.5	235.2	230.2	231.0	230.0	236.7	238.9	
เฉลี่ย	240.0	240.2	236.8	239.3	229.6	229.6	232.9	236.2	239.4	

ตาราง ค.27 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	187.8	196.5	203.1	216.7	225.1	212.8	201.7	194.5	185.6	174.3	167.9
2	185.0	195.5	202.2	215.0	230.1	217.3	200.3	197.8	185.0	170.3	165.0
3	187.6	194.3	201.3	217.3	228.7	215.0	205.1	195.2	187.6	172.4	164.3
เฉลี่ย	186.8	195.4	202.2	216.3	228.0	215.0	202.4	195.8	186.1	172.3	165.7

ตาราง ค.28 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	224.2	227.8	235.7	228.4	212.8	225.7	232.4	229.3	225.8
2	226.4	228.5	230.1	225.9	217.3	220.4	229.9	220.3	222.6
3	227.3	225.4	232.0	223.4	215.0	215	228.1	221.8	226.9
เฉลี่ย	226.0	227.2	232.6	225.9	215.0	220.4	230.1	223.8	225.1

ตาราง ค.29 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	180.5	185.8	188.0	254.1	237.0	276.4	255.7	250.3	201.4	187.5	178.6
2	175.6	184.3	192.2	250.3	240.4	275.4	250.1	245.1	195.2	185.9	175.4
3	174.9	183.3	194.4	252.1	240.1	274.5	248.9	244.1	194.3	184.4	172.3
เฉลี่ย	177.0	184.5	191.5	252.2	239.2	275.4	251.6	246.5	197.0	185.9	175.4

ตาราง ค.30 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	274.3	271.8	279.8	269.8	276.4	269.5	275.1	276.4	277.5
2	275.3	270.4	277.4	269.5	275.4	273.2	274.4	278.4	275.6
3	276.2	275.3	275.3	273.2	274.5	270.9	274.0	277.4	273.9
เฉลี่ย	275.3	272.5	277.5	270.8	275.4	271.2	274.5	277.4	275.7

ตาราง ค.31 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	172.2	175.6	182.5	181.6	205.4	219.8	217.9	202.4	178.2	175.2	173.6
2	173.6	175.2	181.1	189.2	200.1	221.1	215.5	198.8	180.2	175.4	172.1
3	172.1	175.4	180.7	192.1	200.0	220.5	217.4	199.1	182.3	174.3	170.9
เฉลี่ย	172.6	175.4	181.4	187.6	201.8	220.5	216.9	200.1	180.2	175.0	172.2

ตาราง ค.32 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	230.4	238.2	240.8	237.5	219.8	233.0	243.0	225.4	229.4
2	228.4	236.4	243.0	233.0	221.1	235.6	240.1	226.4	232.6
3	229.1	235.3	240.1	235.6	220.5	236.2	241.1	227.5	231.6
เฉลี่ย	229.3	236.6	241.3	235.4	220.5	234.9	241.4	226.4	231.2

ตาราง ค.33 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	170.6	174.7	177.5	181.2	198.5	230.4	185.4	183.9	179.4	174.2	170.4
2	170.0	174.2	175.3	183.9	190.1	231.2	190.3	180.1	178.5	175.6	170.0
3	170.4	175.6	177.6	180.1	191.9	233.2	190.5	180	177.5	176.5	170.0
เฉลี่ย	170.3	174.8	176.8	181.7	193.5	231.6	188.7	181.3	178.5	175.4	170.1

ตาราง ค.34 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	230.5	232.5	232	232.5	230.4	222.4	229.1	227.4	233.2
2	229.4	230.1	230.1	230.1	231.2	228.9	228.4	226.4	229.5
3	231.2	229.4	231.2	230.1	233.2	229.1	229.1	223.5	230.1
เฉลี่ย	230.4	230.7	231.1	230.9	231.6	226.8	228.9	225.8	230.9

ตาราง ค.35 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	179.4	183	200.3	196.6	200.1	219.8	182.6	184.3	180.5	173.7	170.5
2	175.1	180.5	200.1	196.5	198.7	220.2	185.2	180.3	182.6	170.5	170.0
3	177.8	182.6	198.7	195.2	196.6	218.3	187.0	182.6	180.3	171.0	171.0
เฉลี่ย	177.4	182.0	199.7	196.1	198.5	219.4	184.9	182.4	181.1	171.7	170.5

ตาราง ค.36 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 790 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	234.3	233.1	238.2	231.5	219.8	234.3	240.5	236.7	238.9
2	234.2	235.4	240.2	230.2	220.2	230.1	234.3	239.3	231.1
3	238.3	236.3	212.0	227.1	218.3	235.5	238.2	240.1	234.2
เฉลี่ย	235.6	234.9	230.1	229.6	219.4	233.3	237.7	238.7	234.7

ตาราง ค.37 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	174.1	178.4	194.2	183.9	207.8	240.1	230.4	205.4	193.0	179.2	186.3
2	175.0	176.6	180.3	186.4	211.4	238.0	230.1	198.7	184.1	180.2	177.2
3	173.2	177.9	185.3	187.9	216.7	243.1	235.2	200.3	183.2	178.8	172.6
เฉลี่ย	174.1	177.6	186.6	186.1	212.0	240.4	231.9	201.5	186.8	179.4	178.7

ตาราง ค.38 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV									
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
1	245.9	243.5	251.3	230.9	240.1	234.6	248.9	250.3	249.3	
2	240.2	240.3	248.8	235.5	238.0	239.4	248.8	249.3	250.3	
3	248.3	246.3	249.1	237.8	243.1	236.1	249.1	251.3	255.3	
เฉลี่ย	244.8	243.4	249.7	234.7	240.4	236.7	248.9	250.3	251.6	

ตาราง ค.39 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	189.9	177.7	195.0	198.5	228.1	254.8	236.2	206.5	196.2	179.1	185.8
2	190.0	179.9	196.2	199.8	233.3	255.9	234.4	200.1	196.4	177.7	189.9
3	191.3	178.4	196.4	200.9	232.1	254.9	235.8	201.1	196.0	179.9	188.8
เฉลี่ย	190.4	178.7	195.9	199.7	231.2	255.2	235.5	202.6	196.2	178.9	188.2

ตาราง ก.40 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	270.3	270.4	273.1	256.6	254.8	257.5	282.2	280.3	279.6
2	268.9	273.2	275.1	254.5	255.9	257.6	278.9	281.4	280.3
3	266.5	271.3	272.5	256.3	254.9	255.1	279.1	278.3	275.9
เฉลี่ย	268.6	271.6	273.6	255.8	255.2	256.7	280.1	280.0	278.6

ตาราง ก.41 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	181.2	182.8	183.0	228.9	236.7	258.4	220.2	198.4	197.6	181.4	180.0
2	180.3	183.0	180.3	227.1	230.3	260.1	225.1	200.1	195.3	183.0	181.4
3	178.9	180.3	181.2	225.1	228.9	259.3	223.1	201.2	194.2	180.3	183.0
เฉลี่ย	180.1	182.0	181.5	227.0	232.0	259.3	222.8	199.9	195.7	181.6	181.5

ตาราง ก.42 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	259.3	260.3	266.9	256.3	258.4	255.1	277.8	257.3	263.2
2	257.8	258.3	260.0	257.9	260.1	258.7	270.1	254.8	260.4
3	264.1	255.3	230.9	257.5	259.3	258.9	271.3	250.9	258.9
เฉลี่ย	260.4	258	252.6	257.2	259.3	257.6	273.1	254.3	260.8

ตาราง ค.43 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	189.9	201.8	189.5	196.2	218.3	249.8	211.8	185.8	184.8	173.6	177.3
2	186.2	186.1	185.5	190.1	215.5	250.0	216.1	189.9	185.5	175.5	172.2
3	185.4	185.5	185.0	191.1	215.4	251.5	215.6	188.8	186.8	172.2	171.1
เฉลี่ย	187.2	191.1	186.7	192.5	216.4	250.4	214.5	188.2	185.7	173.8	173.5

ตาราง ค.44 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV									
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
1	260.3	255.5	254.8	249.8	249.8	262.4	276.1	265.3	259.3	
2	258.9	253.2	251.2	245.2	250.0	259.9	257.7	263.2	260.7	
3	261.2	250.1	252.2	246.5	251.5	258.1	258.1	266.8	262.7	
เฉลี่ย	260.1	252.9	252.7	247.2	250.4	260.1	264.0	265.1	260.9	

ตาราง ค.45 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	200.1	203.7	209.6	197.5	217.9	229.7	222.2	200.5	205.6	186.7	171.1
2	198.8	201.7	206.1	210.9	220.0	234.3	222.1	205.5	204.9	192.3	174.2
3	199.9	200.0	205.3	210.2	219.8	233.3	220.1	204.8	203.1	190.2	173.9
เฉลี่ย	199.6	201.8	207.0	206.2	219.2	232.4	221.5	203.6	204.5	189.7	173.1

ตาราง ก.46 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	266.4	260.2	272.9	264.6	229.7	274.4	256.0	260.3	270.4
2	267.7	263.1	269.9	265.3	234.3	270.2	260.3	261.2	265.3
3	261.1	265.3	268.5	260.6	233.3	270.1	259.4	259.1	261.9
เฉลี่ย	265.1	262.9	270.4	263.5	232.4	271.6	258.6	260.2	265.9

ตาราง ก.47 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	175.1	174.4	186.9	207.4	210.5	245.0	224.4	187.3	187.8	187.8	180.5
2	173.2	175.5	187.8	204.3	218.9	244.4	220.2	190.7	188.9	186.9	182.3
3	172.1	174.0	188.9	204.4	217.9	246.7	217.8	192.1	187.6	187.8	183.3
เฉลี่ย	173.5	174.6	187.9	205.4	215.8	245.4	220.8	190.0	188.1	187.5	182.0

ตาราง ก.48 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	251.2	250.4	246.9	250.4	245.0	236.4	248.9	246.7	245.9
2	246.3	248.9	246.4	250.4	244.4	239.0	246.4	250.4	251.2
3	249.8	251.2	248.2	247.9	246.7	240.8	248.2	248.9	246.3
เฉลี่ย	249.1	250.2	247.2	249.6	245.4	238.7	247.8	248.7	247.8

ตาราง ค.49 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	187.1	186.3	190.6	194.0	191.1	224.6	223.9	195.4	187.5	185.6	178.2
2	187.5	185.6	187.5	196.7	195.1	227.5	220.1	194.0	189.7	183.4	180.1
3	189.7	183.4	189.7	195.4	198.3	226.4	222.1	194.3	190.2	180.3	177.3
เฉลี่ย	188.1	185.1	189.3	195.4	194.8	226.2	222.0	194.6	189.1	183.1	178.5

ตาราง ค.50 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV									
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
1	225.8	223.1	223.9	206.1	224.6	242.2	223.9	221.3	229.4	
2	228.5	221.3	222.9	215.6	227.5	235.4	227.4	224.6	229.1	
3	223.6	220.5	224.6	214.9	226.4	232.1	222.9	229.1	230.3	
เฉลี่ย	226.0	221.6	223.8	212.2	226.2	236.6	224.7	225.0	229.6	

ตาราง ค.51 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	177.0	183.0	188.8	192.1	202.4	207.6	200.3	195.3	193.6	191.7	183.9
2	180.2	182.1	190.1	195.3	201.0	210.1	204.5	194.1	192.1	195.3	180.4
3	183.9	184.4	190.5	194.1	205.1	206.3	206.1	197.7	195.3	194.1	182.4
เฉลี่ย	180.4	183.2	189.8	193.8	202.8	208.0	203.6	195.7	193.7	193.7	182.2

ตาราง ก.52 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	225.8	230.3	231.3	214.4	207.6	221.7	236.4	237.4	224.3
2	221.7	236.4	240.2	210.1	210.1	220.4	240.2	240.2	229.8
3	220.4	240.2	243.3	212.2	206.3	219.9	241.3	243.3	231.3
เฉลี่ย	222.6	235.6	238.3	212.2	208.0	220.7	239.3	240.3	228.5

ตาราง ก.53 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	171.4	178.5	175.2	191.7	191.8	194.2	192.2	187.4	181.7	171.2	158.1
2	171.2	178.9	171.2	189.4	190.1	190.3	190.4	190.4	184.4	174.5	160.8
3	170.3	170.1	174.5	190.4	189.4	195.4	191.5	191.8	186.3	178.9	163.8
เฉลี่ย	171.0	175.8	173.6	190.5	190.4	193.3	191.4	189.9	184.1	174.9	160.9

ตาราง ก.54 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 870 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	195.3	198.3	196.0	195.6	194.2	211.2	205.0	203.2	210.1
2	200.9	194.2	197.7	200.9	190.3	210.1	203.2	205.0	203.2
3	204.1	195.3	199.9	204.1	195.4	209.9	204.1	204.1	195.3
เฉลี่ย	200.1	195.9	197.9	200.2	193.3	210.4	204.1	204.1	202.9

ตาราง ค.55 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	169.4	172.2	172.9	176.5	249.6	265.9	243.8	203.9	196.8	188.4	187.6
2	170.0	171.2	170.3	180.1	250.1	260.2	245.7	198.8	195.2	189.4	190.1
3	170.5	170.4	171.4	177.8	250.3	264.3	248.9	199.1	194.8	191.9	188.8
เฉลี่ย	170.0	171.3	171.5	178.1	250.0	263.5	246.1	200.6	195.6	189.9	188.8

ตาราง ค.56 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV									
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
1	260.4	265.7	262.1	252.1	265.9	256.6	269.5	258.3	256.3	
2	263.4	261.7	261.1	255.6	260.2	260.9	268.6	263.1	255.9	
3	266.8	260.4	260.2	254.9	264.3	259.1	265.9	266.2	261.3	
เฉลี่ย	263.5	262.6	261.1	254.2	263.5	258.9	268.0	262.5	257.8	

ตาราง ค.57 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	188.6	186.7	186.1	196.4	225.9	252.4	237.5	205.9	186.3	176.5	174.7
2	186.1	185.5	186.3	199.7	223.4	250.0	238.9	204.4	189.9	180.4	175.8
3	185.8	187.7	189.9	205.4	226.4	253.0	239.4	205.6	190.1	181.8	173.2
เฉลี่ย	186.8	186.6	187.4	200.5	225.2	251.8	238.6	205.3	188.8	179.6	174.6

ตาราง ก.58 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	262.1	260.3	273.1	277.1	252.4	235.6	274.4	265.4	268.9
2	258.1	255.7	273.1	275.6	250.0	239.9	273.1	261.6	265.4
3	257.7	254.8	270.4	278.5	253.0	237.1	273.1	260.3	260.3
เฉลี่ย	259.3	256.9	272.2	277.1	251.8	237.5	273.5	262.4	264.9

ตาราง ก.59 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	189.5	189.0	199.9	220.0	261.5	270.8	248.7	198.3	185.9	185.0	184.5
2	185.3	185.0	198.3	210.0	263.2	273.2	250.9	200.1	186.3	183.2	180.1
3	185.1	186.4	200.1	208.4	260.8	277.4	251.8	203.1	184.2	186.4	183.2
เฉลี่ย	186.6	186.8	199.4	212.8	261.8	273.8	250.5	200.5	185.5	184.9	182.6

ตาราง ก.60 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 20 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	268.3	267.7	269.5	281.5	270.8	252.7	249.2	265.3	263.4
2	273.1	269.5	270.5	275.8	273.2	256.8	250.1	268.5	266.7
3	258.4	270.5	273.1	280.2	277.4	258.4	252.8	264.3	270.1
เฉลี่ย	266.6	269.2	271.0	279.2	273.8	256.0	250.7	266.0	266.7

ตาราง ค.61 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	185.4	184.1	198.3	193.0	210.3	221.4	211.1	192.6	185.8	183.2	190.9
2	183.2	183.2	196.3	197.7	207.8	220.1	210.8	189.9	185.8	180.2	185.5
3	184.1	187.9	195.7	198.5	205.8	210.3	217.8	190.8	183.2	181.3	183.3
เฉลี่ย	184.2	185.1	196.8	196.4	208.0	217.3	213.2	191.1	184.9	181.6	186.6

ตาราง ค.62 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV									
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
1	267.8	270.1	271.4	236.2	221.4	222.7	258.7	260.3	261.7	
2	265.8	271.4	270.3	240.1	220.1	221.4	250.4	266.9	265.9	
3	272.8	270.3	268.9	239.4	210.3	220.1	255.8	270.1	269.1	
เฉลี่ย	268.8	270.6	270.2	238.6	217.3	221.4	255.0	265.8	265.6	

ตาราง ค.63 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	187.8	190.1	192.8	195.3	198.7	198.7	195.3	192.8	191.7	190.2	188.8
2	188.7	190.2	192.8	194.5	200.1	200.8	196.3	195.3	190.2	192.8	190.5
3	189.7	192.8	195.3	196.9	205.8	206.8	193.2	194.5	192.8	192.8	189.9
เฉลี่ย	188.7	191.0	193.6	195.6	201.5	202.1	194.9	194.2	191.6	191.9	189.7

ตาราง ก.64 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	230.2	229.3	228.6	225.4	198.7	220.5	228.9	227.4	231.1
2	228.6	225.4	225.4	218.1	200.8	225.4	225.5	228.9	230.2
3	229.3	228.9	228.9	216.9	206.8	228.9	227.9	230.1	228.6
เฉลี่ย	229.4	227.9	227.6	220.1	202.1	224.9	227.4	228.8	230.0

ตาราง ก.65 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	185.0	179.8	183.9	201.6	214.4	240.0	204.8	193.2	176.6	184.7	178.0
2	180.2	176.6	184.7	198.5	210.4	243.8	201.4	196.7	180.4	180.3	176.6
3	181.0	180.4	180.3	199.3	210.5	241.5	200.0	197.5	182.3	182.1	180.4
เฉลี่ย	182.1	178.9	183.0	199.8	211.8	241.8	202.1	195.8	179.8	182.4	178.3

ตาราง ก.66 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 30 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ครั้งที่ ระยะ(mm.)	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	253.2	250.1	241.3	252.1	240.0	246.6	259.4	255.5	252.8
2	252.1	250.3	240.0	250.3	243.8	250.3	256.7	253.3	259.4
3	250.3	247.1	243.2	247.1	241.5	247.1	255.9	252.8	256.7
เฉลี่ย	251.9	249.2	241.5	249.8	241.8	248.0	257.3	253.9	256.3

ตาราง ค.67 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	189.8	190.5	189.0	190.4	199.1	235.6	213.4	197.4	188.6	186.5	159.8
2	186.5	189.0	190.4	191.2	205.6	237.3	212.6	196.3	190.4	187.2	163.4
3	187.2	190.4	191.2	190.3	204.6	234.4	215.4	195.6	191.2	184.9	160.4
เฉลี่ย	187.8	190.0	190.2	190.6	203.1	235.8	213.8	196.4	190.1	186.2	161.2

ตาราง ค.68 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 2 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV									
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
1	240.2	237.4	234.1	232.8	235.6	229.1	238.3	240.2	240.1	
2	235.4	241.1	235.4	231.8	237.3	230.1	236.1	238.3	241.1	
3	236.7	238.8	236.7	230.1	234.4	232.4	237.7	236.1	238.8	
เฉลี่ย	237.4	239.1	235.4	231.6	235.8	230.5	237.4	238.2	240	

ตาราง ค.69 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ(mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	171.7	187.6	192.8	199.6	202.4	217.6	207.6	198.6	197.7	185.2	180.3
2	174.7	185.4	190.3	198.6	202.4	220.1	205.4	198.5	195.2	187.6	179.9
3	177.9	188.9	194.5	198.5	206.5	218.8	203.5	195.8	196.7	185.4	180.0
เฉลี่ย	174.8	187.3	192.5	198.9	203.8	218.8	205.5	197.6	196.5	186.1	180.1

ตาราง ก.70 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 3 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ (mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	228.3	230.3	229.1	225.6	217.6	225.1	227.9	231.2	225.5
2	225.6	229.1	226.0	225.0	220.1	219.8	225.4	227.9	228.9
3	225.0	226.0	225.3	224.0	218.8	218.3	226.0	225.4	230.8
เฉลี่ย	226.3	228.5	226.8	224.9	218.8	221.1	226.4	228.2	228.4

ตาราง ก.71 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวนอน
(Horizontal) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ (mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	185.6	185.0	181.7	184.8	181.0	219.3	212.3	181.9	186.5	187.4	195.4
2	184.3	184.1	182.3	184.0	186.4	220.1	215.8	186.7	185.5	185.0	190.1
3	182.8	183.4	183.9	184.2	187.9	217.1	216.9	186.2	184.3	184.1	189.1
เฉลี่ย	184.2	184.2	182.6	184.3	185.1	218.8	215	184.9	185.4	185.5	191.5

ตาราง ก.72 ค่าความแข็งของการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยความเสียดทานในแนวตั้ง
(Vertical) ที่ความดัน 40 บาร์ เวลา 4 วินาทีและสภาวะอุณหภูมิที่ 950 °C

ระยะ (mm.) ครั้งที่	ค่าความแข็ง HV								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
1	230.1	240.1	256.0	241.9	219.3	218.1	227.9	227.9	232.3
2	228.9	235.9	240.1	235.8	220.1	219.3	230.1	230.1	231.3
3	225.2	230.1	235.9	239.8	217.1	217.7	229.9	229.3	228
เฉลี่ย	228.1	235.4	244.0	239.2	218.8	218.4	229.3	229.1	230.5

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายจักรินทร์ คงสิบ
สาขาวิชา/ภาควิชา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
วัน-เดือน-ปี	วันที่ 21 ธันวาคม 2517
สถานที่เกิด	จังหวัดนครสวรรค์
ที่อยู่	82/14 ถนนพหลโยธิน ตำบลบ้านกล้วย อำเภอเมือง จังหวัดชัยนาท 17000
ประวัติการศึกษา	คอบ.วิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2540

