อิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกล ของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF AISI 1045 STEEL FRICTION WELDING JOINT

วิษณุ แฟงเมือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกล ของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

วิษณุ แฟงเมือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 Influence of Heat Treatment on Mechanical Properties of AISI 1045 Steel Friction Welding Joint
ชื่อ - นามสกุล	นายวิษณุ แฟงเมือง
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทร์มณี, Ph.D.)

.... กรรมการ
(อาจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 20 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045
ชื่อ – นามสกุล	นายวิษณุ แฟงเมือง
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

การเชื่อมเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมที่สามารถเชื่อมรอยต่อวัสดุชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันให้ผสานติดกันได้ทั้งพื้นที่หน้าตัด โดยไม่ต้องใช้วัสดุช่วยผสานในการเชื่อมเลย ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น มีความแข็งแรงและความแข็งบริเวณรอยเชื่อมสูงเพราะชิ้นงานมีการเชื่อมผสานติดกันทั้งพื้นที่หน้าตัด รอยเชื่อมเสียดทานมีความแข็งสูงยากต่อการนำวัสดุหลังการเชื่อมไปผ่านกระบวนการตัดเฉือนอื่นๆ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

การเชื่อมเสียดทานมีตัวแปรในการศึกษาดังนี้ได้แก่ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่ 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียส เวลาในการอัดที่ 2, 3 และ 4 วินาที และแรงดันในการอัดที่ 2, 3 และ 4 MPa ผลการทดลองที่ได้นำมาทดสอบสมบัติทางกลได้แก่ การทดสอบความต้านทานแรงดึง และความแข็ง นอกจากนี้นำชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

ผลการทดลองพบว่า เมื่อแรงดันในการอัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของรอยเชื่อมเล็กลง อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่สูงขึ้นเหนือเส้น A3 มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงและความแข็งของชิ้นงานทดลองลดลง ค่าความแข็งแรงมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงก่อนทำการทดลองอยู่ 10.17 เปอร์เซ็นต์ และค่าความแข็งมีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งก่อนทำการทดลองอยู่ 18.20 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดสอบความต้านแรงดึงพบว่ารอยเชื่อมยังคงมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานเดิม ตำแหน่งที่ขาดออกจากกันอยู่บริเวณนอกรอยเชื่อมโครงสร้างจุลภาคหลังจากอบให้ความร้อนเป็นโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลต์และเฟสเฟอร์ไรต์

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทาน อบให้ความร้อน เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เพิร์ลไลต์ เฟอร์ไรต์

Thesis Title	Influences of Heat Treatment on Mechanical Properties of AISI 1045 Steel Friction Welding Joint
Name - Surname	Mr. Wisanu Fangmuang
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
Academic Year	2013

ABSTRACT

Friction welding is a welding process that could weld completely cross-sectional area of similar or dissimilar materials joint. This process is accomplished without using filler metals and taking short of welding time. As the work pieces are fully welded in the cross-sectional area. strength and hardness of joint area increased under friction method. Friction weld metal weld zone showed high stiffness as well as it was difficult to use for others cutting processes. The purpose of this study was to study an influence of heat treatment temperature on mechanical properties and microstructure of AISI 1045 steel weld zone.

The variable factors of friction welding study were using heat treatment temperature of 790, 870 and 950 degree Celsius, compressing time at 2, 3 and 4 seconds, and compression pressure of 2, 3 and 4 MPa. Experiments were tested for obtaining of tensile properties and hardness of the welding specimens. In addition, the work pieces were characterized of microstructure at weld zone.

The results showed variable factor, size of weld zone decreased, when compression pressure was increased. As heat treatment temperature was increased above A3 line after welding, resulting of hardness and strength of work pieces decreased. Hardness value at weld zone was lower than hardness standard value around 10.17 percent and strength value was lower than standard value around 18.20 percent. According the tensile results demonstrated that weld zone had more strength than the original work pieces. Tear position was out of weld zone part. The microstructure after heat treatment was structure consisting of pearlite phase and ferrite phase.

Keywords: friction welding, heat treatment, medium carbon steel, pearlite, ferrite

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความเมตตากรุณาเป็นอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย จัทร์มณี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากร เจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ขอขอบคุณบุคลากร เจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ศูนย์สุพรรณบุรี และศูนย์หันตรา ขอขอบคุณบุคลากร เจ้าหน้าที่ของวิทยาลัยเทคนิคชัยนาท แผนกช่างกลโรงงานและแผนกช่างเชื่อมโลหะ ขอขอบคุณบุคลากร เจ้าหน้าที่ของสถาบันไทย – เยอรมัน แผนกทดสอบและประกันคุณภาพ ศูนย์ชลบุรี และศูนย์หันตรา และขอขอบคุณบุคลากร เจ้าหน้าที่ของบริษัท วิคตอรี่ พรีซิชั่น จำกัด ที่ให้การสนับสนุน เครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องจักร ตลอดจนให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคโนโลยี ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิ คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา อบรมบ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดา มารดา และบูรพาจารย์ รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่าน

วิษณุ แฟงเมือง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย........ (3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........ (4)
กิตติกรรมประกาศ........ (5)
สารบัญ........ (6)
สารบัญตาราง........ (8)
สารบัญรูป........ (9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ........ (13)
บทที่ 1 บทนำ........ 14
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย........ 14
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย........ 15
1.3 ขอบเขตของการวิจัย........ 15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย........ 16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 17
2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง........ 17
2.2 กระบวนการเชื่อม........ 23
2.3 การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน........ 29
2.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา........ 35
2.5 การทดสอบแรงดึง........ 40
2.6 การทดสอบความแข็ง........ 51
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 54
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย........ 58
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง........ 58
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย........ 60
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผล........ 70
4.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดึง........ 73
4.2 ผลการทดสอบความแข็ง........ 78

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหาภาค โครงสร้างจุลภาค และขนาดเกรนบริเวณ
รอยเชื่อม.. 84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.. 93
5.1 สรุปผลงานวิจัย.. 93
5.2 ข้อเสนอแนะในการทดลอง.. 94
รายการอ้างอิง.. 96
ภาคผนวก... 98
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบก่อนการทดลอง (Pre - Test)…...................................... 99
ภาคผนวก ข ตารางข้อมูลผลการทดสอบสมบัติทางกล.. 109
ภาคผนวก ค ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 104.. 128
ภาคผนวก ง มาตรฐาน ASTM……………….. 130
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่... 134
ประวัติผู้เขียน.. 150

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045………………………………...... 18

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045 (อบอ่อน) ………………………..… 19

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 1045………………………………….…. 19

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลของเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อน (Annealing)
และการอบปกติ (Normalizing)………………………………………………….. 34

ตารางที่ 2.5 รูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบชนิดเพลากลมตามมาตรฐาน ASTM E8 – 04…… 41

ตารางที่ 2.6 ค่าความเร็วความเค้นในการทดลองแรงดึง สำหรับเหล็กกล้าและโลหะ
ที่ไม่ใช่เหล็ก.. 45

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง มาตรฐาน AISI 1045… 60

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำนำมาผลิตเป็นถังบรรจุของเหลวและเหล็กเส้นก่อสร้าง............ 21
รูปที่ 2.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางนำมาผลิตเป็นเพลาส่งกำลังและเฟืองในเครื่องจักร........ 22
รูปที่ 2.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูงนำมาผลิตเป็นเครื่องมือตัดในงานขึ้นรูป................................. 22
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ควบคุมเครื่องเชื่อมเสียดทาน.. 24
รูปที่ 2.5 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทาน.. 25
รูปที่ 2.6 ชนิดของรอยต่อชนที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทาน………………………………… 27
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการอบอ่อนในเหล็กกล้าคาร์บอน 0.2 %.. 31
รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค.. 32
รูปที่ 2.9 สัดส่วนของโครงสร้างที่ปรากฏในเหล็กกล้าที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อนที่ปริมาณคาร์บอนต่างๆ.. 33
รูปที่ 2.10 ช่วงอุณหภูมิสำหรับการอบชุบความร้อน (Hardening Range) การอบอ่อน (Annealing) และการอบปกติ (Normalizing) ของเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon Steels)... 34
รูปที่ 2.11 ทิศทางการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย.. 36
รูปที่ 2.12 กล้อง Microscope.. 39
รูปที่ 2.13 การหาขนาดความโตของเกรนตามมาตรฐาน ASTM E112/E1382 – 97.................. 40
รูปที่ 2.14 ชิ้นทดสอบแรงดึงชนิดเพลากลมตามมาตรฐาน ASTM E8 - 04................................ 44
รูปที่ 2.15 ลักษณะปลายยึดชิ้นทดสอบโดยการดึง... 42
รูปที่ 2.16 ลักษณะลิ่มยึดที่ใช้ยึดชิ้นทดสอบโดยการดึง.. 43
รูปที่ 2.17 แผนภาพแรงดึง – ระยะยืด... 43
รูปที่ 2.18 แผนภาพความเค้นดึงและอัตรายืดของเหล็กกล้าไม่เจือจาง...................................... 46
รูปที่ 2.19 เครื่องทดสอบแรงดึง.. 46
รูปที่ 2.20 แผนภาพความเค้น – ความเครียด (σ – ε Strain Diagram)....................................... 47
รูปที่ 2.21 การวัดขนาดความยาวชิ้นทดสอบหลังถูกดึงขาด Lu.. 48

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.22 เส้นโค้งค่าความยืดและเปรียบเทียบค่าความยืด A5 (L0 = 5 d0) และ A10 (L0 = 10 d0)………........ 49
รูปที่ 2.23 ลักษณะรอยขาดของชิ้นทดสอบแรงดึง........ 50
รูปที่ 2.24 แรงภายในชิ้นทดสอบที่รับแรงดึง........ 50
รูปที่ 2.25 หัวกดรูปทรงพีระมิดและรอยกด........ 53
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการดำเนินงานวิจัยโดยรวม........ 59
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร........ 60
รูปที่ 3.3 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานและวิธีการเชื่อมเสียดทาน........ 61
รูปที่ 3.4 เครื่องเชื่อมเสียดทานที่ใช้ในการทดลอง........ 62
รูปที่ 3.5 วงจรการทำงานของระบบไฮดรอลิค........ 62
รูปที่ 3.6 การจับยึดชิ้นงานบนเครื่องเชื่อมเสียดทานและชิ้นงานเมื่อเชื่อมเสร็จ........ 63
รูปที่ 3.7 ลักษณะชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานตามตัวแปรที่กำหนด……………........ 64
รูปที่ 3.8 การตรวจสอบทางกายภาพรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045………........ 64
รูปที่ 3.9 เตาอบชุบชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทาน........ 65
รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมความสัมพันธ์เวลาและอุณหภูมิในการอบให้ความร้อน........ 65
รูปที่ 3.11 การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 - 04........ 66
รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 – 04 ผ่านการกลึงขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึง CNC........ 66
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงที่ใช้ในการทดลอง........ 67
รูปที่ 3.14 เครื่องตัดชิ้นงานตัวอย่าง........ 68
รูปที่ 3.15 เครื่องหล่อตัวเรือนชิ้นงาน........ 68
รูปที่ 3.16 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน........ 68
รูปที่ 3.17 ชิ้นงานที่ได้หลังจากการหล่อและขัดผิว........ 68
รูปที่ 3.18 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งตามแนวนอน (Horizontal)........ 69
รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบความแข็ง Vickers Microhardness Tests........ 69

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 บริเวณกระทบร้อนชิ้นงานเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 และโครงสร้างมหาภาคของรอยต่อชน 71

รูปที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยขนาดความกว้างรอยเชื่อมและค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อม..... 72

รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045........ 74

รูปที่ 4.4 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง........ 76

รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045........ 77

รูปที่ 4.6 ตำแหน่งกดทดสอบความแข็ง........ 78

รูปที่ 4.7 ผลทดสอบความแข็งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa........ 79

รูปที่ 4.8 ผลทดสอบความแข็งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa........ 80

รูปที่ 4.9 ผลทดสอบความแข็งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa........ 81

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นทดสอบความแข็งกับค่าความแข็งชิ้นงานก่อนการทดลองโดยไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนของเหล็กกล้า AISI 1045........ 82

รูปที่ 4.11 ตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045........ 84

รูปที่ 4.12 โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อม ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัดแตกต่างกัน........ 85

รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ตัวแปรเวลาในการอัดแตกต่างกัน........ 86

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุเมื่อได้รับแรงดันในการอัด...... 88

รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส.. 89

รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส.. 90

รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส.. 90

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AISI	มาตรฐานเหล็กอเมริกัน AISI (The American Iron and Steel Institute)
ASTM	สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี (American Society for Testing and Materials)
BM	บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal)
CNC	เครื่องจักรควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control)
°C	หน่วยวัดอุณหภูมิองศาเซลเซียส
°F	หน่วยวัดอุณหภูมิองศาฟาเรนไฮต์
GPa	หน่วยวัดแรงดันหรือแรงกดจิกะปาสกาล
HAZ	ขอบเขตบริเวณพื้นที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน (Heat Affect Zone)
HV	หน่วยวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)
Kgf	หน่วยวัดแรงกด (กิโลกรัมแรง)
MPa	หน่วยวัดแรงดันหรือแรงกดเมกะปาสกาล
mm	หน่วยวัดมิลลิเมตร (มม.)
N/mm^2	หน่วยวัดแรงดันหรือแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
rpm	ความเร็วรอบ (Rotations Speed) รอบต่อนาที
St.	มาตรฐานเหล็กเยอรมัน DIN (Deutsch Institute Norms)
s, sec	หน่วยวัดเวลา (วินาที)
Wt%	น้ำหนักเปอร์เซ็นต์

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีงานเชื่อมโลหะถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ของประเทศ ซึ่งเทคนิคการเชื่อมโลหะมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับแหล่งความร้อนและขั้นตอนในการเชื่อม วิธีการเชื่อมแต่ละชนิดก็ยังมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ในวงการอุตสาหกรรมการเชื่อมโลหะจะต้องคำนึงถึงผลผลิตด้านโครงสร้างและความแข็งแรงของรอยเชื่อม อีกทั้งความรวดเร็วและต้นทุนในการเชื่อม จึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการเลือกใช้เทคนิคการเชื่อม (Welding Process) ที่เหมาะสม

การเชื่อมโลหะด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding) เป็นการเชื่อมอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันให้ผสานติดกันได้ โดยไม่ต้องใช้วัสดุช่วยผสานในการเชื่อม ใช้เวลาในการเชื่อมสั้น มีความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมสูงเพราะชิ้นงานมีการเชื่อมผสานติดกันทั้งพื้นที่หน้าตัด [1] จึงเป็นที่ยอมรับกันในวงการอุตสาหกรรมต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยนั้นวิธีการเชื่อมเสียดทานกำลังเป็นที่สนใจในภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีผู้สนใจศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมเสียดทานมากขึ้นเช่นกัน อาทิเช่น การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมเหล็กเพลาขาว AISI 1015 หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร [1] การศึกษาสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า AISI 1040 หลังการเชื่อมเสียดทาน [2] การศึกษาการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงภาพจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมเสียดทาน วัสดุที่เป็นพื้นที่หน้าตัดกลมและวัสดุที่ไม่เป็นพื้นที่หน้าตัดกลม [3] การศึกษาแรงดันในการเสียดทาน แรงดันในการอัด และความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงาน [4] ตลอดจนการศึกษาการนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำการเชื่อมเสียดทาน โลหะที่มีคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 และโลหะผสม AISI 4140 เชื่อมต่อกันโดยวิธีการเชื่อมเสียดทาน [5] ซึ่งงานศึกษาวิจัยเหล่านี้สามารถนำมาเป็นแนวทางในการทดลองเชื่อมเสียดทานให้มีความหลากหลายได้ในทางภาคอุตสาหกรรมทั้งทางด้านเงื่อนไขในการเชื่อม และวัสดุที่ใช้เชื่อมต่อกัน

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ซึ่งยังไม่มีการวิจัยใดได้กล่าวถึงการวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานมาก่อน และศึกษาในส่วนของอิทธิพลเวลาในการอัด แรงดันในอัด โดยการทดลองนี้จะทำการทดสอบความต้านทาน

แรงดึง (Tensile Test) ทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ที่จุดกึ่งกลางชิ้นงานตามแนวนอนของรอยเชื่อม เพื่อหาค่าความแข็งแรง และความแข็งของรอยเชื่อม ทำการตรวจสอบโครงสร้างมหาภาค (Macrostructure) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และตรวจสอบขนาดเกรน (Grain Side) บริเวณรอยเชื่อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาตัวแปรการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของบริเวณรอยเชื่อม

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อความแข็งแรงและความแข็งของรอยเชื่อม

1.2.3 ศึกษาโครงสร้างมหาภาค และโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมด้วยเสียดทาน ที่มีผลต่อความแข็งแรงและความแข็ง ของรอยเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 และศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างมหาภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ขอบเขตของงานวิจัยมีดังนี้

1.3.1 วัสดุที่ใช้ทำการทดลองเหล็กกล้า AISI 1045 หรือเหล็กหัวแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรและมีขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร

1.3.2 อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียส

1.3.3 เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4 วินาที

1.3.4 เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที

1.3.5 แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa

1.3.6 แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa

1.3.7 ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที

1.3.8 ทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานตามาตรฐาน ASTM E8 – 04 [6]

1.3.9 ทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E92 -82 [7]

1.3.10 ตรวจสอบโครงสร้างมหาภาค และโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม

1.3.11 ตรวจสอบขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8]

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 เข้าใจสภาวะของอุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมที่มีผลต่อรอยเชื่อมเสียดทาน

1.4.2 ทำให้ทราบถึงตัวแปรการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างมหาภาค โครงสร้างจุลภาค ของรอยเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

1.4.3 เป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยต่อไป และประโยชน์ต่อการนำงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเชื่อมเสียดทานสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะและอโลหะ วัสดุทั้งสองเป็นแบบชนิดเดียวกันและแบบต่างชนิดกันก็ได้ โดยสามารถเชื่อมได้เต็มทั้งผิวหน้า แตกต่างจากวิธีอื่นโดยทั่วไปที่สามารถเชื่อมได้เฉพาะพื้นผิวรอบนอกเท่านั้น จากข้อดีที่เห็นได้ชัด คือ อุณหภูมิความร้อนที่สูงขึ้นในการเชื่อมและเวลาที่สั้นจึงทำให้การเชื่อมเสียดทานโลหะและอโลหะต่างๆ สามารถทำการเชื่อมได้สะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น การเชื่อมเสียดทานเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนมาก (Mass Product) ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. กระบวนการเชื่อม
3. การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน
4. การตรวจสอบวัสดุทางโลหะวิทยา
5. การทดสอบแรงดึง
6. การทดสอบความแข็ง
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุประเภทโลหะ (Metals) คือวัสดุที่ได้จากการถลุงสินแร่ต่างๆ อันได้แก่ เหล็ก ทองแดง อลูมิเนียม นิเกิล ดีบุก สังกะสี ทองคา ตะกั่ว เป็นต้น โลหะเมื่อถลุงได้จากสินแร่ในตอนแรกนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะเนื้อค่อนข้างบริสุทธิ์ โลหะเหล่านี้มักจะมีเนื้ออ่อนไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมโดยตรง ส่วนมากจะนำไปปรับปรุงคุณสมบัติก่อนการใช้งาน

2.1.1 สมบัติของวัสดุประเภทโลหะที่ต้องการในงานอุตสาหกรรม [9]

1. เป็นตัวนำความร้อนได้ดี
2. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
3. มีความคงทนถาวรตามสภาพ
4. ไม่เสื่อมสลายหรือเปลี่ยนแปลงสถานะภาพได้ง่าย
5. เป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ ยกเว้นโลหะปรอท

6. มีความแข็งและความเหนียวสูง ยกเว้นโลหะปรอท
7. ผิวมันวาว
8. มีการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045 [9]

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 สมบัติทางกลของเหล็กกล้า AISI 1045 (อบอ่อน) [9]

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 [9]

Carbon, C	0.42 - 0.50 %
Iron, Fe	98.51 - 98.98 %
Manganese, Mn	0.60 - 0.90 %
Phosphorous, P	<= 0.040 %
Sulfur, S	<= 0.050 %

2.1.2 ประเภทวัสดุโลหะ วัสดุโลหะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. วัสดุโลหะประเภทเหล็ก (Ferrous Metals) หมายถึง โลหะที่มีพื้นฐานเป็นเหล็กประกอบอยู่ ได้แก่ เหล็กเหนียว เหล็กหล่อ เหล็กกล้า ฯลฯ เป็นวัสดุโลหะที่ใช้กันมากที่สุดในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง สามารถปรับปรุงคุณภาพและเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้หลายวิธี เช่น การหล่อ การกลึง การอัดรีดขึ้นรูป เป็นต้น [9]

2. วัสดุโลหะประเภทที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferrous Metals) หมายถึง โลหะที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเหล็กเลยในขณะที่เป็นโลหะบริสุทธิ์ ได้แก่ ดีบุก อลูมิเนียม สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง ทองคำ ทองคำขาว เงิน แมกนีเซียม พลวง เป็นต้น วัสดุโลหะประเภทที่ไม่ใช่เหล็กนี้ บางชนิดราคาสูงกว่าเหล็กมาก จึงต้องกำหนดใช้กับงานทางอุตสาหกรรมบางประเภทที่เหมาะสมเท่านั้น เช่น ทองแดงใช้กับงานไฟฟ้า ดีบุกใช้กับงานที่ต้องการทนต่อการกัดกร่อนเป็นสนิมอลูมิเนียมใช้กับงานที่ต้องการน้ำหนักเบา เป็นต้น [9]

2.1.3 ความสำคัญของเหล็ก [9]

แร่โลหะเป็นสิ่งที่เกิดในธรรมชาตินับล้านปี แต่มนุษย์ที่เพิ่งรู้จักแยกโลหะจากแร่เพื่อนำมาใช้ประโยชน์เมื่อไม่นานมานี้เอง เพราะจากการสำรวจของนักโบราณคดี ได้พบสิ่งของเครื่องใช้ภายในพีระมิดทำด้วยทองคำ เงิน ทองแดง และบรอนซ์ มนุษย์ในสมัยนั้นยังไม่รู้จักเหล็ก เพราะเตาถลุงแร่สมัยนั้นใช้สำหรับหลอมทองแดง และทองคำ ซึ่งไม่ร้อนพอที่จะใช้หลอมเหล็กให้ละลายได้ มนุษย์ค้นพบวิธีการหลอมละลายเหล็กได้ราว 2,000 ปีก่อนคริสตกาล ปัจจุบันมนุษย์ได้นำเอาเหล็กมาใช้ประโยชน์ในกิจการต่างๆ อย่างมากมายและรู้จักวิธีการผลิตเหล็กชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานเหล็กที่ผลิตได้นั้นถลุงจากสินแร่เหล็กทั้งสิ้นและนำไปผ่านกระบวนการผลิต (Manufacturing Process) จนนำไปผลิตเป็นเครื่องมือ อุปกรณ์และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่นๆ ที่เกิดประโยชน์ต่อไป

เหล็กเป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่สำคัญที่สุดเพราะถือว่าเป็นวัสดุพื้นฐานของอุตสาหกรรมทั้งหลายเพราะเรานำเหล็กมาใช้งานทั้งทางตรง เช่น ยานพาหนะ หรือเครื่องใช้ต่างๆ ที่สร้างขึ้นจากเหล็กและนำมาใช้งานทางอ้อม เช่น อาหาร สิ่งทอ หรือสิ่งพิมพ์ ซึ่งผลิตจากเครื่องจักรที่สร้างขึ้นจากเหล็ก แร่เหล็กที่พบในธรรมชาติเกิดเป็นสารประกอบของเหล็กกับธาตุอื่นๆ ผสมปนกันอยู่ในดินและหินแร่เหล็กที่ได้จากการทำเหมืองแร่นั้น จะต้องนำมาผ่านกระบวนการในการถลุงเพื่อทำให้บริสุทธิ์ขึ้นเพื่อนำไปใช้งานต่อไป [9]

เหล็กกล้า (Steel) เป็นโลหะที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งในปัจจุบัน เหล็กกล้ามีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.1-1.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ทำให้เหล็กกล้ามีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เหล็กกล้าถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างมาก นอกจากปริมาณของธาตุคาร์บอนแล้ว ยังมีการผสมธาตุต่างๆ ในเนื้อเหล็กกล้าอีกด้วย เช่น โครเมียม นิกเกิล ทังสเตน วาเนเดียม โมลิบดีนัม เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าให้ดียิ่งขึ้น เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเฉพาะอย่าง เช่น ทนต่ออุณหภูมิได้สูง ทนต่อการเสียดสี ทนต่อการกัดกร่อน มีความแข็งแกร่งสูงขึ้น เหล็กกล้าแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1. เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนเป็นหลัก อาจจะมีธาตุอื่นผสมอยู่ได้บ้างเล็กน้อย เช่น ซิลิคอน แมงกานีส กำมะถัน ฟอสฟอรัส เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกได้หลายชนิดตามปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก จะทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน และนำไปใช้งานในลักษณะต่างกันเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จัดได้ว่าเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้อยที่สุด คือ มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.10 – 0.30% โดยน้ำหนัก กำหนดตามมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1010 - 1030 กำหนดมาตรฐานเยอรมัน คือ St.37 เนื่องจากมีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่น้อย ทำให้มีความแข็งแรงต่ำไม่สามารถนำไปทำการชุบแข็งได้ เหมาะสำหรับนำไปใช้งานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก เช่นนำไปรีดเป็นแผ่น ทำถังบรรจุของเหลว นำไปทำเป็นเหล็กเส้นใช้ในงานก่อสร้าง [9] ดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำนำมาผลิตเป็นถังบรรจุของเหลวและเหล็กเส้นก่อสร้าง [10]

2. เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ คือมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.31-0.55%โดยน้ำหนัก กำหนดตามมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1031-1055 กำหนดตามมาตรฐานเยอรมัน คือ St.50 สามารถนำไปปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน โดยการนำไปชุบแข็ง (Hardening) คือนำชิ้นงานไปเผาให้ร้อนเพื่อให้เหล็กเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งการจะใช้อุณหภูมิสูงขนาดไหนขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ จากนั้นทำให้เย็นตัวลงโดยเร็ว เหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาแทนไซต์ (Martensite) ซึ่งเหล็กจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เหล็กกล้าชนิดนี้นำไปใช้ผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรง เช่น เพลาส่งกำลัง เฟืองในเครื่องจักรต่างๆ [9] ดังรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางนำมาผลิตเป็นเพลาส่งกำลังและเฟืองในเครื่องจักร [11]

3. เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) เป็นเหล็กกล้าที่ปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในเนื้อสูงสุด คือมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.56 – 1.5% โดยน้ำหนัก กำหนดมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1056 – 1090 กำหนดมาตรฐานเยอรมัน คือ St.170 เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูง นำไปผลิตเครื่องมือคมตัดต่างๆ เช่น มีดกลึง ดอกสว่าง ดอกคว้านละเอียด ดอกทำเกลียว ใบเลื่อยตะไบ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเครื่องมือคมตัดต่างๆ เหล่านี้ จะนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป ตามขนาด และรูปร่าง แล้วนำชิ้นงานไปปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน โดยการนำไปชุบแข็ง (Hardening) ซึ่งจะทำให้งานมีความแข็งสูงมาก แต่เมื่อได้รับแรงกระแทกจะเปราะหักได้ง่าย [9]

รูปที่ 2.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูงนำมาผลิตเป็นเครื่องมือตัดในงานขึ้นรูป [12]

2.1.4 มาตรฐานเหล็กอเมริกัน [9]

มาตรฐานเหล็กอเมริกันแยกเป็น 2 มาตรฐาน คือ

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

การกำหนดมาตรฐานใช้ตัวเลข 4 ตัว เป็นตัวกำหนด โดยตัวเลขตัวที่หนึ่งบอกชนิดของเหล็กว่าเป็นเหล็กอะไร เลขตัวที่สองเป็นตัวบอกปริมาณส่วนผสมในเนื้อเหล็ก และสองตัวสุดท้ายบอกถึงปริมาณคาร์บอน

10 XX = เหล็กคาร์บอนธรรมดา

11 XX = เหล็กคาร์บอนที่เหมาะสมกับงานปาดผิว

13 XX = เหล็กแมงกานีส (Mn 1.75%)

2 XXX = เหล็กนิกเกิล

3 XXX = เหล็กโครเมียมและนิกเกิล

40 XX = เหล็กโมลิบดินัม (Mo 0.2-0.25%)

41 XX = เหล็กโมลิบดินัม (Cr < 0.95%, Mo < 0.30%)

43 XX = เหล็กโมลิบดินัม โครเมียมและนิกเกิล (Mo 0.25%, Cr < 0.80%, Ni 1.83%)

46 XX = เหล็กโมลิบดินัมและ < 1.83% นิกเกิล

48 XX = เหล็กโมลิบดินัมและ 3.50% นิกเกิล

5 XXX = เหล็กโครเมียม

6 XXX = เหล็กโครเมียมและวาเนเดียม

7 XXX = เหล็กโครเมียมและวุลแฟรม

9 XXX = เหล็กซิลิกอนและแมงกานีส

2.2 กระบวนการเชื่อม (Welding Process)

การเชื่อม หมายถึง วิธีการต่อประสานวัสดุโดยใช้ความร้อน ซึ่งอาจได้มาจากไฟฟ้า แก๊ส หรือพลังงานอื่นๆ ที่สามารถทำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงานที่ต้องการต่อประสานได้ โดยทั่วไปอาจทำให้เกิดการหลอมละลาย หรือไม่หลอมละลายก็ได้ ในบางกระบวนการอาจจะต้องใช้ตัวประสาน (Filler Metal) เข้าช่วย และบางกระบวนการอาจต้องใช้แรงกดเข้าช่วยทำให้ชิ้นงานติดกัน [13]

2.2.1 การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) [13]

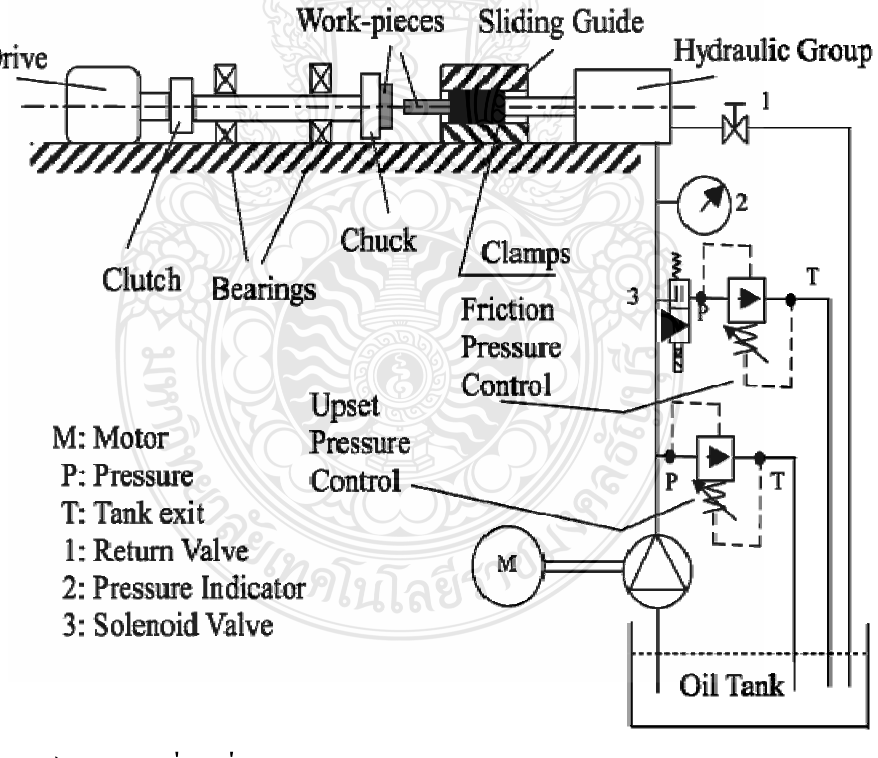
เป็นการให้ความร้อนกับโลหะจนหลอมละลายเป็นกระบวนการต่อโลหะชิ้นงานจนหลอมละลายประสานเป็นเนื้อเดียวละติดกันชนิดหนึ่ง ขณะที่หลอมละลายอาจเติมตัวประสานลงไปหรือใช้เนื้อโลหะเป็นตัวประสานกันเองก็ได้ ความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานจนหลอมละลายนั้นต้องมีความเหมาะสมกับชิ้นงานนั้น

2.2.2 การเชื่อมแบบไม่หลอมละลาย (Solid – State Welding) [13]

การเชื่อมแบบไม่หลอมละลาย หรือการเชื่อมในสภาวะแข็งตัว กระบวนการเชื่อมแบบนี้ มี 2 ชนิด คือ ใช้แรงกดเพียงอย่างเดียว และให้ความร้อนแล้วใช้แรงกดด้วย ซึ่งต้องใช้เวลาที่เหมาะสมด้วย โดยไม่ต้องเติมลวดเชื่อม แต่ผิวงานที่ต้องการเชื่อมต้องสะอาด และอะตอมต้องประสานติดกันได้

2.2.3 การเชื่อมแบบเสียดทาน (Friction Welding) [14]

กระบวนการเชื่อมแบบนี้กระทำได้โดยนำชิ้นงาน 2 ชิ้นมาเสียดสีกัน (ชิ้นหนึ่งหมุน และชิ้นหนึ่งอยู่กับที่) ความฝืดระหว่างผิวหน้าของชิ้นงานจะทำให้เกิดความร้อนเพียงพอที่จะทำให้บริเวณผิวหน้าทั้งสองอ่อนตัว จากนั้นใช้แรงกดให้ชิ้นงานทั้งสองติดกัน ซึ่งจะใช้กับงานที่เป็นรูปทรงกระบอก และเพลา รอยต่อที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติดีหรือไม่นั้น ขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ปริมาณความร้อน ค่าการนำความร้อนของวัสดุ และคุณสมบัติทางกลที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของวัสดุงาน นั่นหมายถึง การควบคุมความเร็ว และแรงกดอัดในขณะเชื่อม ซึ่งเป็นผลให้แนวเชื่อมมีลักษณะแตกต่างกันไป ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ควบคุมเครื่องเชื่อมเสียดทาน [15]

ส่วนเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ต่ำ และคาร์บอนผสมอยู่ปานกลางจะสามารถทำการเชื่อมได้ง่าย และมีขอบเขตการเชื่อมอย่างกว้างขวาง ส่วนเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่

สูง และจำพวกเหล็กผสมจะง่ายต่อการเชื่อม แต่การเชื่อมจะต้องใช้กรรมวิธีในการเชื่อมและเทคนิคในการเชื่อมเพื่อทำให้การเชื่อมนั้นง่ายขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโลหะหลอมละลายติดกัน ส่วนกลุ่มเหล็กประเภทเหล็กเครื่องมือจะสามารถทำการเชื่อมได้เช่นเดียวกับเหล็กพวกคาร์บอนและเหล็กผสมที่ใช้ทำด้ามของดอกสว่านรีมเมอร์ และกลุ่มเครื่องมือตัดชนิดอื่นๆ เหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทานได้ง่าย และรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงทั้งยังมีขอบเขตการเชื่อมอย่างกว้างขวาง แต่ในบางครั้งต้องมีการให้ความร้อนก่อน การเชื่อมและหลังการเชื่อมเพื่อให้รอยเชื่อมดีขึ้น เหล็กหล่อจะออกแบบได้หลายชนิด เช่น พวกเหล็กหล่อสีเทาหรือเหล็กหล่อเหนียวจะไม่สามารถใช้กรรมวิธีเชื่อมด้วยความเสียดทานได้เพราะกลุ่มคาร์บอนอิสระจะไปรวมตัวกันที่ผิวของชิ้นงานและทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นหน้าสัมผัสชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนที่จำกัด โลหะนอกกลุ่มเหล็กและโลหะผสมส่วนมากจะทำการเชื่อมต่อด้วยความเสียดทานได้ เช่น กลุ่มอลูมิเนียมผสม หรือกลุ่มทองแดงผสม จะทำให้สามรถเชื่อมต่อด้วยความเสียดทานได้ เช่น กลุ่มอลูมิเนียมผสม หรือกลุ่มทองแดงผสม จะทำให้สามรถเชื่อมได้เช่นเดียวกับอลูมิเนียมและทองแดงบริสุทธิ์ แต่ในกรณีที่จะต่อประสานกลุ่มอลูมิเนียมผสมหรือทองแดงผสมให้ยึดติดกับเหล็กจะมีปัญหาเกี่ยวกับการนำความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมจะแตกต่างกันมาก แต่ก็สามารถที่จะเชื่อมให้ติดกันได้ แต่รอยเชื่อมที่ได้อาจเปราะเนื่องจากสารที่เกิดจากส่วนผสมของรอยเชื่อม ส่วนกลุ่มไททาเนียม ไททาเนียมผสม เซอร์โคเนียมผสมและแมงกานีสผสม จะทำการเชื่อมด้วยความเสียดทานได้ด้วยตัวเอง กลุ่มโลหะนิเกิลและโคบอลต์ และกลุ่มโลหะทนความร้อน ทังสเตน – โมลิบดินัม โคลัมเบียและแทนทาเนียม จะง่ายมากในการเชื่อมด้วยตัวเอง (โลหะชิ้นงานและตัวที่จะนำมาต่อจะต้องเป็นชนิดเดียวกัน) [14] ดังรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทาน [15]

การเชื่อมเสียดทานสามารถเชื่อมได้แบบทั้งโลหะและอโลหะโดยที่คุณสมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลง การเชื่อมด้วยวิธีอื่นไม่สามารถเชื่อมได้ เพราะจะทำให้เกิดการแตกร้าวจึงทำให้การเชื่อมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จากข้อที่เห็นได้ชัดคือ อุณหภูมิที่หลอมละลายในการเชื่อมและเวลาที่สั้นจึงทำให้การเชื่อมโลหะต่างๆ สามารถทำการเชื่อมได้สะดวกยิ่งขึ้น และการเชื่อมด้วยความเสียดทานเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนมาก (Mass Product) หรือ นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือตัดโลหะด้วยเครื่องจักรอุตสาหกรรม การผลิตชิ้นส่วนประกอบรถยนต์ และรถแทรกเตอร์ รวมถึงเครื่องทำน้ำอุ่น เป็นต้น และการเชื่อมด้วยความเสียดทานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. Continuous Drive Friction Welding [14]

หลักการทำงานของกระบวนการนี้ คือ โลหะชิ้นงานจะถูกจับด้วยหัวจับด้วยหัวจับของเครื่องแล้วถูกทำให้หมุน ส่วนอีกชิ้นหนึ่งจะถูกจับอยู่ที่ยันศูนย์ท้ายเครื่อง (Tail Stock) หรือจิ๊กที่ออกแบบมาสำหรับการจับยึดให้แน่น และจะเลื่อนเข้าหาชิ้นงานเข้าหาด้วยระบบไฮดรอลิค ให้สัมผัสกับชิ้นงานที่กำลังหมุนด้วยแรงกดดันของเพลาที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจากแรงเสียดทานจนถึงอุณหภูมิของการเชื่อม การหมุนก็จะหยุดลงอย่างทันทีทันใด แรงกดดันที่ยันศูนย์ท้ายเครื่องจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์

องค์ประกอบที่สำคัญในการเชื่อมวิธีนี้ คือ ความเร็วรอบที่หัวจับ แรงดันที่ยันศูนย์และระยะเวลาของแรงกด สำหรับรูปลักษณะของรอยเชื่อมจะขึ้นอยู่กับ

1) พื้นภาคตัดของชิ้นงานที่จะเชื่อม

2) จุดหลอมละลายและการกระจายความร้อนของโลหะชิ้นงาน

3) โครงสร้างของโลหะที่เปลี่ยนไปซึ่งเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนขณะเชื่อมโดยเฉพาะโลหะต่างชนิดเมื่อถูกนำมาเชื่อม

ตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมในกระบวนการ คือ ความเร็วรอบ แรงกดเริ่มต้น (ความร้อน) ระยะเวลาของการกดเพื่อให้เกิดความร้อนและรอยย่นหรือแรงกดขึ้นรูป ระยะเวลาของการหมุนซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิของชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานร้อนขึ้น

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

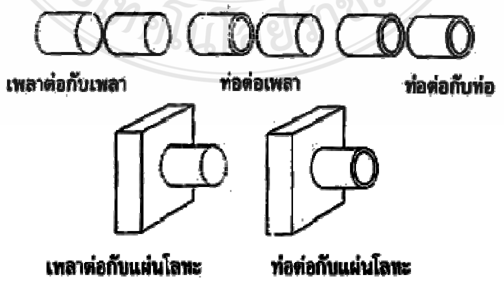
แรงกดที่ทำให้เกิดความร้อนใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กคาร์บอนและเหล็กผสมต่ำ จะใช้แรงกด 6 ถึง 12 kg/cm^2 แรงกดที่ใช้ในการเชื่อมสำหรับเหล็กเหล่านี้จะใช้ถึง12 ถึง 25 kg/cm^2 โดยทั่วไปแรงกดที่ใช้สำหรับการเชื่อมจะสูงกว่าแรงกดที่ทำให้เกิดความร้อนแต่บางครั้งก็ใช้เกือบเท่ากัน สำหรับเหล็กคาร์บอนปานกลางและคาร์บอนสูง จะให้แรงกดที่ทำให้เกิดความร้อน 6 ถึง 15 kg/cm^2 การอุ่นชิ้นงานบางครั้งจะใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่

แกนหมุนควรจะหยุดอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการบิดเบี้ยวหรือแกนสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า1/2 นิ้ว เวลาที่ใช้ในการหยุดควรจะใช้เวลาไม่เกิน 1.5 วินาที และชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1/2 นิ้ว ควรจะหยุดภายใน 1/2 หรือ 2 วินาที [14]

2. Inertia Drive Friction Welding [14]

ความร้อนทั้งหมดที่ต้องการในการเชื่อมจะใช้พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการหมุนล้อช่วยแรงในการเชื่อมแบบ (Inertia Drive Friction Welding) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเชื่อมแบบ (Continuous Drive Friction Welding) โดยหลักการทำงานชิ้นงานหนึ่งจะถูกจับยึดอยู่กับที่หรือที่อุปกรณ์จับชิ้นงาน และชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งถูกจับอยู่ที่หัวจับยึดอยู่กับหัวจับ (Spindle) ที่กำลังหมุน มอเตอร์ขับจะเร่งอัตราการหมุนของพู่เลย์และ (Flywheel) จะส่งต่อกำลังไปยัง (Spindle) จนถึงระดับพลังงานที่เพียงพอและแล้วพลังงานที่ใช้ขับการหมุนจะถูกตัดออก และพลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุน (Flywheel) จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ผิวหน้าของรอยเชื่อมด้วยแรงกดดันที่แกนเพลา ซึ่งจะเป็นผลให้ชิ้นงานเชื่อมติดเข้าด้วยกันโดยสมบูรณ์

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจะถูกจำกัดให้ใช้สำหรับการเชื่อมในท่าราบและรอยต่อมุมโดยตั้งฉากกับจุดศูนย์การของแนวแกนที่หมุน รอยต่อในท่าราบที่ใช้กันโดยส่วนมากจะแบ่งออกได้ [14] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ชนิดของรอยต่อชนที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทาน [4]

ผิวของชิ้นงานที่จะเชื่อมไม่จำเป็นต้องตกแต่งก่อนเชื่อม เช่น ผิวของชิ้นงานผ่านการตัดด้วยใบหินเจียร การตัดด้วยเลื่อย การตัดด้วยแก๊ส เพราะว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดทานจะทำให้ส่วนที่ไม่ราบเรียบเกิดการหลอมละลายรวมตัวกับเนื้อโลหะที่เชื่อม โดยจะไม่ทำให้ประสิทธิภาพรอยเชื่อมลดลง สำหรับโลหะที่เคลือบด้วยโครเมียม โลหะที่ชุบแข็งด้วยไฮโตรคาร์บูไลท์ โลหะที่มีออกไซด์สูง จะไม่สามารถขจัดออกได้ในขณะที่เชื่อม เป็นสาเหตุทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าปกติ และหากมีสารไนโตรเคลือบอยู่หนาจะไม่สามารถทำการเชื่อมได้เลย [14]

การเชื่อมด้วยความเสียดทาน จะสามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ทั้งที่เป็นโลหะชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน สามารถจะเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรง แต่มีบางจำพวกที่เชื่อมเสร็จแล้ว รอยเชื่อมที่ได้จะไม่แข็งแรงเท่ากับโลหะชิ้นงาน ดังนั้นโลหะจำพวกนี้จึงจำเป็นจะต้องให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมเสร็จแล้ว เพื่อจะทำให้โครงสร้างของรอยเชื่อมเหมือนกับโลหะชิ้นงานและโลหะจำพวกนี้ส่วนมากได้แก่พวกเหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดแข็ง (Hardenable – Stainless Steel) [14]

เหล็กกล้าคาร์บอนและ (Alloy Steel) จะง่ายต่อการเชื่อมด้วยความเสียดทานส่วนเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ต่ำ และคาร์บอนผสมอยู่ปานกลางจะสามารถทำการเชื่อมได้โดยง่าย และมีขอบเขตในการเชื่อมอย่างกว้างขวาง ส่วนเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่สูงและจำพวกเหล็กผสมจะง่ายต่อการเชื่อม แต่ในการเชื่อมจะต้องใช้กรรมวิธีการควบคุมกระบวนการเชื่อมและใช้เทคนิคในการเชื่อม เพื่อทำให้การเชื่อมนั้นง่ายขึ้นเหมือนกับการเชื่อมโลหะที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ต่ำ และแรงที่ใช้กดในแนวนอนจะต้องเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโลหะทั้งสองชิ้นนั้นหลอมละลายติดกัน [14]

เหล็กรอบสูง (High Speed Tool Steel) จะสามารถทำการเชื่อมได้เช่นเดียวกับเหล็กจำพวกคาร์บอนและเหล็กผสมที่ใช้ทำด้ามของดอกสว่านริมเมอร์และพวก (Cutting Tool) ชนิดอื่นๆ

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless) จะใช้กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทานได้ง่ายและคุณสมบัติของรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงพร้อมทั้งยังมีขอบเขตในการเชื่อมอย่างกว้างขวาง แต่ในบางครั้งจะต้องมีการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมและหลังการเชื่อมเพื่อจะทำให้คุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมดีขึ้น [14]

เหล็กหล่อ (Cast Iron) แบ่งออกได้หลายชนิด เช่น Gray Ductile or Malleable จะไม่สามารถใช้กรรมวิธีในการเชื่อมด้วยความเสียดทานได้เพราะพวก (Free Graphite) จะไปรวมตัวกันที่ผิวของชิ้นงานและทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่น ซึ่งจะทำให้ได้รับความร้อนที่จำกัด [14]

อโลหะและอโลหะผสม ส่วนใหญ่จะสามารถทำการเชื่อมต่อด้วยความเสียดทานได้เช่น พวกอลูมิเนียมผสมหรือทองแดงผสมจะสามารถเชื่อมได้เช่นเดียวกับจำพวกอลูมิเนียมและทองแดงชนิดบริสุทธิ์ แต่ในกรณีที่ต้องการต่อพวกอลูมิเนียมผสมหรือทองแดงผสมให้ติดกับเหล็ก มีปัญหาเกี่ยวกับด้านการนำความร้อนและอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมต่อกันจะแตกต่างกันมากก็ตามก็สามารถที่จะเชื่อมให้ติดกันได้ แต่รอยเชื่อมที่ได้อาจจะเปราะเนื่องจากสารที่เกิดจากส่วนผสมของรอยเชื่อม [14]

2.3 การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Heat Treatment)

2.3.1 การอบอ่อนหรือการอบให้อ่อนตัวสูง (Annealing) [16]

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

1. เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน จะมีคุณสมบัติที่ไม่สม่ำเสมอตามส่วนที่มีมุมแหลม ซึ่งอัตราการเย็นตัวสูงจะมีความแข็งมากกว่าส่วนอื่นๆ โครงสร้างของเหล็กบริเวณผิวจะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กเพราะถูกแรงกระแทกหรืออัดมากกว่าเนื้อเหล็กภายใน ทำให้มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอถึงภายในเช่นเดียวกัน

2. เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น มักจะมีความเครียดที่เกิดจากการถูกแรงอัด หรือบีบค้างอยู่ มีส่วนทำให้เกิดความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอ สูญเสียความเหนียว (Ductility)

3. เหล็กที่ผ่านงานเชื่อม เช่นเดียวกัน การเชื่อมเป็นการทำให้เหล็กร้อนเป็นบางจุด การขยายตัวเมื่อถูกความร้อนและการหดตัวเมื่อถูกปล่อยให้เย็นย่อมเป็นการยากที่จะทำให้ได้ทั่วถึงมักจะเกิดความเครียดเหลือค้าง และโครงสร้างของเนื้อเหล็กบริเวณจุดที่ทำการเชื่อมจึงต่างกับเนื้อเหล็กในส่วนอื่นๆ ที่ไม่ถูกความร้อนจากการเชื่อม คุณสมบัติของเหล็กจะขาดความสม่ำเสมอ

4. เหล็กที่ผ่านงานหล่อ ยิ่งมองเห็นได้ง่ายว่าโครงสร้างและคุณสมบัติของเหล็ก จะมีส่วนที่แตกต่างกันมากเพราะอัตราการเย็นตัวของเหล็กในแบบหล่อ (ซึ่งส่วนมากใช้ทรายเป็นวัสดุที่ทำแบบหล่อ) จะแตกต่างกันทั้งส่วนที่หนาและส่วนที่บาง ยิ่งส่วนที่เป็นแง่มุมการเย็นตัวจะยิ่งเร็วกว่าส่วนอื่น จึงมักจะมีความแข็งสูง [16]

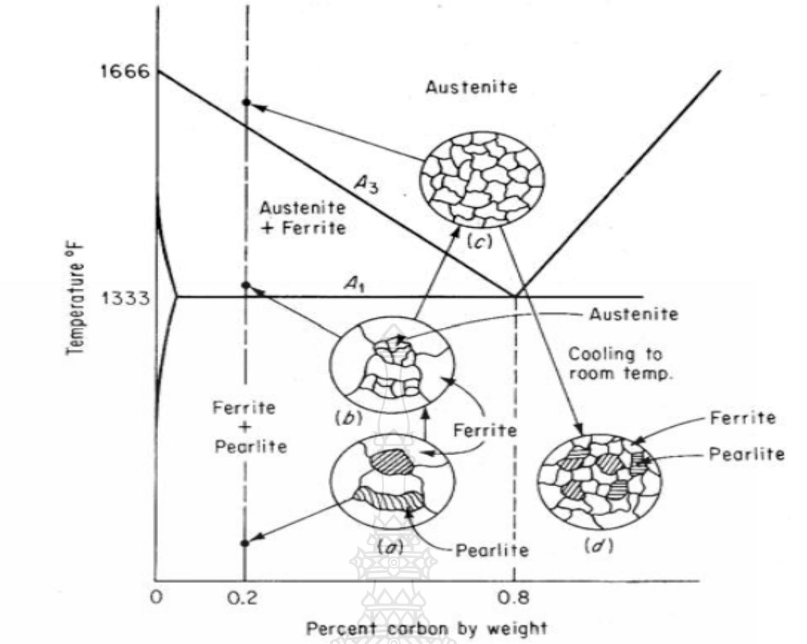
จากที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่า การที่จะนำเอาเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีขึ้นรูปต่างๆ ไปใช้งานหรือนำไปตัด , เจาะ , กลึง , ไส ย่อมจะทำให้อุปสรรคในลักษณะต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นได้ชัดเจน เช่น การกลึง หรือไส ถ้าเหล็กมีความแข็งไม่เท่ากันทุกส่วน การปรับมุมของมีดกลึง หรือตั้งอัตราความเร็วใน

การตัดจะเกิดปัญหามาก และผลงานที่ได้รับก็ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปมาก่อนจะนำไปใช้งานหรือฟอร์มรูปร่างในขั้นต่อๆ ไปจำเป็นจะต้องผ่านการอบให้อ่อนตัว ซึ่งลักษณะของการทำงานมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์สุดท้าย [16]

2.3.2 การอบอ่อนสมบูรณ์ (Full Annealing) [16]

การอบอ่อนสมบูรณ์ประกอบด้วยการให้ความร้อนกับเหล็ก ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม (Proper Temperature) แล้วปล่อยให้เย็นตัว (Cooling) อย่างช้าๆ ตลอดการเปลี่ยนแปลงของเฟสออสเตนไนท์ไปสู่เฟสอื่นๆ (ส่วนใหญ่โครงสร้างที่ได้ คือ เพิร์ลไรท์ อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี และอัตราการเย็นตัวเป็นสำคัญ) โดยปกตินิยมให้เย็นตัวในเตา (Air-Cooled) หรือปล่อยให้เย็นตัวในวัสดุกันความร้อน (Insulating Material) จนถึงอุณหภูมิห้อง

จุดประสงค์ของการอบอ่อนเป็นไปได้ทั้ง ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง (Refine Grain) ทำให้เหล็กมีความอ่อนตัว (Soften) ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (Improve Electrical and Magnetic Properties) และในบางกรณีเพื่อปรับปรุงความสามารถในการกลึง ไส (Improve Machinability) เนื่องจากอุปกรณ์เตาที่ใช้อบ และชิ้นงานเองต้องปล่อยให้เย็นไปพร้อมๆกัน ด้วยเหตุนี้การอบอ่อนจึงเป็นกระบวนการที่เย็นตัวอย่างช้าๆ ใกล้เคียงกับระบบสมดุลในแผนภูมิเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ สมมติว่ามีเหล็กที่มีคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ และมีเกรนหยาบ (จัดเป็นเหล็กกล้าไฮโปยูเทคติค) หากต้องการปรับปรุงขนาดเกรนให้เล็ก (Refine Grain) สามารถทำได้โดยการอบอ่อน (Annealing) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กดังกล่าว ณ ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง [16] สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.7

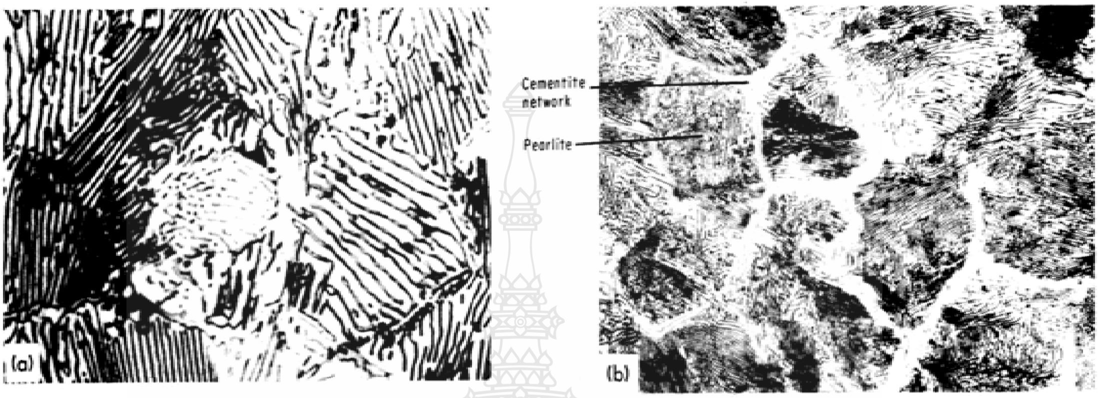


(a) โครงสร้างเดิมที่มีเกรนหยาบของเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์ , (b) เหนือเส้น A1 เล็กน้อย เพิร์ลไรท์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเกรนขนาดเล็กของออสเตนไนท์ในขณะที่เฟอร์ไรท์ไม่เปลี่ยนแปลง , (c) เหนือเส้น A3 มีเพียงเกรนขนาดเล็กของออสเตนไนท์ , (d) หลังจากเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กของเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์

รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการอบอ่อนในเหล็กกล้าคาร์บอน 0.2 % [16]

เมื่อให้ความร้อนกับเหล็กจนถึงอุณหภูมิ ณ จุด (a) โครงสร้างพื้นฐานยังคงเป็นเกรนหยาบของเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์ จนกระทั่งให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ จนเหนือเส้น A1 เล็กน้อย เพิร์ลไรท์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยปฏิกิริยายูเทคตอยด์เป็นเกรนขนาดเล็กของออสเตนไนท์ ณ จุด (b) ถ้าปล่อยให้เย็นตัวจากอุณหภูมิ ณ จุด (b) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนตามต้องการแต่เมื่อให้ความร้อนต่อไปอยู่ระหว่างเส้น A1 และ A3 ทำให้เกรนของเฟอร์ไรท์มีขนาดโต บางส่วนเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเตนไนท์ จนกระทั่งให้ความร้อนเหนือเส้น A3 โครงสร้างเป็นออสเตนไนท์ที่มีขนาดเล็กทั้งหมด จุด (c) หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาโครงสร้างสุดท้ายที่ได้ คือ เกรนขนาดเล็กของเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์ ด้วยเหตุนี้อาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้สำหรับอบอ่อนเหล็กกล้าไฮโปยูเทคติค คือ 10 องศาเซลเซียส (50 °F) เหนือเส้น A3 สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ (เหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์) แนะนำให้ใช้อุณหภูมิสำหรับอบอ่อนที่อุณหภูมิเหนือเส้น A3,1 ประมาณ 10 องศาเซลเซียส (50 °F) อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงพบว่าหา

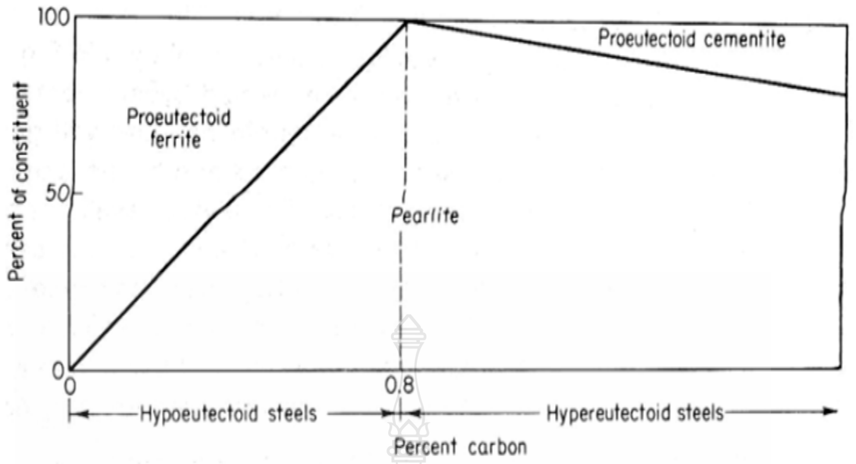
กอบอ่อนเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคติค ณ อุณหภูมิเหนือเส้น A3,1 ประมาณ 10 องศาเซลเซียส (50 °F) พบว่าโครงสร้างประกอบด้วยเกรนหยาบของเพิร์ลไรท์ล้อมรอบด้วยโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ (Pro - Eutectoid Cementite) [16] ดังรูปที่ 2.8



(a) เหล็กกล้าคาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ ที่กาลังขยาย 500 เท่า , (b) เหล็กกล้าคาร์บอน 1.2 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอน ที่กาลังขยาย 300 เท่า โครงสร้างเพิร์ลไรท์ล้อมรอบด้วยโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ ข้อสังเกต ความหนาของชั้น โปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์แปรตามปริมาณคาร์บอน

รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค [16]

เนื่องจากโครงข่ายซีเมนไตต์ (Cementite Network) เปราะและมีแนวโน้มเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกด้วยเหตุนี้จึงไม่แนะนำให้ทำการอบอ่อนชิ้นงาน (Annealing) ในเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (คาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์) เป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำไปใช้งาน นอกจากนี้ชั้นของโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ยังทำให้การกลึง ไส เป็นไปได้ยาก การศึกษาอัตราส่วน โครงสร้างของเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไรท์ (ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ากว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์) หรือโครงสร้าง เพิร์ลไรท์-ซีเมนไตต์ (ในเหล็กกล้าคาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์) ในเหล็กที่ผ่านการอบอ่อน (Annealing) [16] ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 สัดส่วนของโครงสร้างที่ปรากฏในเหล็กกล้าที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อนที่ปริมาณคาร์บอนต่างๆ [16]

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

$$\text{Approx Tensile Strength} \approx \frac{40{,}000\ \%\ Ferrite + 120{,}000\ \%\ Pearlite}{100} \tag{2.1}$$

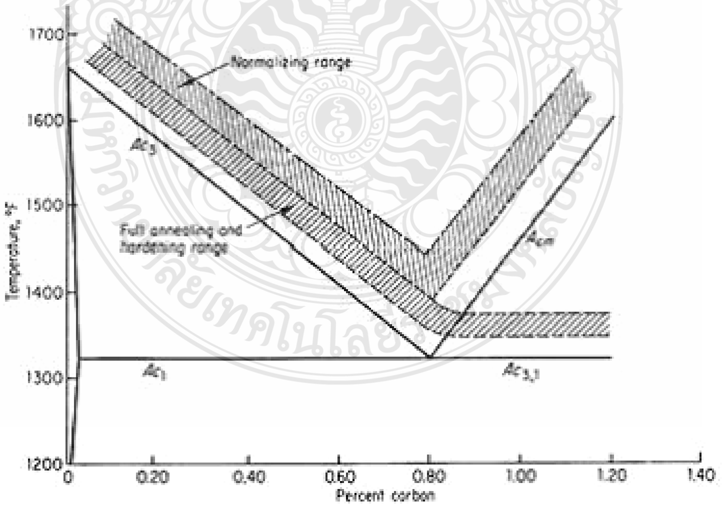
ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าคาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ผ่านการอบอ่อน แล้วประกอบด้วย 25% เพิร์ลไรท์ และ 75% เฟอร์ไรท์ จากสมการที่ 2.1

$$\begin{aligned}\text{Approx Tensile Strength} &= 40{,}000(0.75) + 120{,}000(0.25)\\ &= 60{,}000\ psi\end{aligned}$$

อย่างไรก็ตามหลักการดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้ประมาณค่าความแข็งแรงดึงในเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงข่ายซีเมนไตต์ (Cementite Network) ล้อมรอบทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อนเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีส่วนผสมของคาร์บอนต่างๆ [16] ดังตารางที่ 2.4 และรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลของเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อน (Annealing) และการอบปกติ (Normalizing) [16]

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



รูปที่ 2.10 ช่วงอุณหภูมิสำหรับการอบชุบความร้อน (Hardening Range) การอบอ่อน (Annealing) และการอบปกติ (Normalizing) ของเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon Steels) [16]

ในกรณีของเหล็กไฮเปอร์ยูเต็คตอยด์ อัตราการให้ความร้อนประมาณ 30 – 50 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานเหล็ก ถ้ารูปร่างเป็นแท่งตันอาจจะเผาที่อัตราสูงและควรจะใช้อัตราต่ำ เมื่อแท่งเหล็กมีความหนาที่แตกต่างกันมาก เมื่อเผาจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วควรจะทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 30 - 60 นาที ต่อความหนาเฉลี่ย 25 มิลลิเมตร หลังจากนี้ปล่อยให้เหล็กเย็นตัวช้าๆ ในอัตรา 150 – 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ในทางปฏิบัติปล่อยให้เย็นในเตา (Furnace Cooled) การเปลี่ยน แปลงโครงสร้างของเหล็กจะเป็นไปในลักษณะใกล้เคียงสภาพสมดุล โครงสร้างที่เป็นอยู่ก่อนการอบอ่อน ซึ่งอาจจะเป็นมาร์เทนไซน์ เบนไนท์ หรือเซอร์ไบท์ จะเปลี่ยนเป็นเพิร์ลไลท์ สำหรับเหล็กไฮโปรยูเทคตอยด์จะเป็นเฟอร์ไลต์กับซีเมนต์ไตต์ ส่วนยูเท็คตอยด์ไม่มีปัญหาจะได้โครงสร้างเป็น เพิร์ลไลต์เพียงอย่างเดียว [16]

2.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallographic Examination)

คุณสมบัติและประโยชน์ที่สำคัญของการเสื่อมด้วยแรงเสียดทานคือ คุณภาพทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อม ซึ่งเกิดจากอัตราความเร็วของการกระจายความร้อนในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของโลหะในช่วงที่เกิดพลาสติกในรูปของงานร้อนหรือบางกรณีจะเป็นงานเย็นระหว่างช่วงการอัด ดังนั้นโครงสร้างของเม็ดเกรนจะละเอียดมาก เมื่อโครงสร้างของโลหะในช่วงที่เกิดแรงบิดเพิ่มมากขึ้น จากผลที่เกิดขึ้นจะเป็นการเฉือนตัดผ่านออกไซด์หรือโลหะที่เรียกว่า “ Mastication ” ทำให้เชื่อมโลหะต่างชนิดกันได้ แตกต่างจากการเชื่อมแบบท่าราบ คือจะไม่เกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนของการหลอมละลาย ผลของการเชื่อมมีลักษณะทางโลหะวิทยาที่ดี แต่ถ้ามีอัตราการเย็นตัวอาจเกิดการเสียหายได้ จากการทดสอบจะพบว่าเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมมากขึ้นหรือเกิดอุณหภูมิของการเชื่อมสูงสุด ควรจะมีการหล่อเย็นเพื่อให้อุณหภูมิต่ำลง สำหรับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.45 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสูงสุดที่จำเป็นคือ 1300 องศาเซลเซียส และต้องไม่ปล่อยให้เกิดอุณหภูมิของการเติบโตของเกรน ซึ่งเกิดในช่วง 100 องศาเซลเซียส เราเพียงขยายอัตราการเย็นตัวของโลหะ โดยยึดระยะเวลาที่อุณหภูมินี้ในการปฏิบัติรอยต่อของการอัดจะทำสำหรับการลดขนาดของเกรน แต่ถ้าใช้เวลานานมากเกินไปจะทำให้ปริมาณรอยย่นมาก ดังนั้นในการเชื่อมแบบเสียดทานกับเหล็กเหนียวที่มีความแข็งแรงสูงจึงควรทำการอบอ่อนภายหลังการเชื่อม [17]

2.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหาภาค (Macroscope) [17]

การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะด้วยการตรวจสอบโครงสร้างแบบมหาภาคเพื่อจุดประสงค์บางประการดังนี้ ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม จำนวนชั้นของแนวเชื่อม บริเวณที่มีผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone :HAZ) สแลกฝังในการซึมลึกของแนวเชื่อม และรู

พรุนของงานเชื่อม การเตรียมชิ้นทอสอบ (Macro Specimen) โดยการกัดผิวแล้วกัดด้วยน้ำยาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Test) หรือใช้กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่าเข้าช่วย การตรวจสอบที่ให้ผลดีที่สุดนั้นผู้ตรวจสอบต้องรับผิดชอบและควบคุมการตรวจสอบตามวิธีอย่างถูกต้องและพิจารณารอยบกพร่องที่ปรากฏเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินตรวจสอบเพื่อสรุปผลว่าชิ้นงานนั้นยอมรับได้หรือไม่ [17]

2.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope) [17]

1. การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาด [17]

2. การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ หรือผิวชิ้นงาน ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 200 , 400 , 800 , 1,000 และ1,200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นงานตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย [17] ดังรูปที่ 2.11

รูปที่ 2.11 ทิศทางการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย [17]

อนึ่ง การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากจนเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด

1) การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) หรือ

อาจจะใช้เพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05 – 0.3 ไมโครเมตร และการขัดด้วยผงขัดนี้จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนผ้าสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมันวาว

2) การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา ซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กจะใช้กรดไนตริก 2-4 เปอร์เซ็นต์ ผสมแอลกอฮอล์

3) การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชิ้นตรวจสอบถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว ซึ่งผู้ตรวจสอบจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาการทำงานของกล้องจุลทรรศน์จากคู่มือการใช้เครื่องให้เข้าใจและเกิดทักษะเสียก่อน [17]

2.4.3 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) [17]

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) คือ เครื่องมือขยายขอบเขตของประสาทสัมผัสทางตาให้เห็นสิ่งที่ไม่สามารถเห็นด้วยตาเปล่า เช่น จุลินทรีย์ เซลล์เม็ดเลือด เป็นต้น

1. ประโยชน์ของกล้องจุลทรรศน์

1) ช่วยในการมองเห็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กกว่าตาเราจะมองเห็น

2) ช่วยในการศึกษาหาข้อมูลหลักฐานทางชีววิทยา

2. หลักการทางานของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องช่วยตาในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเซลล์ให้ละเอียดยิ่งขึ้นซึ่งกล้องจุลทรรศน์มีความสามารถขยาย (Magnification) ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุด ซึ่งอยู่ใกล้กันที่สุดให้มองเห็นแยกเป็นสองจุดได้ (Two Point of Discrimination) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ส่องผ่านเลนส์ ซึ่งถ้าแสงมีความยาวคลื่นที่สั้น จะช่วยเพิ่ม resolving power และความสามารถในการรวมแสงของเลนส์วัตถุ (Numerical Aperture of Objective Lens / NA) โดยที่ค่า NA ยิ่งมากภาพที่ได้ก็จะยิ่งคมชัดมากขึ้นตาม [17]

3. ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์

1) ลำกล้อง (Body Tub) เป็นส่วนที่เชื่อมโยงระหว่างเลนส์ใกล้ตากับเลนส์ใกล้วัตถุ มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกรบกวน

2) แขน (Arm) คือ ส่วนที่ทาหน้าที่ยึดระหว่างส่วนลำกล้องกับฐาน เป็นตำแหน่งที่จับเวลายกกล้อง

3) แท่นวางวัตถุ (Specimens Stage) เป็นแท่นใช้วางแผ่นสไลด์ที่ต้องการศึกษา

4) ที่หนีบสไลด์ (Stage Clip) ใช้หนีบสไลด์ให้ติดอยู่กับแท่นวางวัตถุ ในกล้องรุ่นใหม่จะมี Mechanical stage แทนเพื่อควบคุมการเลื่อนสไลด์ให้สะดวกขึ้น

5) ฐาน (Base) เป็นส่วนที่ใช้ในการตั้งกล้อง ทำหน้าที่รับน้ำหนักตัวกล้องทั้งหมด

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

7) เลนส์รวมแสง (Condenser) ทำหน้าที่รวมแสงให้เข้มขึ้นเพื่อส่งไปยังวัตถุที่ต้องการศึกษา

8) ไดอะแฟรม (Diaphragm) อยู่ใต้เลนส์รวมแสงทำหน้าที่ปรับปริมาณแสงให้เข้าสู่เลนส์ในปริมาณที่ต้องการ

9) ปุ่มปรับภาพหยาบ (Coarse Adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพโดยเปลี่ยนระยะโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ (เลื่อนลำกล้องหรือแท่นวางวัตถุขึ้นลง) เพื่อทำให้เห็นภาพชัดเจน

10) ปุ่มปรับภาพละเอียด (Fine Adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพและทำให้ได้ภาพที่ชัดเจนมากขึ้น

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

12) เลนส์ใกล้ตา (Eye Piece) เป็นเลนส์ที่อยู่ด้านบนสุดของลำกล้อง โดยทั่วไปจะมีกำลังขยาย 10x หรือ 15x ทำหน้าที่ขยายภาพที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดภาพที่ตาผู้ศึกษาสามารถมองเห็นได้ โดยภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนจริงหัวกลับ [17]

4. ประเภทของกล้องจุลทรรศน์ [17]

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงแบบธรรมดา ประกอบด้วยเลนส์ 2 ชนิด คือ เลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตาโดยใช้แสงผ่านวัตถุแล้วขึ้นมาที่เลนส์จนเห็นภาพที่บนวัตถุอย่างชัดเจน

1) กล้องที่ใช้แสงแบบสเตอริโอ เป็นกล้องที่ประกอบด้วยเลนส์ที่ทำให้เกิดภาพแบบ 3 มิติ ใช้ศึกษาวัตถุที่มีขนาดใหญ่แต่ตาเปล่าไม่สามารถแยกรายละเอียดได้จึงต้องใช้กล้องชนิดนี้ช่วยขยาย กล้องชนิดนี้มีข้อแตกต่างจากกล้องทั่วๆ ไป คือ ภาพที่เห็นเป็นภาพเสมือนมีความชัดลึกและเป็นภาพสามมิติ เลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยายต่ำ (น้อยกว่า 1 เท่า) ใช้ศึกษาได้ทั้งวัตถุโปร่งแสงและวัตถุทึบแสง และระยะห่างจากเลนส์ใกล้วัตถุกับวัตถุที่จะศึกษาอยู่ในช่วง 63-225 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.12

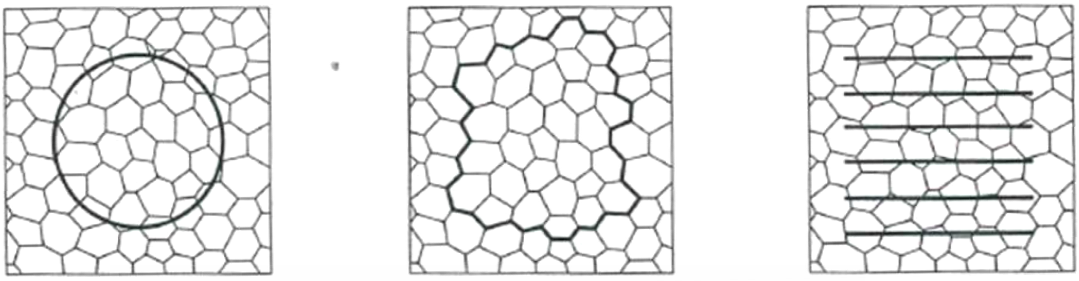
รูปที่ 2.12 กล้อง Microscope [17]

2) กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน เป็นกล้องที่ใช้อิเล็กตรอนความถี่สูงให้การทำงานแทนแสง สามารถขยายได้ถึง 500,000 เท่า จนเห็นโมเลกุลที่อยู่ในโครงสร้างต่างๆ ได้เลย แต่ด้วยความสามารถขยายที่สูงราคาจึงสูงตาม

2.4.4 วิธีการหาขนาดความโตของเม็ดเกรนแบบวงกลม เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ขัดผิวแล้วเขียนวงกลมด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง และพื้นที่วงกลม จากนั้นการนับจำนวนเม็ดเกรน ที่อยู่ในวงกลม และจำนวนเม็ดเกรนที่ถูกเส้นรอบวงลากผ่านซึ่งผลจะออกมาเป็นจำนวนเม็ดเกรนที่อยู่ในพื้นที่วงกลม ภาพที่เห็นมีกำลังขยายซึ่งจะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดเม็ดเกรน [8]

2.4.5 วิธีหาขนาดความโตเม็ดเกรนแบบหาพื้นที่ มีการขีดเส้นตามแนวช่วงเม็ดเกรนที่มีมุมเป็นเหลี่ยมเกือบเป็นมุมฉากและขนาดพื้นที่ จะหาด้วยวิธีการหาระนาบเรขาคณิต (Plane Geometry) จากจำนวนของเม็ดเกรนที่ถูกขีดด้วยจำนวนของเม็ดเกรน จะทำให้สามารถคำนวณพื้นที่เฉลี่ยของเม็ดเกรนได้ [8]

2.4.6 วิธีหาขนาดความโตเม็ดเกรนแบบวิธีการลากเส้นตรง มีวิธีการแบบขีดเส้นตรงตามความยาวตามจำนวนเม็ดเกรนต่อตารางนิ้ว จำนวนของเม็ดเกรนที่ถูกตัดผ่าน และที่กำลังขยายได้ขนาดความโตของเม็ดเกรน ซึ่งโดยปกติจะใช้วิธีการลากเส้นตรง 5 ถึง 10 เส้น [8] ดังรูปที่ 2.13



(ก) แบบวงกลม (ข) แบบพื้นที่ (ค) แบบลากเส้นตรง

รูปที่ 2.13 การหาขนาดความโตของเกรนตามมาตรฐาน ASTM E112/E1382 – 97 [8]

2.5 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

2.5.1 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึง [18]

การทดสอบแรงดึง ถ้าแบ่งตามลักษณะของชิ้นงานทดสอบหลังการทดสอบ จัดว่าเป็นการทดสอบแบบทำลาย DT (Destructive Testing) หรือถ้าดูตามลักษณะของแรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบขณะทำการทดสอบ ก็จัดว่าเป็นการทดสอบแบบแรงคงที่ (Static Load Testing) การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบวัสดุที่สำคัญที่สุด ทั้งนี้เพราะในการออกแบบส่วนใหญ่จะใช้ค่าซึ่งได้จากการทดสอบนี้ไปใช้ในการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน

วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบแรงดึง เพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ ค่าความต้านแรงดึง Rm (Tensile Strength) ความเค้นคราก Re (Yield Stress) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว A (Elongation) ของวัสดุ เป็นต้น ในการทดสอบโดยทั่วไปชิ้นทดสอบจะถูกดึงจนขาดออกจากกัน โดยในขณะทำการทดสอบแรงที่ใช้ในการดึงและระยะยืดของชิ้นทดสอบจะถูกบันทึกไว้ด้วยเครื่องบันทึก (Recorder) [18]

2.5.2 ขั้นตอนในการทดสอบ [18]

ในการทดสอบความต้านทานแรงดึง ก่อนอื่นชิ้นทดสอบจะถูกนำมาทำรอย โดยการขีดหรือตอกด้วยเหล็กนำศูนย์ เพื่อกำหนดความยาวพิกัด Lo ดังรูปที่ 2.22 จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกจับยึดบริเวณปลายทั้งสองข้างด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เครื่องทดสอบจะค่อยๆ ดึงชิ้นทดสอบช้าๆ ขณะที่ทำการดึงเครื่องจะทำการบันทึกเส้นโค้ง แรงดึง F – ระยะยืด L ในช่วงแรกเส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงมีความชันสูง โดยระยะยืดมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดึง ซึ่งในช่วงนี้ถ้ายกเลิกการดึงชิ้นงานทดสอบจะหดกลับไปยังความยาวเดิม จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดหยุ่น (Elastic) เมื่อจุดที่แรงเริ่มตกลงนี้เรียกว่าแรงที่จุดคราก Fe (Yield Point) ในขณะที่ชิ้นทดสอบยังคงยืดตัวต่อไปจนกระทั่งแรงดึง

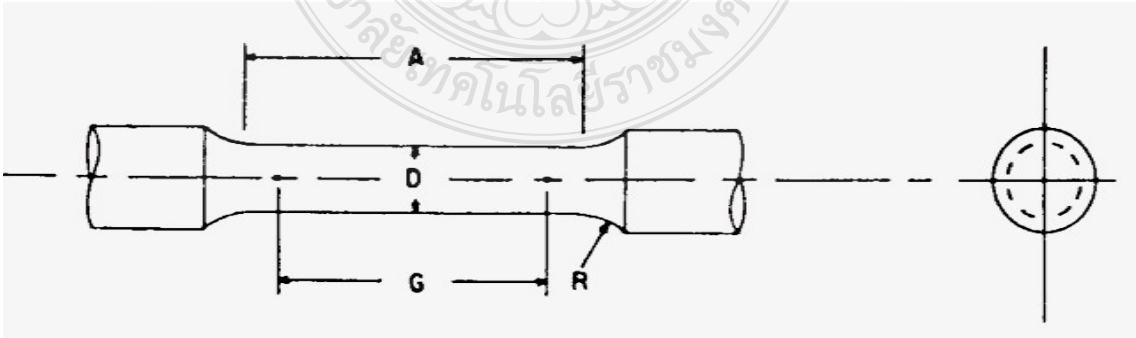
เริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แต่คราวนี้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งความชันลดลงเรื่อยๆ ช่วงนี้ถ้ายกเลิกการดึงจะพบว่าชิ้นทดสอบมีความยาวเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดตัวถาวร (Plastic) เมื่อชิ้นทดสอบถูกดึงต่อไปอีกจะพบว่าแรงดึงจะเริ่มลดลง และถ้าสังเกตที่ชิ้นทดสอบจะพบว่าชิ้นทดสอบจะมีลักษณะคอดลง ซึ่งจุดที่คอดนี้คือจุดที่ชิ้นทดสอบจะขาดออกจากกัน แรงสูงสุด Fm และแรงที่จุดคราก Fe จะถูกนำไปคำนวณค่าความต้านแรงดึง Rm (Tensile Strength) และค่าความเค้นคราก Re (Yield Stress)

2.5.3 รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ

รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบตลอดจนวิธีการผลิต เพื่อใช้ในการทดสอบแรงดึงสำหรับโลหะทั่วไปได้ถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐาน เช่น ตามมาตรฐาน ASTM E8 - 04 [6] สำหรับการทดสอบแรงดึงแนวเชื่อมเหล็กกล้า ในส่วนของรูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบชนิดเพลากลม ดังตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.13

ตารางที่ 2.5 รูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบชนิดเพลากลมตามมาตรฐาน ASTM E8 - 04 [6]

เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นทดสอบ D (นิ้ว)	ความยาวพิกัด G (นิ้ว)	ความยาวช่วงขนาน A (นิ้ว)	รัศมี R (นิ้ว)
0.5	2.0	2.25	0.375
0.35	1.4	1.75	0.250
0.25	1.0	1.25	0.187
0.16	0.64	0.75	0.156
0.113	0.45	0.625	0.094



รูปที่ 2.14 ชิ้นทดสอบแรงดึงชนิดเพลากลมตามมาตรฐาน ASTM E8 - 04 [6]

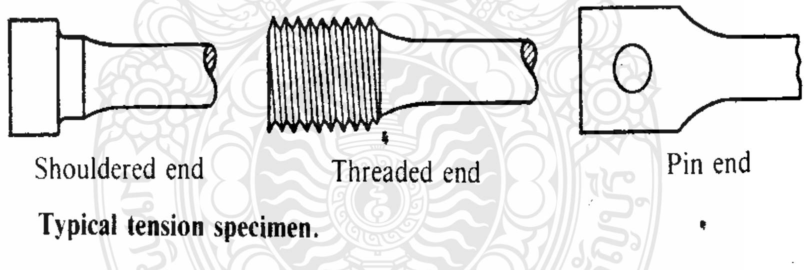
1. การวัดขนาดชิ้นทดสอบ [18]

ก่อนอื่นต้องทำการวัดขนาดชิ้นทดสอบ โดยทาการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบ การวัดต้องทำที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของความยาวเริ่มต้นและบริเวณตรงกลาง จากนั้นจึงนำค่าทั้งสามมาคิดค่าเฉลี่ย ค่าที่ต่ำกว่า 10 มิลลิเมตรให้วัดให้ได้ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ส่วนค่าที่สูงกว่า 10 มิลลิเมตรให้วัดได้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง หลังจากนั้นจึงทำการจัดแบ่งความยาวพิกัดออกเป็น 10 ส่วนเท่าๆ กัน เพื่อใช้ในการหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว A

2. การจับยึดชิ้นทดสอบ [18]

ลักษณะการยึดชิ้นทดสอบ โดยการดึงนั้น จะต้องยึดด้วยวิธีเหมาะสม ว่าจะใช้อุปกรณ์ใดยึดชิ้นทดสอบ และวิธีไหนจึงจะสะดวก ข้อสำคัญในการยึดชิ้นทดสอบ คือต้องพยายามอย่างดีที่สุดที่จะให้แรงทดสอบกระทำอยู่ในแนวแกนของชิ้นทดสอบ และจะต้องมีความแน่ใจด้วยว่าอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบมีความแข็งแรงเพียงพอต่อแรงกระทำจนชิ้นทดสอบขาด

สำหรับวิธียึดชิ้นทดสอบมีอยู่หลายวิธี เช่น ใช้ลิ่มยึด เกลียวยึด บ่ายึด โดยแต่ละวิธีจับยึดชิ้นทดสอบนั้นจะต้องไม่เกิดการบิดแกว่ง หรือเกิดการดัดโค้งขณะที่ทำการทดสอบ ดังนั้นตรงปลายยึดชิ้นทดสอบจึงต้องมีการเตรียมให้มีรูปร่างลักษณะยึดตามวิธีเหมาะสม ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะปลายยึดชิ้นทดสอบโดยการดึง [19]

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าลักษณะปลายยึดชิ้นทดสอบจะถูกเตรียมได้หลายแบบ ดังนี้คือ

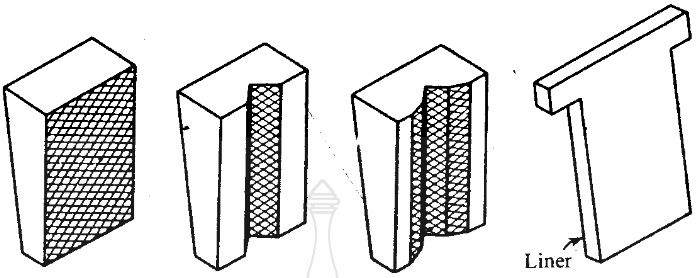
1) ปลายยึดแบบบ่า (Shouldered End)

2) ปลายยึดแบบเกลียว (Thread End)

3) ปลายยึดแบบเจาะรูใส่สลัก (Pin End)

อุปกรณ์สำหรับการยึดชิ้นทดสอบนั้นมีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมหรือสะดวกต่อการใช้และสะดวกต่อการเตรียมปลายยึดชิ้นทดสอบนั้นก็คือ ลิ่มยึด (Wedge Grips) การยึดด้วยวิธีใช้ลิ่มนั้น

เหมาะสำหรับกับชิ้นทดสอบที่เป็นโลหะเหนียวมากกว่าโลหะเปราะ เพราะการยึดชิ้นทดสอบจะทำให้ผิวแตกและอาจจะเกิดการดึงขาดใกล้บริเวณที่จับยึดชิ้นทดสอบก็ได้ ดังรูปที่ 2.16

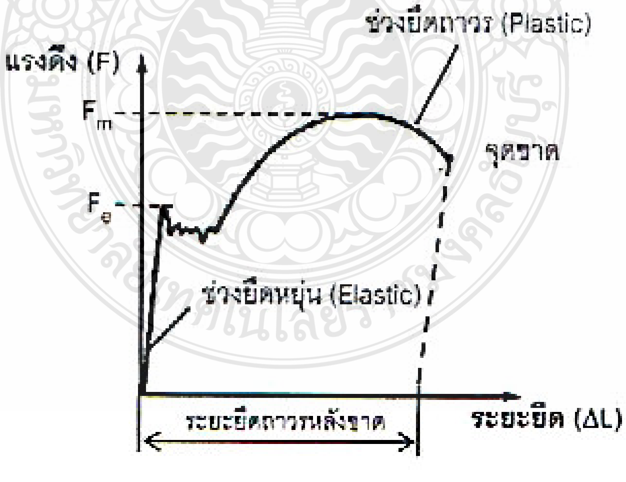


Wedge-grip units for tension tests of metals.

รูปที่ 2.16 ลักษณะลิ่มยึดที่ใช้ยึดชิ้นทดสอบโดยการดึง [19]

3. ความเร็วในการดึง [18]

เนื่องจากความเค้นคราก Re (Yield Stress) และค่าความต้านแรงดึงสูงสุด Rm (Tensile Strength) ขึ้นอยู่กับความเร็วในการดึงด้วย ดังนั้นความเร็วในการดึงจึงต้องถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐาน เช่น ความเร็วในการดึงเพื่อหาค่า Re จะใช้ความเร็วไม่เกิน 30 N/ mm^2 ต่อวินาที ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แผนภาพแรงดึง – ระยะยืด [18]

2.5.4 ค่าสมบัติทางกลของวัสดุ [18]

จากค่าแรงดึงต่อพื้นที่ภาคตัดขวาง ที่ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงส่วนมากจะพลอตกราฟหรือพิมพ์ออกมาได้ โดยสูตรที่ประกอบการคำนวณ มีดังนี้

ความเค้นคราก (ทั่วไป) $R_e = \sigma_{ye} = \dfrac{Fc}{So}$ (2.2)

$R_{P0.2}$ = ความเค้นครากพิสูจน์ ที่อัตราการยืดตัว 022% $\left(N/mm^2\right)$

Fe = แรงดึงที่จุดครากตัว (N)

F0.2 = แรงดึงที่ทำให้เกิดการยืดตัว 0.2% (วัดหลังจากลดแรงดึงเหลือศูนย์)

So = ขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางก่อนรับแรงดึง (mm^2)

ในกรณีเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จะเกิดมีจุดความเค้นครากตัวบน-ล่าง

ความเค้นครากบน (Upper Yield Stress) $R_{eH} = \dfrac{F_{eH}}{S_o}$ หน่วย $\left(N/mm^2\right)$ (2.3)

ในทางปฏิบัติค่า $R_{eH} = R_e$ (2.4)

ความเค้นครากล่าง $R_{eL} = \dfrac{F_{eL}}{S_o}$ หน่วย $\left(N/mm^2\right)$ (2.5)

F_m = แรงดึงสูงสุดขณะทดสอบ (N)

2.5.5 การทดสอบ [18]

การวัดขนาดชิ้นทดสอบก่อนทำการทดสอบ ขนาดชิ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 มิลลิเมตรยอมให้ผิดพลาดได้ 0.01 มิลลิเมตร ขนาดชิ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 มิลลิเมตรยอมให้ผิดพลาดได้ 0.1 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่เป็นผิวรีดขนาดผิดพลาดได้ 0.1 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่ไม่เป็นหน้าตัดทรงกระบอกกลม หรือไม่เป็นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก ให้ขนาดผิดพลาดได้สูงสุด 1 เปอร์เซ็นต์ [18]

ตารางที่ 2.6 ค่าความเร็วความเค้นในการทดสอบแรงดึงสำหรับเหล็กกล้าและโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก [18]

วัสดุ	ความเร็วความเค้นสูงสุดในช่วงยืดหยุ่น		
	ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิห้อง	สูงกว่าอุณหภูมิห้อง
เหล็กกล้า	ตามแต่ตกลง	30 $N/mm^2.s$	10 $N/mm^2.s$
โลหะที่ไม่ใช่เหล็ก	ตามแต่ตกลง	10 $N/mm^2.s$	10 $N/mm^2.s$

ความเร็วการยืดตัวในการหาจุดครากตัวล่าง (R_{eL}) ที่อุณหภูมิห้องจะให้ไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ต่อนาที สำหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ให้ความเร็วการยืดตัวสูงสุดไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที

ความยืด $A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \times 100$ หน่วย เปอร์เซ็นต์ (2.6)

L_0 = ความยาวก่อนดึง , มิลลิเมตร

L_u = ความยาวหลังดึงขาด , มิลลิเมตร

การลดทอนพื้นที่ $Z = \frac{(S_u - S_0)}{S_0} \times 100$ หน่วย ตารางมิลลิเมตร (2.7)

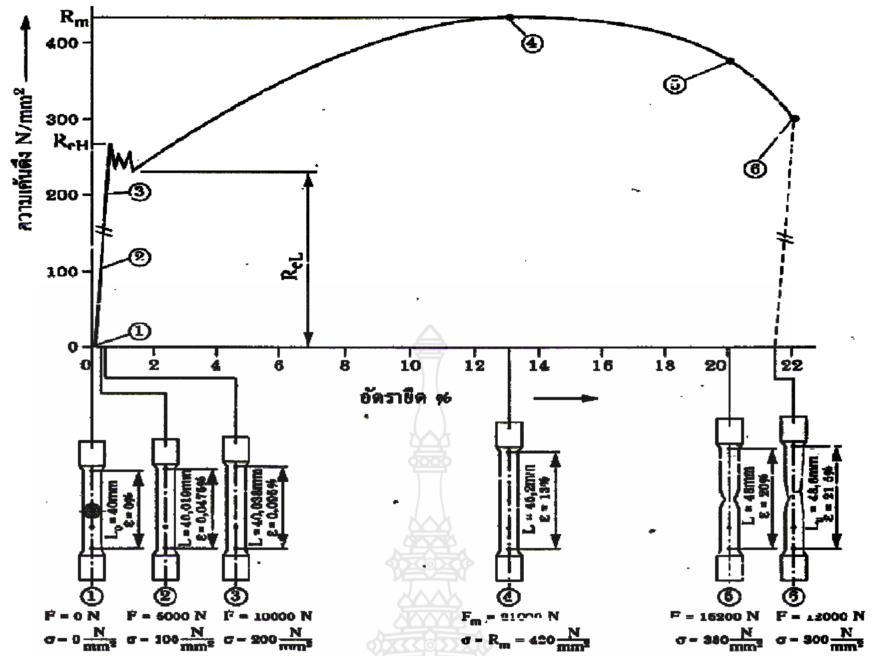
โมดูลัสยืดหยุ่น $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ หน่วย N/mm^2 (2.8)

σ = ความเค้นดึง ,N/mm^2

ε = ส่วนที่ออก $= \frac{(L - L_0)}{L_0}$ (2.9)

L = ความยาวที่ยืดออก , มิลลิเมตร

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กกล้า $E = 21.10^4$ N/mm^2



รูปที่ 2.18 แผนภาพความเค้นดึงและอัตรายืดของเหล็กกล้าไม่เจือจาง [18]

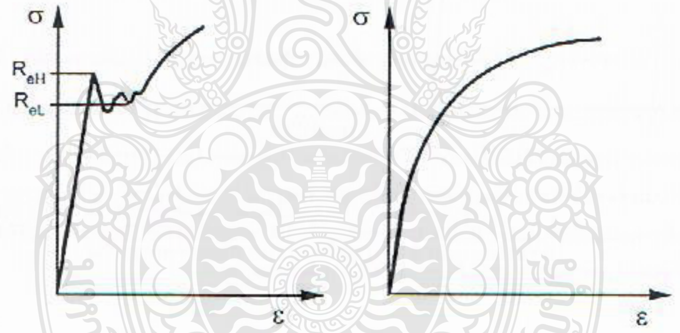
รูปที่ 2.19 เครื่องทดสอบแรงดึง [20]

จากเครื่องทดสอบแรงดึงจะได้แผ่นภาพแรง F ความยาวเพิ่มขึ้น L แผ่นภาพนี้ไม่สามารถใช้เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกับวัสดุชนิดอื่น ซึ่งขนาดและรูปร่างแตกต่างกันได้ เช่น ชิ้นทดสอบซึ่งมีความหนามากกว่า และสั้นกว่าจะใช้แรงดึงจนชิ้นทดสอบขาดสูงกว่าและถูกยืดน้อยกว่าชิ้นทดสอบ

ซึ่งบางกว่าและยาวกว่า แต่ทั้งนี้ไม่ได้หมายความว่าชิ้นทดสอบที่ใช้แรงดึงสูงกว่าจะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเสมอไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำแรงดึงให้แรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยความยาวโดยที่ใช้สมการความเค้นคราก ดังสมการที่ 2.2 และสมการส่วนที่ยืดออก สมการที่ 2.8 [18]

1) การหาค่าความเค้นคราก Re (Yield Stress) [18]

เส้นโค้งของแผ่นภาพ $\sigma - \varepsilon$ (Stress – Strain Diagram) นี้จะมีอยู่ด้วยกันสองลักษณะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ คือ ลักษณะที่หนึ่งส่วนต่อระหว่างช่วงยืดหยุ่นกับช่วงพลาสติกเป็นไปอย่างต่อเนื่องอีกลักษณะหนึ่งเป็นไปได้อย่างไม่ต่อเนื่อง โดยมีจุดหักอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 2.18 ลักษณะหลังนี้จุดหักจะเป็นจุดกำหนดค่าความเค้นคราก Re ส่วนลักษณะแรกจะต้องใช้ค่าความเค้นพิสูจน์ Rp (Proof Stress) ดังรูปที่ 2.20 และสามารถแทนค่าความเค้นครากได้จากการคำนวณโดยนำแรงที่จุดคราก Fe หารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ So ดังสมการที่ 2.7

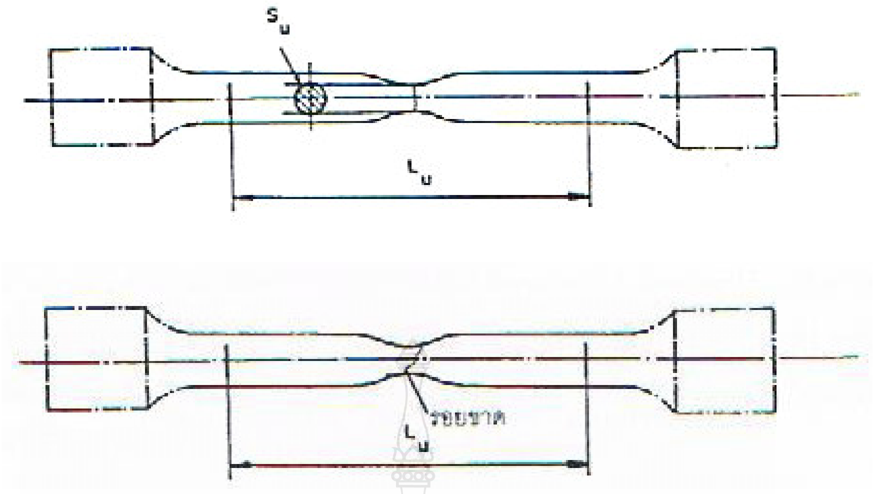


ซ้าย : มีจุดครากชัดเจน ขวา : ไม่พบจุดคราก

รูปที่ 2.20 แผนภาพความเค้น – ความเครียด ($\sigma - \varepsilon$ Strain Diagram) [18]

2) ความยืด A (Elongation) [18]

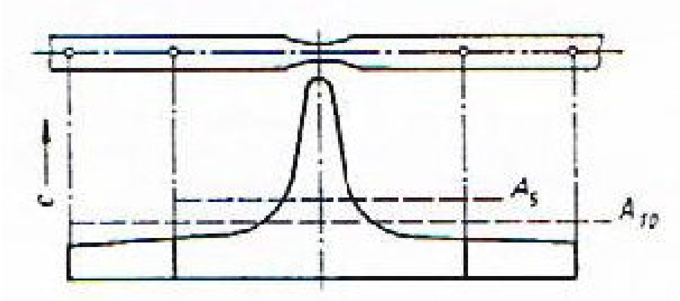
ค่าความยาวชิ้นทดสอบหลังจากถูกดึงขาด Lu วัดได้โดยการนาชิ้นทดสอบที่ถูกดึงขาดมาต่อเข้ากันโดยต้องระวังให้แกนของส่วนที่ขาดอยู่ในแนวเดียวกัน และต้องถูกประกบกันให้สนิทขณะทำการวัด ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การวัดขนาดความยาวชิ้นทดสอบหลังถูกดึงขาด Lu [18]

ข้อสังเกต ผลการทดสอบจะใช้ได้เสมอ ไม่ว่ารอยขาดจะอยู่บริเวณใดในช่วงความยาวพิกัด Lo ถ้าค่า A ที่ได้จากการทดสอบมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของวัสดุนั้น แต่ในกรณีที่ตำแหน่งของรอยขาดถ้าวัดจากขอบที่ใกล้ที่สุดมีค่าน้อยกว่า 1/3 Lo และค่า A ที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของวัสดุนั้น ให้ถือว่าผลการทดสอบยังใช้ไม่ได้ต้องทำการทดสอบใหม่ เพราะถ้าตำแหน่งรอยขาดอยู่ในช่วง 1/3 Lo ถึง 2/3 Lo ค่า A ที่ได้จะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากช่วงที่มีการยืดตัวของวัสดุมากที่สุดจะอยู่บริเวณใกล้รอยขาด ในขณะที่บริเวณที่ห่างออกไปวัสดุมีการยืดตัวน้อยลงไปตามลำดับ [18]

ในการกำหนดขนาดความยาวพิกัด Lo ต้องกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐาน ในกรณีที่ไม่สามารถกำหนดได้ตามมาตรฐาน ต้องระบุไว้ในรายงานอย่างชัดเจนถึงขนาด Lo ที่ใช้ทั้งนี้ในการทดสอบวัสดุถ้าเพิ่มขนาดความยาวพิกัด Lo ขึ้น ค่าความยืด A ที่ได้จากการทดสอบจะลดลง ในขณะที่ถ้าลดความยาวของพิกัด Lo ลง ค่าความยืด A จะเพิ่มขึ้นทั้งๆ ที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ทั้งนี้เป็นเพราะบริเวณใกล้รอยขาดเนื้อวัสดุจะยืดตัวถาวรมากที่สุด ในขณะที่ห่างออกไปจะยืดตัวถาวรน้อยลงตามลำดับ แต่การคำนวณค่าความยืดเป็นการคำนวณเฉลี่ยทั้งความยาวพิกัด Lo [18] ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 เส้นโค้งค่าความยืดและเปรียบเทียบค่าความยืด A5 (L0 = 5 d0) และ A10 (L0 = 10 d0) [18]

3) ยังโมดุลัส E (Young' Modulus) [18]

ในแผ่นภาพ $\sigma - \varepsilon$ พบว่าในช่วงต้นของเส้นโค้งวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) เส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยที่ค่าความเค้น σ จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียด ε ตามกฎของฮูก (Hooke's law)

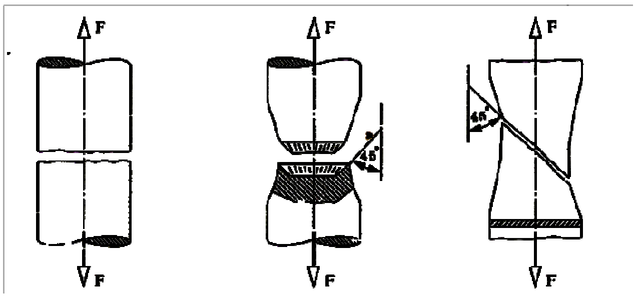
$$\text{ยังโมดุลัส } E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (N/mm^2) \qquad (2.10)$$

สมการนี้จะใช้ได้เฉพาะในช่วงยืดหยุ่นเท่านั้น ค่ายังโมดุลัสของวัสดุเป็นค่าชี้บ่งถึงความต้านทานของวัสดุต่อการยืดตัวในช่วงยืดหยุ่น ในตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบค่ายังโมดุลัส E ของวัสดุแต่ละชนิด [16]

2.5.6 ลักษณะรอยขาดของชิ้นทดสอบ [18]

1) รอยขาดแบบขวางตรง

รอยขาดขวางแนวแรงดึงนี้จะเกิดขึ้นกับวัสดุที่ปราศจากระนาบเลื่อนไหล หรือเกิดจากวัสดุที่มีแรงต้านการไหลของอะตอมสูง ส่วนมากจะเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเม็ดเกรนที่มีลักษณะวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) มีผลึกเม็ดเกรนที่เปราะ (เหล็กหล่อสีเทา)



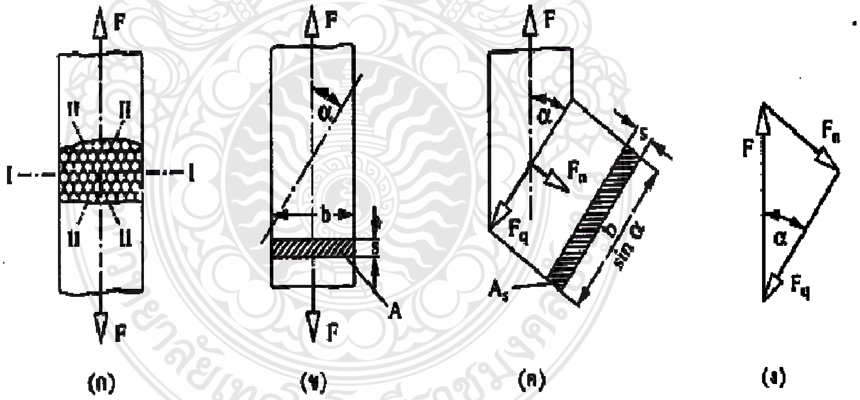
รูปที่ 2.23 ลักษณะรอยขาดของชิ้นทดสอบแรงดึง [18]

2) รอยขาดแบบเอียง [18]

กระบวนการภายในในขณะแตกหักเมื่อพิจารณาชิ้นทดสอบที่มีภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อให้งายต่อการพิจารณาให้คิดว่าภาคตัด เป็นหนึ่งผลึกที่มีเม็ดเกรนหยาบมาก

ในการแยกระนาบเม็ดเกรน I ให้ออกจากกันจะต้องใช้แรงดึง F ที่มากกว่าแรงต้านการแยกของวัสดุ แต่ก่อนที่แรงดึง F จะเพิ่มขึ้นและจะชนะแรงต้านการแยกตัว ระนาบเม็ดเกรน II จะเคลื่อนที่ มีผลให้ชิ้นทดสอบเสียรูป (Translation)

การเกิดเสียรูปนี้จะมีแรงเฉือน F_q กระทำอยู่ทำให้เกิดความเค้นเฉือน τ ขึ้น



รูปที่ 2.24 แรงภายในชิ้นทดสอบที่รับแรงดึง [18]

จากรูปที่ 2.24 (ข) แสดงภาพแรงเฉือน ทำให้เกิดมุม α ขึ้นอย่างอิสระเป็นแนวตัดในชิ้นทดสอบที่เขียนเป็นแนวแรงในรูปวัตถุอิสระ (Free Body) ดังรูปที่ 2.24 (ค) ในแนวตัดจะมีแรงภายนอก F กระทำที่มีแรงภายใน 2 แรงกระทำ ทำให้อยู่ในสภาวะสมดุล ดังรูปที่ 2.24 (ง)

พื้นที่ภาคตัดขวาง A ดังรูปที่ 2.23 (ค) ที่สัมพันธ์กับมุม α ซึ่งมีขนาดพื้นที่โตกว่าพื้นที่ A

$$A_S = A/\sin\alpha = b\,s / \sin\alpha \qquad (2.11)$$

ความเค้นเฉือน $\tau = F_q/A_S = F\cos\alpha \sin\alpha / bs$ (2.12)

ในทุกระนาบของเม็ดเกรนจะทำให้เกิดมุมจากการเลื่อนไหลของอะตอมสูงสุดไม่เกิน 45^0 ที่ทำให้เกิดความเค้นเฉือนภายในขึ้น ลักษณะรอยขาดเป็นมุมเอียงนี้เรียกว่า รอยขาดแบบเอียง ซึ่งมักจะเกิดกับแท่งวัสดุแบนและบาง หรือระนาบเลื่อนไหลของอะตอมหลายระนาบ

3) รอยขาดแบบผสม [18]

รอยขาดแบบผสมเป็นรูปแบบชิ้นทดสอบระหว่างแบบขวางตรงและแบบเฉียง ส่วนใหญ่มักจะเกิดกับชิ้นทดสอบเหล็กกล้าภาคตัดขวางกลม เมื่อถึงจุดรับความเค้นสูงสุด (R_m) จากนั้นก็เกิดการคอดเล็กลงของภาคตัดขวาง ทำให้แนวปฏิบัติของแรงหักเหเข้าไปข้างในมีผลให้เกิดโซนรอยขาดในเวลาต่อมาที่เกิดจากความเค้นดึงกระทำในแนวรัศมีออกมาด้านนอก (ระบบความเค้นหลายแกน) ซึ่งจะหน่วงเหนี่ยวการครากตัวที่ควรจะเกิดขึ้น

จากผลการสืบเนื่องนี้แกนของชิ้นทดสอบจะแตกหักแบบขวาง (Brittle Fracture) ในผิวของหลุมส่วนบริเวณขอบเกิดการเฉือนทำมุม 45 องศา [18]

2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ความแข็งเป็นความต้านทานต่อการผิดรูปอย่างถาวรของวัสดุ วัสดุที่มีความแข็งสูงก็จะให้ความแข็งแรงสูงตามไปด้วย ดังนั้นการวัดความแข็งเป็นวิธีที่สะดวก และประหยัดในการที่จะทราบค่า Ultimate tensile strength ของวัสดุนั้นๆ ดังตารางที่ 2.1

เทคนิคของการวัดค่าความแข็งแบ่งได้ 4 แบบ ได้แก่

1. Brine Hardness Test
2. Rockwell and Superficial Rockwel
3. Vickers Microharness Test
4. Knoop Microhardness Test

โดยมีหลักการที่เหมือนกันคือ เครื่องวัดความแข็งจะมีหัวกด (Indenter) ที่มีรูปร่างทรงกลมหรือพีระมิดสำหรับกดลงบนพื้นผิววัสดุด้วยแรงขนาดต่างๆ ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกดขนาดต่างๆ กันด้วย จากนั้นจะทำการวัดขนาดรอยกดเพื่อนำมาคำนวณความแข็ง

2.6.1 การวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) [18]

ใช้สัญลักษณ์ HBN หรือ HB หัวกดที่ใช้จะเป็นเหล็กกล้าชุบแข็งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมีความแข็ง 850 HV10-1500 HV10 จะสามารถวัดความแข็งของโลหะที่มีความแข็งไม่เกิน 300-650 HB แรงที่ใช้สามารถเลือกได้จาก 500, 1500 และ 3000 kgf ความแข็งตามบริเนลสามารถหาได้จาก

HB = แรงทดสอบ / พื้นที่ของรอยกด (2.13)

ผิวงานที่จะทดสอบต้องเรียบปราศจากวัสดุหล่อลื่น ออกไซด์ และเหมาะกับวัสดุที่อ่อนเหนียว ความหนาของชิ้นงานต้องมีขนาดอย่างน้อย 8 เท่าของความหนารอยกด เวลาที่ใช้ในการทดสอบอยู่ระหว่าง 15-25 วินาที หลังจากนั้นจึงวัดขนาดของรอยกดและเทียบค่าความแข็งได้จากตารางเทียบความแข็ง [18]

2.6.2 การวัดความแข็งแบบรอคเวลล์ (Rockwell Hardness Test) [18]

ในการปฏิบัติการทางวัสดุศาสตร์นี้เราจะใช้การวัดความแข็งแบบ Rockwell หัวกดที่ใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ

1. Diamond Cone 120 องศา (เพชรทรงกรวย) ใช้กับโลหะแข็ง

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

2.6.3 การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) [18]

จะใช้หัวกดที่ทำจากเพชรรูปทรงพีระมิด (Square-Based Diamond Pyramid) ที่มีมุม 136 องศา ระหว่างด้านของหน้าเพชร ดังรูปที่ 2.24 แรงที่ใช้กดทั่วๆ ไปจะนิยมเลือกใช้ระหว่าง 2 - 1,000 นิวตัน ทั้งนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาทดสอบ ค่าความแข็งจะหาได้จากอัตราส่วนของแรงที่ใช้ในการกดต่อพื้นที่ของขนาดรอยกดมีหน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร (mm^2) โดยหาได้จากเส้นทแยงมุมของรอยกดแล้วแทนค่าลงในสมการ ดังต่อไปนี้

$$HV = \frac{1.854F}{d^2} \quad \text{มีหน่วยเป็น } Kg/mm^2 \qquad (2.14)$$

โดย F = Applied load, (Kg)

D = Diagonal length of square-impression, (mm)

เงื่อนไขในการทดสอบความแข็งแบบ Vickers

1. ผิวชิ้นทดสอบจะต้องเรียบ ปราศจากออกไซด์ วัสดุชนิดอื่นๆ เช่น สารหล่อลื่นทุกชนิด

2. ความหนาของชิ้นทดสอบจะต้องเพียงพอที่ไม่ให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นทดสอบ กำหนดให้ความหนาต่ำสุด เท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นทแยงมุมรอยกด d

3. ตามเกณฑ์จะทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง 10 หรือ 35 องศาเซลเซียส

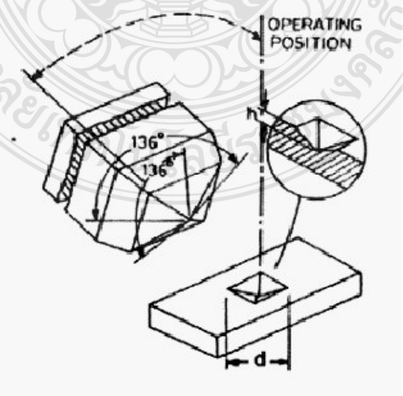
4. ระยะห่างระหว่างรอยกด ให้ถือเกณฑ์ดังนี้

5. เหล็กกล้า ทองแดง และทองเหลือง อย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

6.โลหะเบา เช่น ดีบุก ตะกั่ว อย่างน้อยที่สุด 6 เท่าของความยาวเฉลี่ยเส้นทแยงมุมรอยกด

Micro Hardness Test เป็นการวัดความแข็งในระดับจุลภาค รอยกดและการวัดค่าความแข็งจะมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ มีบริเวณที่จะวัดความแข็งน้อย เช่น เกรนของเหล็กเป็นต้น และจะต้องมีการเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานให้เรียบ [18]

หน่วยที่ใช้วัด คือ VICKERS (HV) หรือ Diamond Pyramid Hardness เนื่องจากหัวกดเป็นเพชรรูปทรงพีระมิด ทำมุม 136 องศา ใช้แรงกดตั้งแต่ 2 – 1,000 นิวตัน โดยใช้เวลาในการกด 10 - 15 วินาที และรอยกดจะมีรูปร่างเป็นสีเหลี่ยมจัตุรัส [18] ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 หัวกดรูปทรงพีระมิดและรอยกด [18]

$$HV = \frac{\text{แรงทดสอบ (F)}}{\text{พื้นที่รอยกดบนผิวทดสอบ (S)}} \tag{2.15}$$

$$\text{พื้นที่ผิวรอยกดรูปพีระมิด S} = \frac{d^2 \sin(\alpha/2)}{2} \tag{2.16}$$

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

$$HV = \frac{0.102 \times 2F\sin(136°/2)}{d^2} \tag{2.17}$$

$$= \frac{0.1891F}{d^2} \ \text{N/mm}^2 \tag{2.18}$$

เมื่อ F = Test Force (N)

d = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของรอยกด (mm) = $(d_1 + d_2)/2$ [15]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ช่วงชัย ชุปวา และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์

ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานนั้นมีตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม งานทดลองนี้ได้นำเสนอถึงอิทธิพลของเวลาในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กเพลาขาว AISI 1015 หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยมีชิ้นงานทดลองทั้งสิ้น 2,304 ชิ้น ทำการทดลองภายใต้เวลาในการเสียดทาน 4 ค่า คือ 6, 8, 10 และ 12 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 3 ค่าคือ 103, 206, 309 MPa ความเร็วรอบในการเสียดทาน 4 ค่าคือ 1,100, 1,200, 1,300 และ 1,400 รอบต่อนาที เวลาในการอัด 4 ค่าคือ 1, 2, 3, และ 4 วินาที และแรงดันในการการอัด 4 ค่าคือ 309, 412, 516, และ 619 MPa จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบ ในการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์อิทธิพลเวลาในการเสียดทานเท่านั้น ซึ่งได้ข้อสรุปว่า เมื่อเวลาในการเสียดทานเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของรอยเชื่อมจะมีแนวโน้มลดลง [1]

2.7.2 Mumin Sahin , H.Erol Akta and Turgut Gulmez

ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า AISI 1040 โดยผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทาน การศึกษาทฤษฎีและตัวแปรที่กำหนด เพื่อให้ได้วิธีการเชื่อมที่เหมาะสมต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การเชื่อมเสียดทานเป็นทางเลือกของการผลิตวิธีหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมานานหลายปี ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดวัสดุเป็นเหล็กกล้า AISI 1040 เวลาในการเสียดทาน 5 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 30 MPa ใช้เวลาในการอัดที่ 20 วินาที และใช้แรงดันในการอัด 110 MPa โดยให้เวลาในการอัดและแรงดันในการอัดเป็นค่าคงที่ ชิ้นงานทั้งสองเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรเท่ากัน หลังจากที่ได้ทดลองเชื่อมตามตัวแปรที่กำหนดแล้ว ประการแรกขนาดชิ้นงานที่เท่ากันเมื่อผ่านการเชื่อมแล้ว ชิ้นงานใดจะให้ค่าพารามิเตอร์ที่สูงสุด ประการที่สองผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม โดยการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) การทดสอบความล้าตัว (Fatigue Test) การทดสอบแรงกระแทก (Notch – Impact test) และการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ผลที่ได้คือ 95% ของค่าการทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานเชื่อมเสียดทานเหล็ก AISI 1040 มีค่าเท่ากับค่ามาตรฐานความต้านทานแรงดึงของเหล็ก AISI 1040 เช่นเดียวกับการทดสอบความล้าตัวและการทดสอบแรงกระแทก ผลการทดสอบจะมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานของเหล็กกล้า AISI 1040 ค่าความแข็งในแนวนอนมีค่าสูงสุดที่บริเวณรอยเชื่อม ค่าความแข็งสูงสุดตามแนวตั้งบริเวณรอยเชื่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะเกรนมีขนาดเล็กลง [2]

2.7.3 Mumin Sahin

การเชื่อมโลหะด้วยแรงเสียดทาน เป็นกระบวนการที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยุคปัจจุบัน มีความร้อนเกิดขึ้นจากการเชื่อมเสียดทาน โดยการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อนที่บริเวณพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นงานในขณะที่หมุนภายใต้แรงดัน โดยทั่วไปการเชื่อมเสียดทานนี้สามารถทำได้โดยง่าย โดยนำวัสดุที่มีภาคตัดขวางเป็นวงกลม หรือไม่ใช่วงกลมก็ตามมาต่อกัน เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน ความดันที่ใช้ในการเสียดทาน เวลาที่ใช้ในการหลอม แรงดันที่ใช้ในการหลอม และความเร็วที่ใช้ในการหมุน ล้วนเป็นพารามิเตอร์ที่น่าสนใจที่สุดในกระบวนการเชื่อมเสียดทานนี้ ประโยชน์ที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานคือ ช่วยลดวัสดุที่ต้องใช้ ลดเวลาในการผลิต และใช้พลังงานในการผลิตต่ำ ในการศึกษาทดลองนี้มีจุดประสงค์ เพื่อสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถแสดงภาพจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเชื่อมเสียดทาน ในบริเวณรอยต่อชน ทั้งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เท่ากัน และไม่เท่ากันของเหล็กผสมคาร์บอน AISI 1040 ในบทความนี้ ประกอบไปด้วย ผลของการทดสอบโปรแกรมดังกล่าว ว่ามีการทำงานที่ผิดปกติอย่างไรบ้าง และตัวอย่างภาพจำลอง 3 มิติ อีกทั้งยังได้มีการนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันอีกด้วย [3]

2.7.4 สุรสิงห์ อารยางค์กูร และคณะ

เครื่องเชื่อมเสียดทานต้นแบบต้องสามารถเชื่อมชิ้นงานที่เป็นเหล็กกลมชนิด AISI 1015 ได้ และต้องทำงานได้อย่างต่อเนื่องในช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆ จากการศึกษาวิจัยและพัฒนาเครื่องเชื่อมต้นแบบ พบว่าเครื่องเชื่อมต้นแบบสามารถทำงานและเชื่อมต่อชิ้นงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆที่เครื่องเชื่อมเสียดทานต้นแบบทำได้ คือ 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) ในส่วนของการวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมเสียดทานนั้นพบว่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อมต่อมีค่าความแข็งลดต่ำลง ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมทำให้เปอร์เซ็นต์ของเพิร์ลไลต์ลดลง ในส่วนของความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค พบว่าบริเวณแนวเชื่อมต่อมีเกรนของเหล็กที่ละเอียดมากกว่าบริเวณอื่นที่ไม่ได้รับผลกระทบจากเชื่อม ส่งผลให้บริเวณแนวเชื่อมต่อมีความแข็งแรงมากขึ้น [4]

2.7.5 Sare Celik and Ismail Ersozlu

การเชื่อมต่อโลหะวัสดุต่างชนิดกันมีความจำเป็นต่อภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตที่มีการเชื่อมต่อโลหะผสมและเหล็กกล้าคาร์บอนเข้าด้วยกัน เพราะสามารถลดต้นทุนทางด้านวัตถุดิบได้ ในการศึกษานี้เป็นการเชื่อมต่อโลหะผสมต่ำ AISI 4140 กับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 เข้าด้วยกันโดยวิธีการเชื่อมเสียดทาน ผลที่ได้สามารถเชื่อมต่อกันได้เป็นผลสำเร็จ และได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างมหาภาค การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังการเชื่อม การทดสอบความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน นอกจากนั้นยังทำการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างทำการเชื่อมที่บริเวณรอยเชื่อม จากการทดลอง การต่อโลหะผสมต่ำ AISI 4140 และเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 สามารถเชื่อมต่อกันได้เป็นผลสำเร็จ โดยวิธีการเชื่อมเสียดทาน ผลที่ได้คืออุณหภูมิภายใน 2 วินาทีแรกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณรอยเชื่อม ต่อมาเริ่มให้แรงดันทำให้เกิดครีบรอบๆ แนวเชื่อม ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้าลง เงื่อนไขการเชื่อมที่ดีที่สุดในการเชื่อมต่อโลหะผสมต่ำ AISI 4140 และเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 โดยวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทานในการศึกษาทดลองนี้ คือ ที่ความเร็วรอบที่ 3,000 รอบต่อนาที ความดันในการเสียดทาน 81 MPa เวลา

ในการเสียดทาน 6 วินาที ความดันในการอัด 162 MPa และเวลาในการเชื่อม 14 วินาที ตามลำดับ จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานเชื่อมที่ได้เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 สูงกว่าอยู่ 6% และค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุดของชิ้นงานเชื่อมที่ได้เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1050 ต่ำกว่าอยู่ 1.9% [5]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม มีผลต่อโครงสร้างมหาภาคและจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม จากการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพบว่า อุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อน เวลาในการอัด และแรงดันในการอัด มีอิทธิพลต่อความแข็ง ความแข็งแรง และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมเสียดทาน

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนปลานกลางมาตรฐาน AISI 1045 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรและมีขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร

3.1.2 เครื่องเลื่อยกล

3.1.3 เครื่องเชื่อมเสียดทาน

1. ชุดปั้มน้ำมันไฮดรอลิค
2. กระบอกไฮดรอลิค
3. หัวจับชิ้นงาน 3 ฟันจับ ชนิดฟันพร้อม
4. ถังเก็บน้ำมันไฮดรอลิค
5. ชุดควบคุมแรงดันน้ำมันไฮดรอลิค

3.1.4 เตาอบชุบ

3.1.5 เครื่องกลึง CNC (Turning Center)

3.1.6 เครื่องตัดชิ้นงานตัวอย่าง (Cutting Machine)

3.1.7 เครื่องหล่อตัวเรือนชิ้นงาน (Mounting Press)

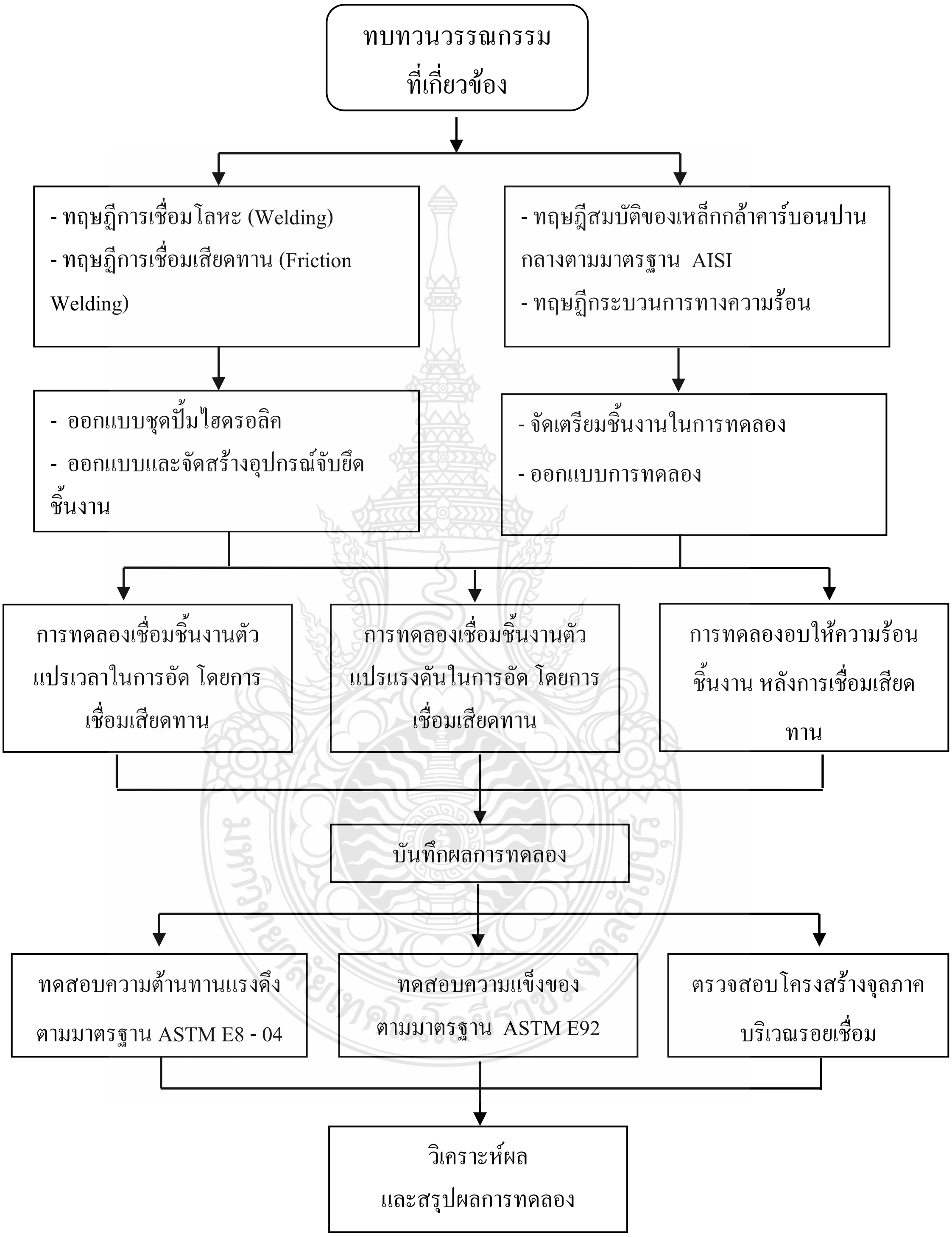
3.1.8 เครื่องขัดชิ้นงานตัวอย่าง (Grinding Machine)

3.1.9 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Universal Testing Machine Dual Column)

3.1.10 เครื่องทดสอบความแข็ง (Vickers Microhardness Test)

3.1.11 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการดำเนินงานวิจัยโดยรวม

ในการทดลองนี้วัสดุที่เลือกใช้คือเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางตามมาตรฐาน AISI 1045 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 วัสดุมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ทำการตัดแบ่งด้วยเครื่องเลื่อยกลให้มีขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2 และทำการกลึงปาดผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบหนึ่งด้านทุกชิ้น

รูปที่ 3.2 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรและยาว 100 มิลลิเมตร

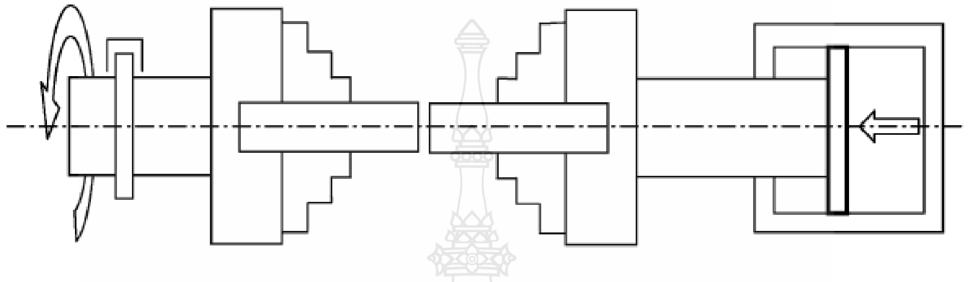
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางตามมาตรฐาน AISI 1045

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน									
เกรดเหล็ก				ส่วนผสมหลัก (Wt.%)					
DIN มาตรฐาน เยอรมัน	JIS มาตรฐาน ญี่ปุ่น	AISI มาตรฐาน สหรัฐอเมริกา	ชื่อเรียก ทางการค้า	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Fe %
CK45	S45C	1045	เหล็กเหนียว	0.47	0.28	0.56	0.031	0.045	98.53

3.2 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

ในการทดลองได้ใช้หลักการเชื่อมเสียดทาน โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแรงเสียดทานให้เป็นพลังงานความร้อนเพื่อให้ชิ้นงานสองชิ้นผสานติดกัน โดยในการเชื่อมจะจับยึดชิ้นงานด้านหนึ่งไม่ให้หมุน และชิ้นงานอีกด้านจะหมุนด้วยความเร็วรอบตามตัวแปรที่กำหนดไว้ จากนั้นเพิ่มแรงดันตามตัวแปรที่กำหนดให้กับชิ้นงานฝั่งที่ไม่หมุนให้เกิดแรงเสียดทานกับชิ้นงานฝั่งที่กำลังหมุน โดยใช้เวลาในการเสียดทาน 4 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa จนเกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณเสียดทาน อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เนื้อวัสดุบริเวณเสียดทานอ่อนตัวก่อนที่จะให้แรงดันในการอัดอัดชิ้นงานฝั่งที่ไม่หมุนมีชุดกระบอกไฮดรอลิคประกอบอยู่ให้เคลื่อนที่เข้าหาฝั่งชิ้นงานที่กำลังหมุนเพื่อให้เกิดการ

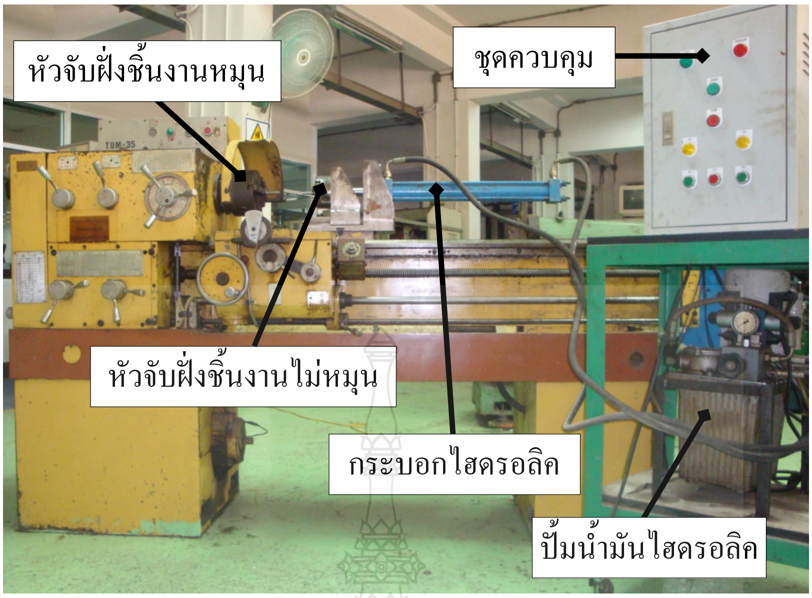
เชื่อมประสานยึดติดกันขึ้น ขณะที่กำลังให้แรงดันในการอัดต้องจับเวลาในการอัดตามตัวแปรที่กำหนดเพื่อควบคุมเวลาในการอัดแช่ชิ้นงานเชื่อมด้วย เมื่อหมดเวลาในการอัดแล้วและชิ้นงานทั้งสองชิ้นประสานยึดติดกันแล้วให้หยุดความเร็วในการหมุนทันที และปล่อยชิ้นงานให้เย็นตัวก่อนนำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึด ดังรูปที่ 3.3



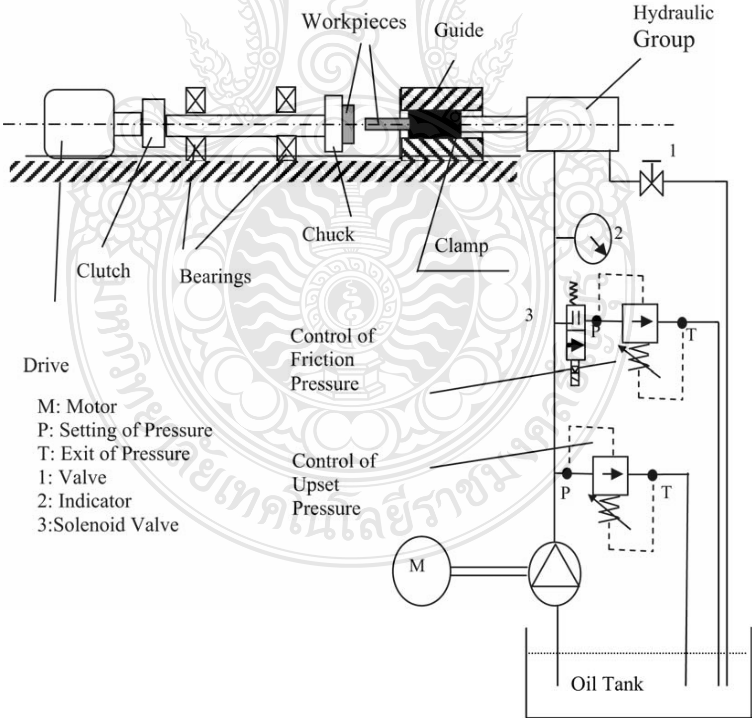
รูปที่ 3.3 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานและวิธีการเชื่อมเสียดทาน [3]

3.2.1 เครื่องเชื่อมเสียดทาน

ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้เครื่องกลึงยันศูนย์เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทาน ทำการออกแบบหัวจับชิ้นงานและระบบเพิ่มแรงดันในการอัดชิ้นงานฝั่งที่ไม่หมุนโดยการนำชุดระบบไฮดรอลิคเข้ามาติดตั้งเพื่อช่วยเพิ่มแรงดันในการเสียดทานและแรงดันในการอัด และได้ทำการติดตั้งกระบอกไฮดรอลิคไว้แทนที่ศูนย์ท้ายแท่นเพื่อช่วยเพิ่มแรงดันให้กับชิ้นงานฝั่งที่ไม่หมุนให้เกิดแรงเสียดทานจนชิ้นงานทั้งสองยึดติดกันได้ มีวงจรควบคุมการทำงานของชุดระบบไฮดรอลิคดังรูปที่ 3.5 โดยได้จัดสร้างขึ้นให้สอดคล้องกับตัวแปรในการทดลอง ในการนำเครื่องกลึงยันศูนย์มาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทานดังรูปที่ 3.4 นอกจากจะสามารถกำหนดความเร็วรอบในการหมุนได้แล้ว การหยุดชิ้นงานในทันทีทันใดก็มีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง ต้องอาศัยเครื่องกลึงที่ใช้มอเตอร์ชนิดมีเบรคแบบระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Brakes Motor) ทำให้หยุดหัวจับได้โดยทันที หากไม่ทำการหยุดหัวจับโดยทันทีแรงเฉื่อยของหัวจับจะทำให้ชิ้นงานที่ผสานเชื่อมติดกันแล้วนั้นบิดหรือหลุดออกจากกันในที่สุด



รูปที่ 3.4 เครื่องเชื่อมเสียดทานที่ใช้ในการทดลอง



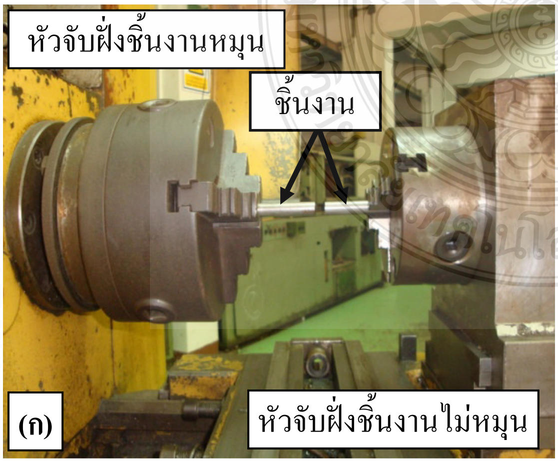
รูปที่ 3.5 วงจรการทำงานของระบบไฮดรอลิค [3]

3.2.2 กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลชิ้นงานเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ก่อนที่จะนำชิ้นงานที่ตัดได้ความยาว 100 มิลลิเมตร ไปทำการอบให้ความร้อนตามกระบวนการทางความร้อนต้องนำชิ้นงานไปทำการกลึงปาดผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบก่อนนำไปทำการเชื่อมเสียดทานตามตัวแปรที่กำหนดดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียส
2. เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที
3. แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa
4. เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4 วินาที
5. แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa
6. ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที

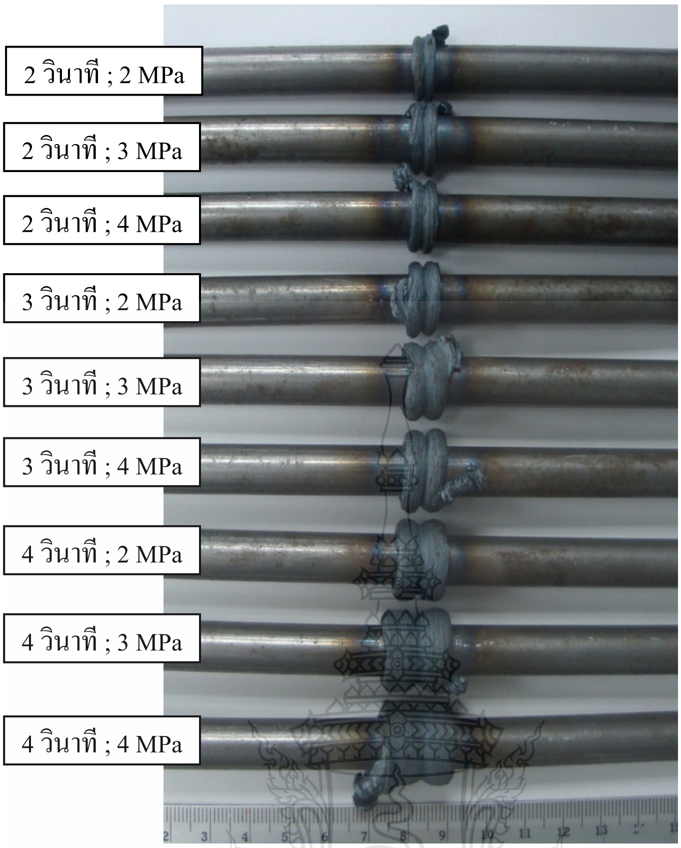
นำชิ้นงานที่ผ่านการกลึงปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วไปทำการเชื่อมเสียดทานทีละตัวแปร โดยจับยึดชิ้นงานไว้บนหัวจับทั้งสองด้านบนเครื่องเชื่อมเสียดทาน โดยให้ด้านที่กลึงปาดหน้าเรียบไว้แล้วนั้นหันเข้าหากัน ดังรูปที่ 3.6 (ก) จากนั้นทำการเชื่อมเสียดทานตามที่กำหนดไว้ เมื่อทำการเชื่อมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 3.6 (ข) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศแล้วจึงนำออกจากอุปกรณ์จับยึด จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการวัดความกว้างรอยเชื่อม ดังรูปที่ 3.8 (ก) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อม ดังรูปที่ 3.8 (ข) ด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ [5] แล้วทำการบันทึกค่าการวัดเพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยขนาดความกว้างรอยเชื่อมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอย



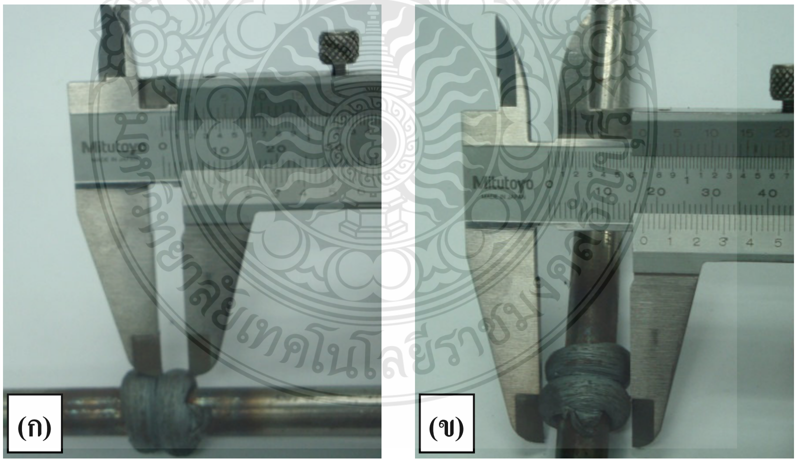
(ก) การจับยึดชิ้นงานบนเครื่องเชื่อมเสียดทานก่อนทำการเชื่อม

(ข) ชิ้นงานเมื่อเชื่อมเสร็จ

รูปที่ 3.6 การจับยึดชิ้นงานบนเครื่องเชื่อมเสียดทานและชิ้นงานเมื่อเชื่อมเสร็จ



รูปที่ 3.7 ลักษณะชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานตามตัวแปรที่กำหนด



(ก) การวัดขนาดความกว้างรอยเชื่อมด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์

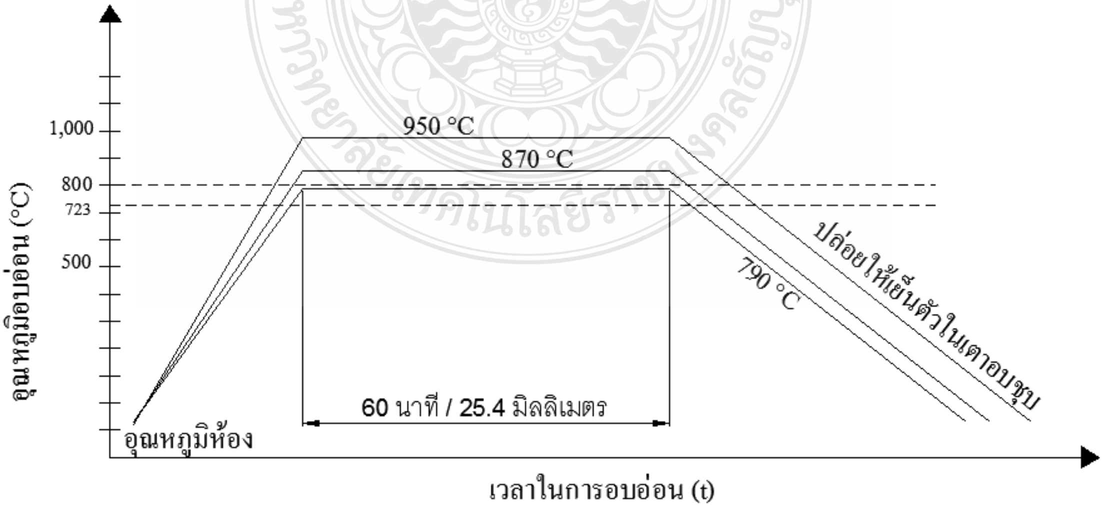
(ข) การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อมด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์

รูปที่ 3.8 การตรวจสอบทางกายภาพรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

3.2.2 กระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทาน

ลักษณะชิ้นงานเชื่อมเสียดทาน ดังรูปที่ 3.7 เมื่อปล่อยให้ชิ้นงานเชื่อมเสียดทานเย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้องแล้ว ทำการวัดขนาดความกว้างรอยเชื่อมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเสร็จสิ้น นำชิ้นงานเชื่อมทั้ง 9 ตัวแปรไปทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียสในเตาอบชุบ ดังรูปที่ 3.9โดยแบ่งออกเป็นตัวแปรละ 15 ชิ้นการทดลองรวมทั้งหมด 135 ชิ้นทดลอง แบ่งชิ้นงานเชื่อมทำการอบให้ความร้อนอุณหภูมิละ 45 ชิ้นทดลอง โดยตั้งค่าความสัมพันธ์เวลาและอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.10 หลังจากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาอบชุบเพื่อให้รอยเชื่อมมีความอ่อนตัว

รูปที่ 3.9 เตาอบชุบชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทาน

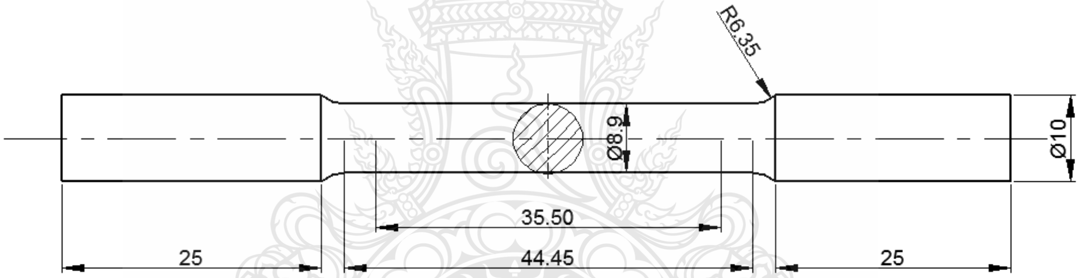


รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมความสัมพันธ์เวลาและอุณหภูมิในการอบให้ความร้อน

การอบให้ความร้อนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ 0.45 เปอร์เซ็นต์ มีอุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่เส้น A3 อยู่ที่ 800 องศาเซลเซียส การอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียสเป็นการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิอยู่ภายใต้เส้น A3 และการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 และ 950 องศาเซลเซียสเป็นการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิอยู่เหนือเส้น A3 เวลาในการอบแช่ชิ้นงานภายในเตาอบชุบจะอยู่ที่ 1 ชั่วโมงต่อความหนาชิ้นงาน 25.4 มิลลิเมตร และอัตราการเย็นตัวจะอยู่ในช่วงระหว่าง 55-100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงภายในเตาอบชุบ [21]

3.2.3 การทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

หลังจากที่ชิ้นงานถูกปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบชุบจนอุณหภูมิลดต่ำลงถึงอุณหภูมิห้องแล้ว นำชิ้นงานบางส่วนไปทำการกลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องกลึง CNC เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 - 04 [6] ดังรูปที่ 3.11 หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบแรงดึงไปทำการดึงทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านแรงดึง ดังรูปที่ 3.13 และทำการบันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 3.11 การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 – 04 [6]

รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 - 04 [17] ผ่านการกลึงขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึง CNC

รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงที่ใช้ในการทดลอง

นำชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนตัวแปรละ 5 ชิ้นมาทำการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.14 ให้ได้ความยาวประมาณ 25 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้รอยเชื่อมอยู่กึ่งกลางแนวตัดทั้งสอง เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็ง Microhardness Tests ตามมาตรฐาน ASTM E92 [7] และชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างหมาภาคและโครงสร้างจุลภาคบริเวณตำแหน่งศูนย์กลางของชิ้นงานโดยกำหนดให้จุดศูนย์กลางของชิ้นงานเป็นจุด 0,0 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดแล้วมาทำการหล่อตัวเรือนด้วยเครื่องหล่อตัวเรือนชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.15 เมื่อทำการหล่อตัวเรือนชิ้นงานเสร็จแล้วนำชิ้นงานมาขัดผิวด้วยเครื่องขัดผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.16 โดยทำการขัดไล่เบอร์กระดาษทรายเรียงตามความหยาบมากไปจนถึงละเอียดมากใช้กระดาษทรายเบอร์ 100, 200, 320, 400, 600, 800, 1,000, 1,200 และผ้าสักราด ตามลำดับ

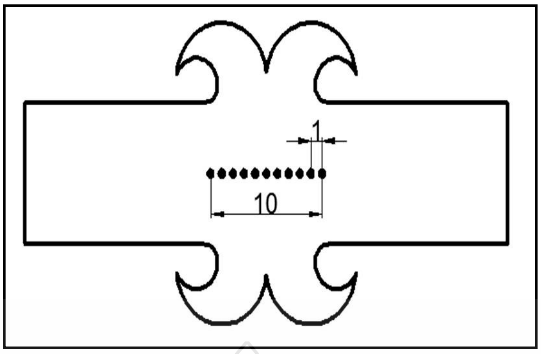
รูปที่ 3.14 เครื่องตัดชิ้นงานตัวอย่าง

รูปที่ 3.15 เครื่องหล่อตัวเรือนชิ้นงาน

รูปที่ 3.16 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน

รูปที่ 3.17 ชิ้นงานที่ได้หลังจากการหล่อและขัดผิว

เมื่อได้ชิ้นงานหลังจากการขัดผิวด้วยกระดาษทรายละเอียดแล้ว แบ่งชิ้นงานตามตัวแปรละ 3 ชิ้น ไปทำการทดสอบความแข็ง Microhardness Tests ตามมาตรฐาน ASTM E92 [7] ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง Vickers Microhardness Tests ดังรูปที่ 3.19 โดยตำแหน่งการกดทดสอบความแข็งจะอยู่กึ่งกลางชิ้นงานบริเวณรอยเชื่อมทำการกดทดสอบในแนวนอน (Horizontal) ตัดขวางรอยเชื่อม ดังรูปที่ 3.18 และนำชิ้นงานตามตัวแปรที่ทำการหล่อตัวเรือนแล้วที่เหลือสองชิ้นมาทำการขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดและผ้าสักราดเพิ่มเติมอีกครั้ง แล้วนำไปกัดกรด เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหาภาคและโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 3.18 ตำแหน่งกดทดสอบความแข็งตามแนวนอน (Horizontal)

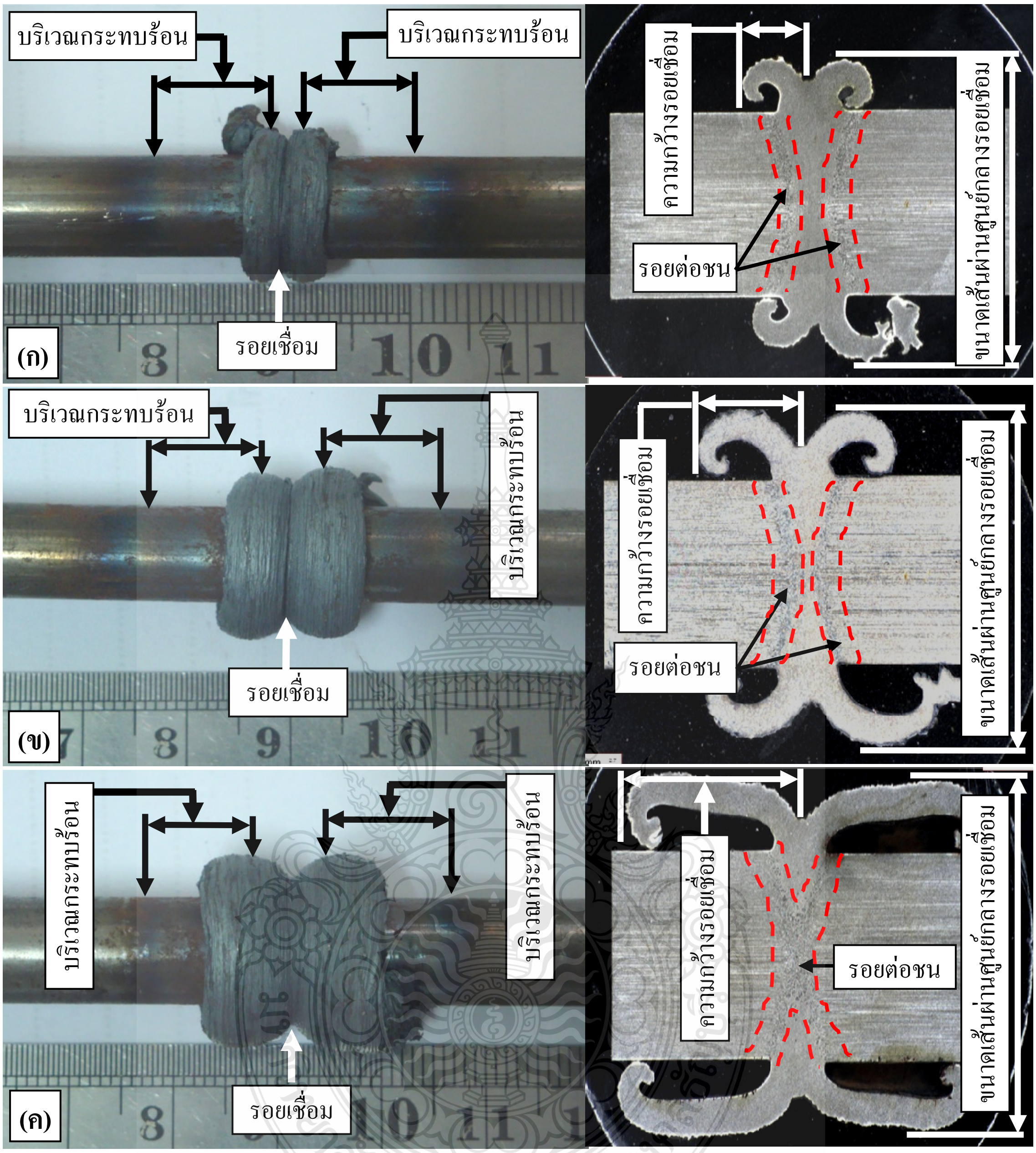
รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบความแข็ง Vickers Microhardness Tests

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีผลต่อความแข็งแรง ความแข็ง โครงสร้างมหาภาคและโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม ในส่วนของบทนี้เป็นการนำเสนอผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบ โดยมีค่าตัวแปรในการทดลองดังนี้

1. อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียส
2. เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที
3. แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa
4. เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4 วินาที
5. แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa
6. ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที

ผลการทดลองที่ได้ตามค่าตัวแปรที่กำหนดเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทาน จากที่ได้ทำการเชื่อมแล้วได้ตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมด้วยตาเปล่า พร้อมกับได้ทำการวัดขนาดความกว้างของรอยเชื่อม (Flash Width) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม (Flash Diameter) [5] ด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ทีละตัวแปร ลักษณะและบริเวณตำแหน่งการวัดขนาดความกว้างรอยเชื่อมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม ดังรูปที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยขนาดความกว้างรอยเชื่อมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมทุกตัวแปรได้แสดงเปรียบเทียบไว้ในแผนภูมิ เมื่อทำการวัดขนาดเสร็จหลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกลด้วยการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) และตรวจสอบโครงสร้างมหาภาค (Macrostructure) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของชิ้นงานบริเวณรอยเชื่อม และนำผลมาเปรียบเทียบเพื่อทำการวิเคราะห์ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

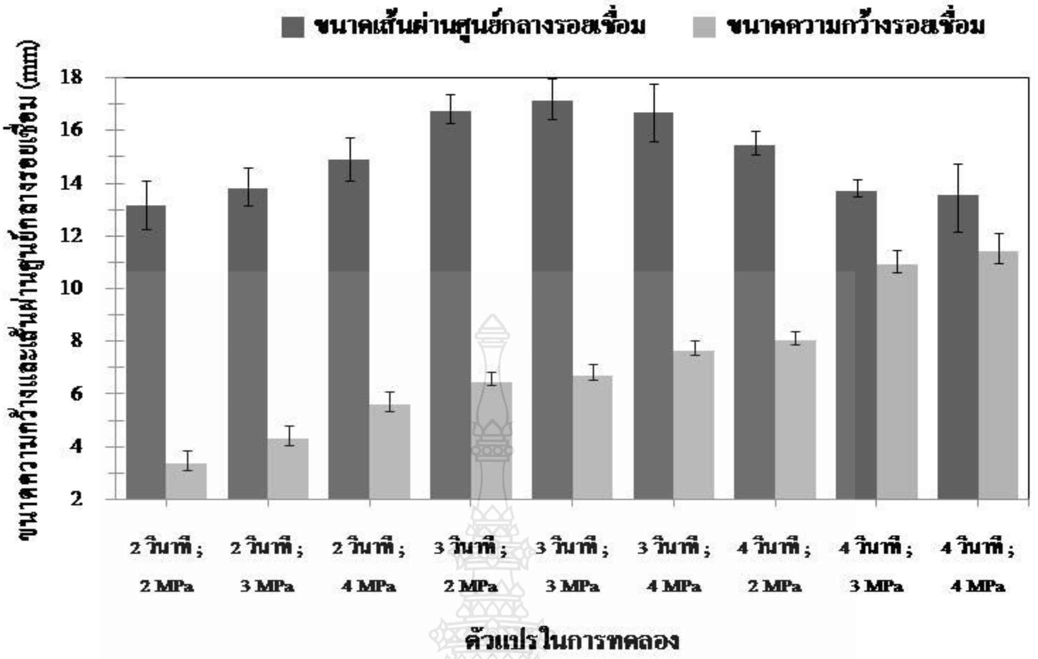


(ก) เวลาในการอัด 2 วินาที ; แรงดันในการอัด 2 MPa

(ข) เวลาในการอัด 3 วินาที ; แรงดันในการอัด 3 MPa

(ค) เวลาในการอัด 4 วินาที ; แรงดันในการอัด 4 MPa

รูปที่ 4.1 บริเวณกระทบร้อนชิ้นงานเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 และโครงสร้างมหาภาคของรอยต่อชน



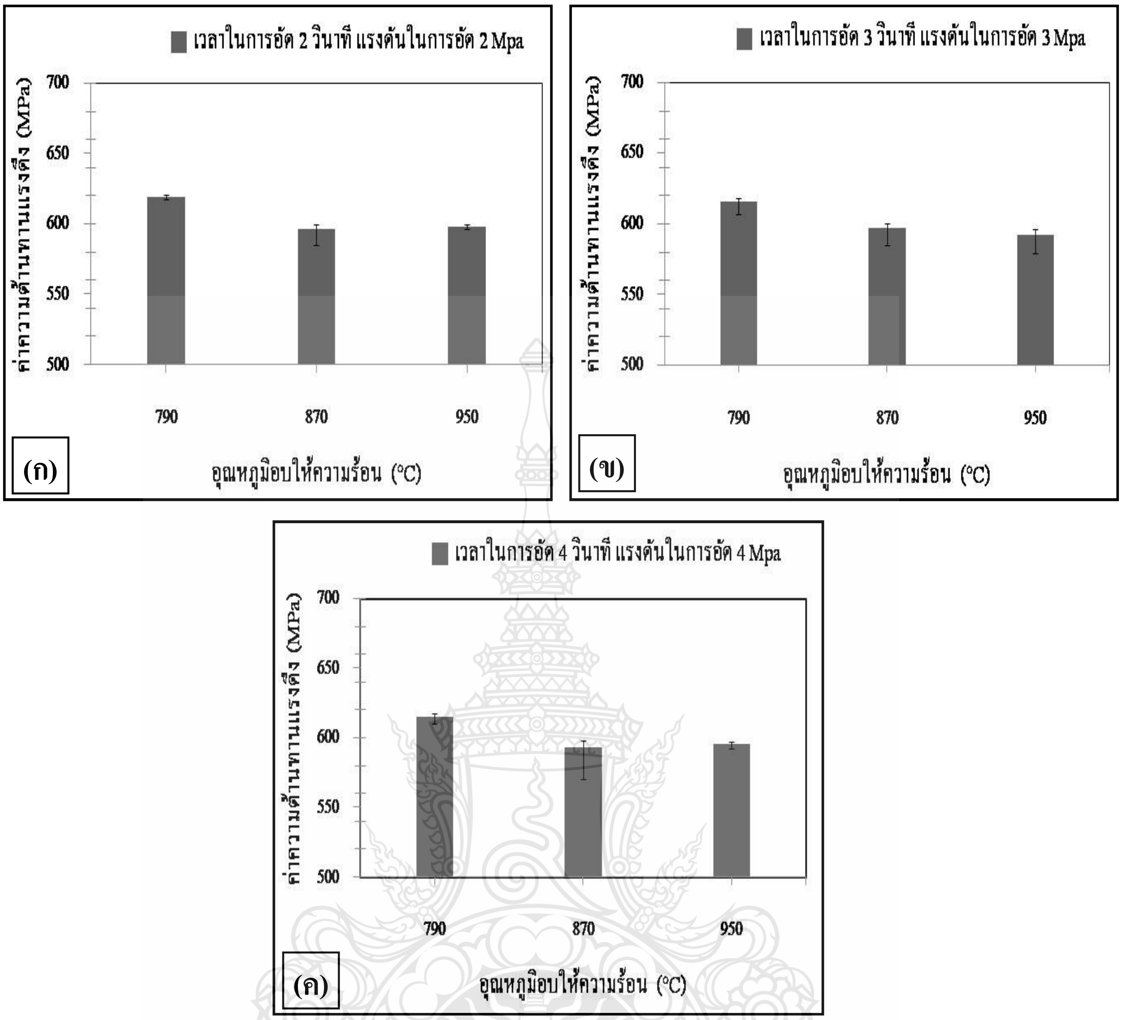
รูปที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยขนาดความกว้างรอยเชื่อมและค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อม

รูปที่ 4.1 บริเวณกระทบร้อนแพร่กระจายออกไปทั้งสองข้างรอยต่อชนของชิ้นงานเชื่อมและมีขนาดความกว้างของการแพร่กระจายใกล้เคียงกัน บริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะภายนอกเป็นร่องลึก เกิดจากครีบของรอยเชื่อมเมื่อเวลาและแรงดันในการอัดเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดความกว้างของรอยเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.1 (ก) (ข) และ (ค) เพื่อให้เห็นภาพขนาดความกว้างรอยเชื่อมได้อย่างชัดเจนจึงได้ยกตัวอย่างชิ้นงานทดลองเพื่อเปรียบเทียบกันดังนี้ ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa และชิ้นงานทดลองที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa ดังรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) ครีบของรอยเชื่อมมีลักษณะโค้งมีรัศมี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นอยู่กับแรงดันในการอัดที่เพิ่มขึ้น ต่างจากชิ้นงานทดลองที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa รูปที่ 4.1 (ค) ครีบของรอยเชื่อมมีลักษณะม้วนปลายและโค้งเหยียดออกคล้ายกับเส้นตรง จึงเป็นผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานทดลองที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa ซึ่งเกิดจากเนื้อวัสดุที่กำลังอ่อนตัวเนื่องจากผลของความร้อนในขณะเสียดทาน เมื่อได้รับแรงดันในการอัดที่เพิ่มขึ้นเนื้อวัสดุที่กำลังอ่อนตัวจึงเคลื่อนที่ออกสู่พื้นที่ว่างรอบนอกบริเวณรอบรอยต่อชนจนเกิดเป็นครีบของรอยเชื่อม เมื่อแรงดันในการอัดมากก็ยิ่งทำให้สามารถผลักเนื้อวัสดุที่กำลังอ่อนตัวอยู่ด้านในให้ออกมารอบนอกได้มากยิ่งขึ้นด้วย

รูปที่ 4.2 การวัดขนาดความกว้างรอยเชื่อม (Flash Width) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม (Flash Diameter) ด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ทีละตัวแปร ซึ่งค่าเฉลี่ยขนาดความกว้างรอยเชื่อมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมทุกตัวแปรได้แสดงเปรียบเทียบไว้ในกราฟ ดังรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าขนาดความกว้างของรอยเชื่อมที่มีค่าโดยเฉลี่ยน้อยสุดอยู่ที่ 3.35 มิลลิเมตรที่ตัวแปรเวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa และขนาดความกว้างของรอยเชื่อมที่มีค่าโดยเฉลี่ยมากสุดอยู่ที่ 11.41 มิลลิเมตรที่ตัวแปรเวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa ขนาดความกว้างรอยเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับเวลาและแรงดันในการอัดที่เพิ่มขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมมีลักษณะใหญ่ขึ้นและเล็กลงลักษณะกราฟคล้ายรูประฆังคว่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมมากที่สุดอยู่ที่ตัวแปรเวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 17.12 มิลลิเมตร อันเนื่องมาจากลักษณะการเกิดครีบของรอยเชื่อมดังได้อภิปรายไว้ ดังรูปที่ 4.1

4.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test)

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ดังตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้ เวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที และอุณหภูมิในอบให้ความร้อน 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเชื่อมเสียดทานเสร็จแล้วนำชิ้นงานไปทำการอบให้ความร้อน หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำการกลึงขึ้นรูปชิ้นทดสอบต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 – 04 [6] ชนิดเพลากลม จากนั้นนำไปทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงยืดออกเสมอ (ปราศจากการกระแทก) จนชิ้นงานขาดออกจากกัน ใช้ความเร็วในการยืดตัวต่ำ เพื่อไม่ให้ค่าที่ได้จากการทดสอบผิดพลาด ในที่นี้ได้นำเสนอผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงจำนวน 3 ค่าตัวแปรเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงได้อย่างชัดเจน ซึ่งได้ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงดังนี้



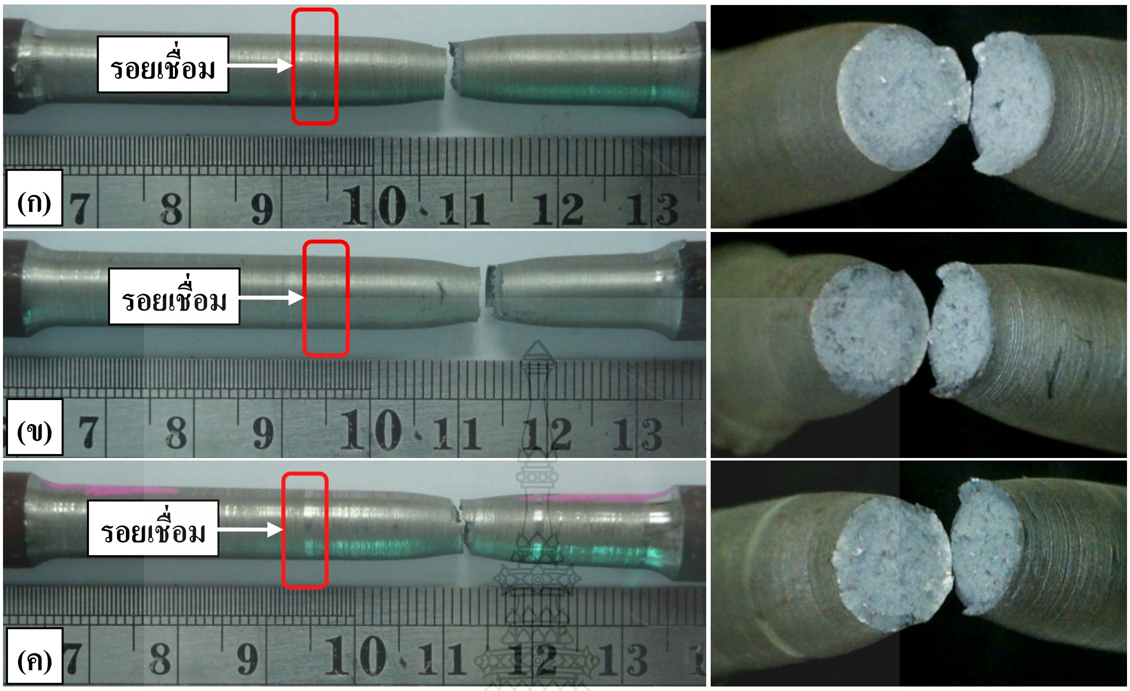
รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

รูปที่ 4.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 2 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.3 (ก) จากการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียสหลังการเชื่อมเสียดทานสามารถต้านทานแรงดึงได้ 619.52 MPa ชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียสสามารถต้านทานแรงดึงได้ 596.37 MPa และชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสสามารถต้านทานแรงดึงได้ 598.11 MPa

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 3 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.3 (ข) จากการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียสหลังการเชื่อมเสียดทานสามารถต้านทานแรงดึงได้ 615.40 MPa ชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียสสามารถต้านทานแรงดึงได้ 596.90 MPa และชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสสามารถต้านทานแรงดึงได้ 592.25 MPa

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 4 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.3 (ค) จากการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียสหลังการเชื่อมเสียดทานสามารถต้านทานแรงดึงได้ 615.54 MPa ชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียสสามารถต้านทานแรงดึงได้ 593.64 MPa และชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสสามารถต้านทานแรงดึงได้ 595.59 MPa

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.3 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าการอบให้ความร้อนชิ้นงานหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียสทำให้ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงสุดทั้งสามตัวแปรการเชื่อม และชิ้นงานตัวแปรที่การอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 870 และ 950 องศาเซลเซียสผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าผลการทดสอบของชิ้นงานตัวแปรที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส



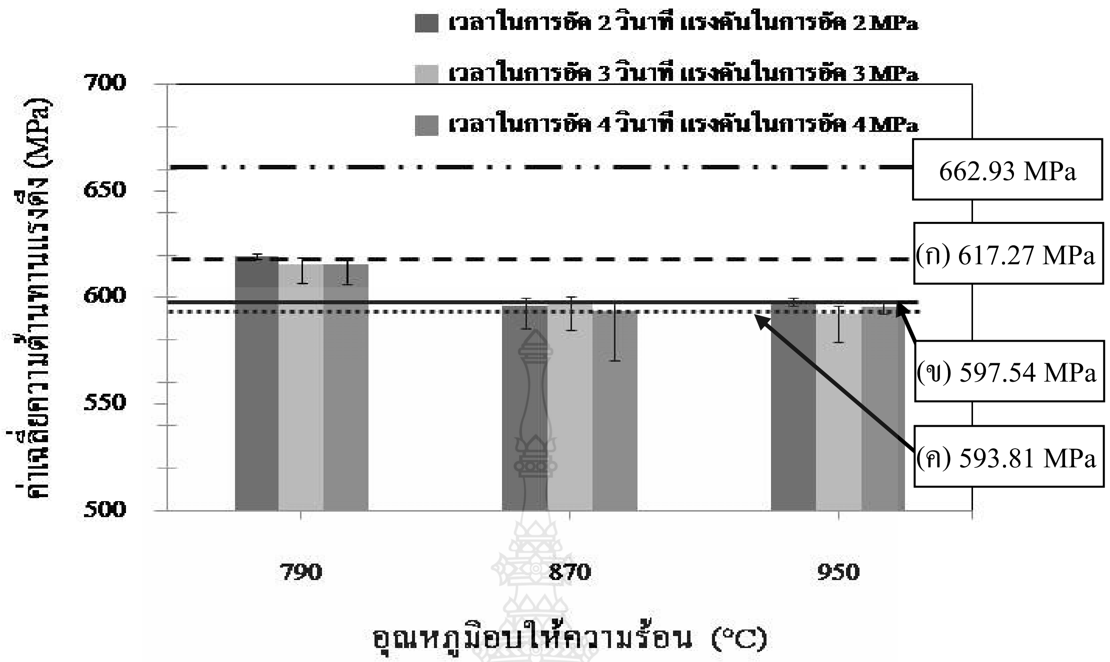
(ก) ชิ้นงานอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส

(ข) ชิ้นงานอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส

(ค) ชิ้นงานอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.4 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง

รูปที่ 4.4 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึงที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียสหลังการเชื่อมเสียดทาน มีลักษณะเกิดเป็นคอคอดบริเวณจุดแตกหัก มีครีบเกิดขึ้นบริเวณขอบรอยแตกหักบางส่วน จากการแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการอบให้ความร้อนทั้งสามอุณหภูมิทำให้ทราบว่ารอยเชื่อมของทุกๆ ตัวแปรมีความแข็งแรงมากกว่าส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิม (Base Metal : BM) สังเกตได้จากตำแหน่งของรอยแตกหักจะอยู่นอกบริเวณรอยเชื่อมทุกชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึง ซึ่งรอยเชื่อมหรือรอยต่อชนจะอยู่กึ่งกลางของชิ้นทดสอบ การแตกหักจะแตกหักอยู่ในส่วนที่เป็นเนื้อเดิมของชิ้นงาน ลักษณะของการแตกหักเป็นการแตกหักแบบเหนียว มีลักษณะการแตกหักแบบถ้วยและโคน (Cup-and-Cone) ซึ่งจะเริ่มต้นจากการเกิดคอคอด จากนั้นจะเกิดรูหรือช่องว่างขนาดเล็ก บริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นที่กระทำกับชิ้นทดสอบที่บริเวณขอบเกรน และเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นช่องว่างขนาดเล็กจะขยายใหญ่ขึ้น รวมตัวกันเป็นช่องว่างขนาดใหญ่และลุกลามเพิ่มมากขึ้นจนฉีกขาดออกจากกันในที่สุด ดังรูปที่ 4.4 (ก) (ข) และ (ค)



(ก) ค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียสโดยไม่ทำการเชื่อม
(ข) ค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียสโดยไม่ทำการเชื่อม
(ค) ค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสโดยไม่ทำการเชื่อม

รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

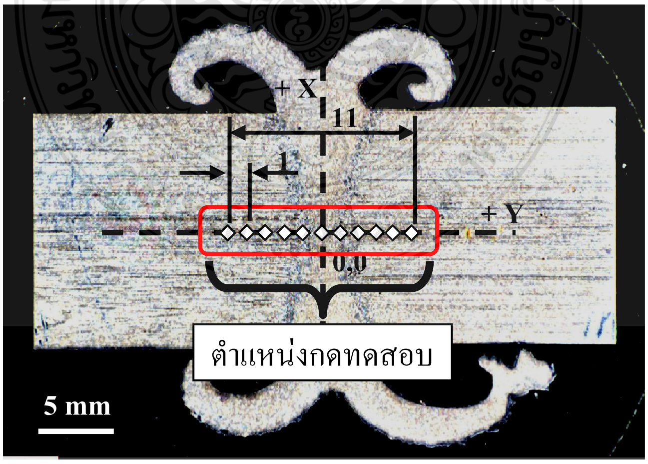
รูปที่ 4.5 จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 นำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าความต้านแรงดึงชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 ก่อนทำการทดลอง และเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานอบให้ความร้อนโดยไม่ทำการเชื่อม และทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงชิ้นงานเชื่อมได้ดังนี้ ที่ตัวแปรกลุ่มที่หนึ่งชิ้นงานเชื่อมที่อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยโดยรวมอยู่ที่ 616.82 MPa เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานก่อนทำการทดลองมีค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 662.93 MPa (สภาวะอุณหภูมิทดสอบปกติ) ชิ้นงานทดลองมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าค่าต้านทานแรงดึงก่อนการทดลองคิดเป็น 6.96 เปอร์เซ็นต์ ที่ตัวแปรกลุ่มที่สองชิ้นงานเชื่อมที่อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถต้านทานแรงดึงเฉลี่ยโดยรวมอยู่ที่ 595.63 MPa น้อยกว่าค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานก่อนทำการทดลองคิดเป็น 10.15 เปอร์เซ็นต์ และที่ตัวแปรกลุ่มที่สามชิ้นงานเชื่อมที่อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส มีค่า

ความสามารถต้านทานแรงดึงเฉลี่ยโดยรวมอยู่ที่ 595.32 MPa น้อยกว่าค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานก่อนทำการทดลองคิดเป็น 10.19 เปอร์เซ็นต์

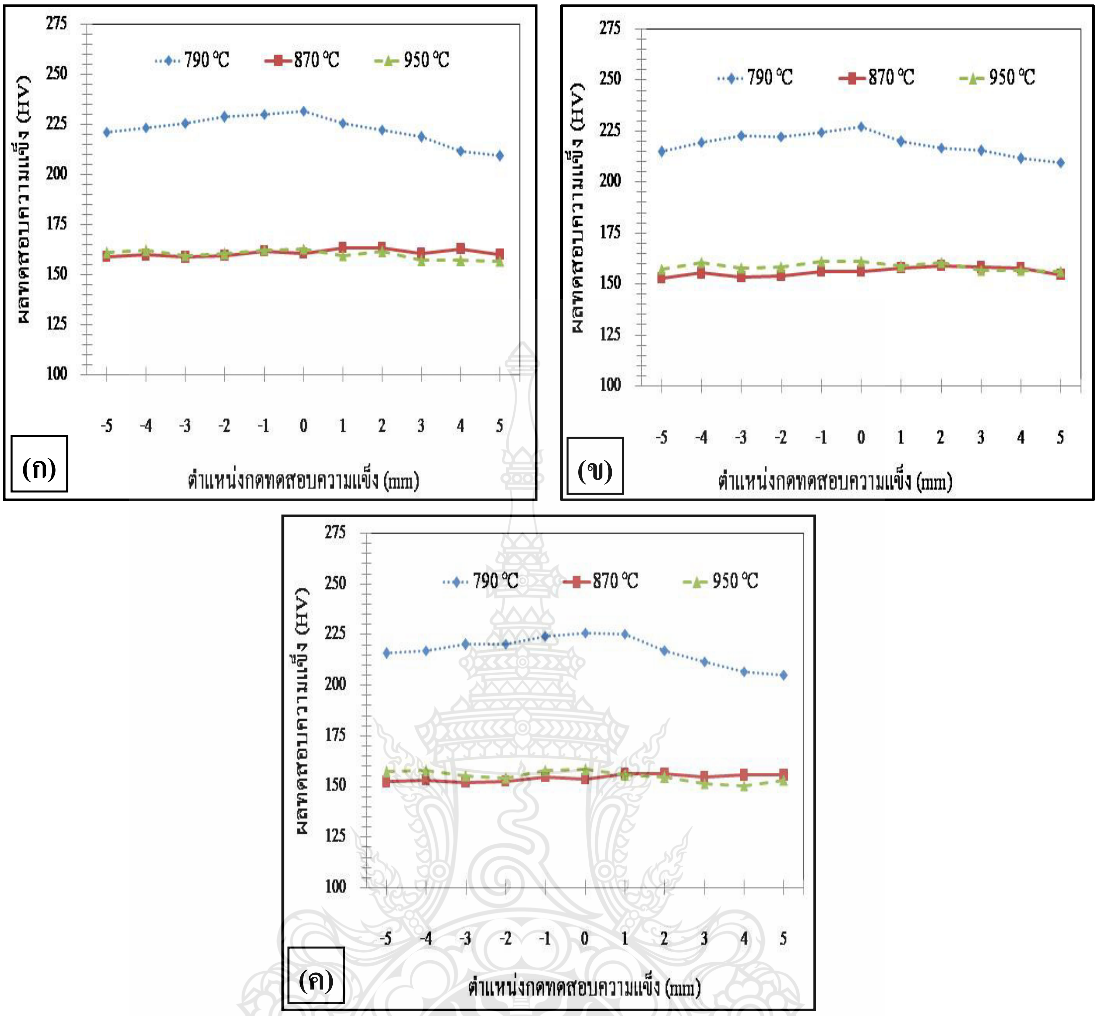
การวิเคราะห์ที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนอุณหภูมิ 870 และ 950 องศาเซลเซียส ชิ้นงานทดลองค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเกาะกลุ่มกันโดยเฉลี่ยที่ประมาณ 10.17 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงก่อนการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานอบให้ความร้อนโดยไม่ทำการเชื่อมพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงไม่แตกต่างกันในแต่ละกลุ่มตัวแปรอุณหภูมิ ดังรูป 4.5 (ก) (ข) และ(ค) อันเป็นผลมาจากอุณหภูมิการอบให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงเกินเส้น A3 ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์อย่างสมบูรณ์และเมื่อเย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมิห้องอย่างช้าๆ ในเตาอบชุบ ทำให้ขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิม เมื่อเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงและมีความอ่อนเหนียวเพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบมีความอ่อนเหนียวคล้ายกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบเพื่อคลายความเครียด

4.2 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็งชิ้นงานอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์ (Vicker Microhardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM E92 - 82 [7] ซึ่งจะทำการทดสอบชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียสตามแนวนอนทั้งหมด 11 จุด แต่ละจุดมีระยะห่างกัน 1 มิลลิเมตรโดยกำหนดจุดกึ่งกลางของชิ้นงานอยู่ที่ตำแหน่ง 0,0 ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งได้ผลการทดสอบความแข็งดังนี้



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งกดทดสอบความแข็ง



(ก) เวลาในการอัด 2 วินาที ; แรงดันในการอัด 2 MPa

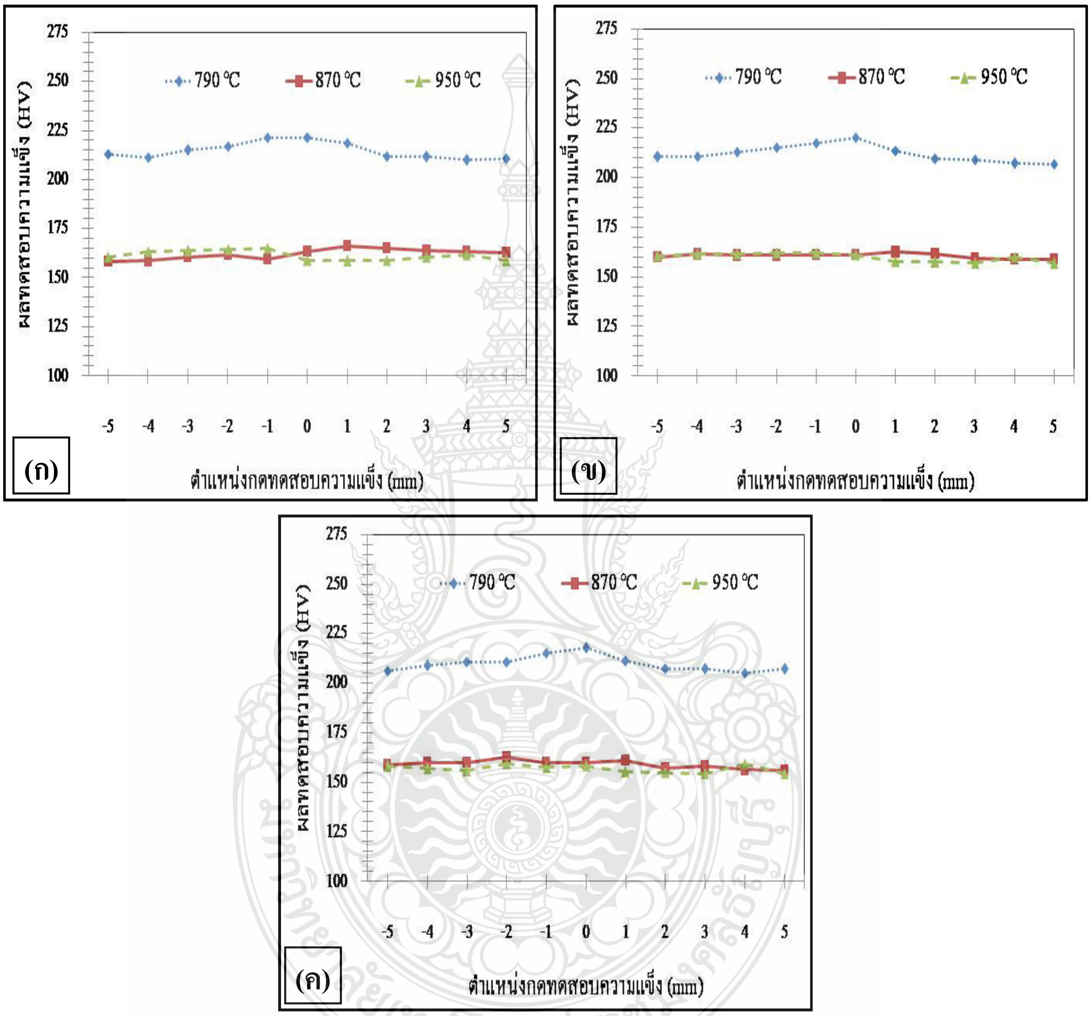
(ข) เวลาในการอัด 2 วินาที ; แรงดันในการอัด 3 MPa

(ค) เวลาในการอัด 2 วินาที ; แรงดันในการอัด 4 MPa

รูปที่ 4.7 ผลทดสอบความแข็งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 พบว่าในการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียสให้ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมสูงสุดที่ตัวแปรเวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 2 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที ตำแหน่งที่ให้ความแข็งสุดสุดอยู่ที่บริเวณตำแหน่ง 0 ของตำแหน่งกดทดสอบบนชิ้นงาน มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 222.44 HV จุด

ทดสอบความแข็งมีแนวโน้มให้ค่าความแข็งลดลงทั้งสองด้านจากตำแหน่ง 0 จึงทำให้ลักษณะของกราฟโค้งคว่ำ ดังรูปที่ 4.7 ในส่วนของการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 และ 950 องศาเซลเซียสค่าความแข็งชิ้นงานทดสอบทั้งสองอุณหภูมิมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มเกาะกลุ่มอยู่ในระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 4.7 (ก) (ข) และ (ค)

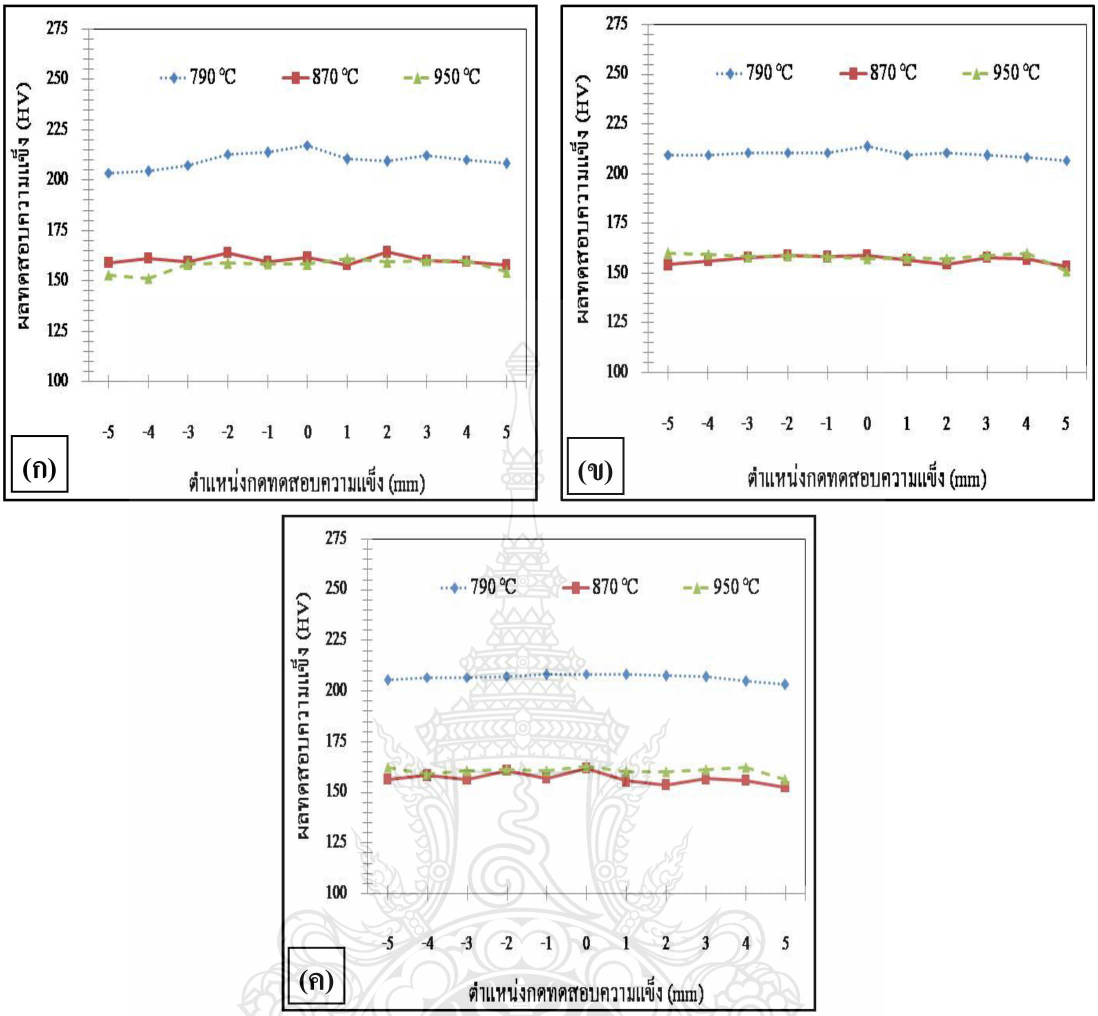


(ก) เวลาในการอัด 3 วินาที ; แรงดันในการอัด 2 MPa

(ข) เวลาในการอัด 3 วินาที ; แรงดันในการอัด 3 MPa

(ค) เวลาในการอัด 3 วินาที ; แรงดันในการอัด 4 MPa

รูปที่ 4.8 ผลทดสอบความแข็งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa



(ก) เวลาในการอัด 4 วินาที ; แรงดันในการอัด 2 MPa

(ข) เวลาในการอัด 4 วินาที ; แรงดันในการอัด 3 MPa

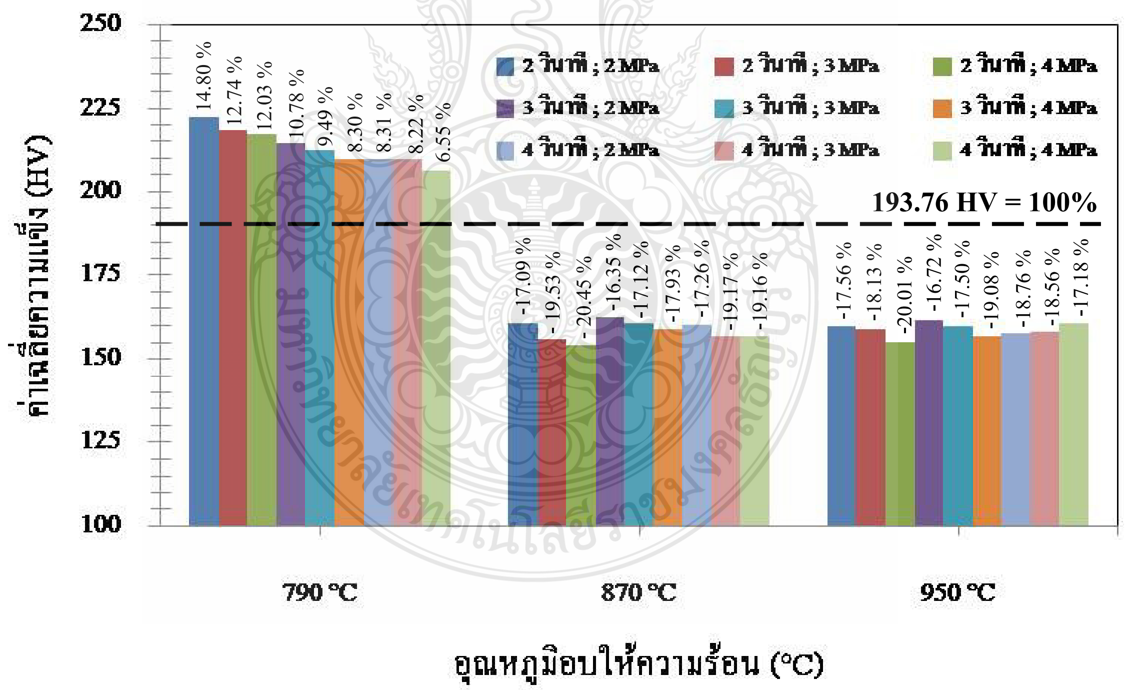
(ค) เวลาในการอัด 4 วินาที ; แรงดันในการอัด 4 MPa

รูปที่ 4.9 ผลทดสอบความแข็งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทาน พบว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 และ 950 องศาเซลเซียสค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบทั้งสองอุณหภูมิมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันและยังคงมีแนวโน้มเกาะกลุ่มอยู่ในระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 4.8 (ก) (ข) และ (ค) การอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส ยังคงให้ค่าความแข็งสูงในทุกๆ ตัวแปรตำแหน่งที่ให้ความแข็งสุดสุดอยู่ที่บริเวณตำแหน่ง 0 ของตำแหน่งกดทดสอบบน

ชิ้นงาน มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 214.64 HV ที่ตัวแปรเวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa ซึ่งมีผลการทดสอบความแข็งมีความคล้ายกันกับผลการทดสอบความแข็งของตัวแปรเวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa ดังรูปที่ 4.7 (ก) (ข) และ (ค)

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 พบว่าผลการทดสอบความแข็งทั้งสามกลุ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนตัวแปรชิ้นงานเชื่อมเสียดทาน มีผลการทดสอบคล้ายกันกับผลการทดสอบที่ตัวแปรเวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa ดังรูปที่ 4.7 (ก) (ข) และ (ค) และผลการทดสอบที่ตัวแปรเวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa ดังรูปที่ 4.8 (ก) (ข) และ (ค) โดยตัวแปรในการเชื่อมที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส ยังคงให้ค่าความแข็งสุดสุดอยู่ที่บริเวณตำแหน่ง 0 ของตำแหน่งกดทดสอบบนชิ้นงาน มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 209.86 HV ที่ตัวแปรเวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa ค่าความแข็งสูงกว่าตัวแปรในการเชื่อมที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 และ 950 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิการอบให้ความร้อนทั้งสองชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมยังคงให้ความแข็งที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นทดสอบความแข็งกับค่าความแข็งชิ้นงานก่อนการทดลองโดยไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนของเหล็กกล้า AISI 1045

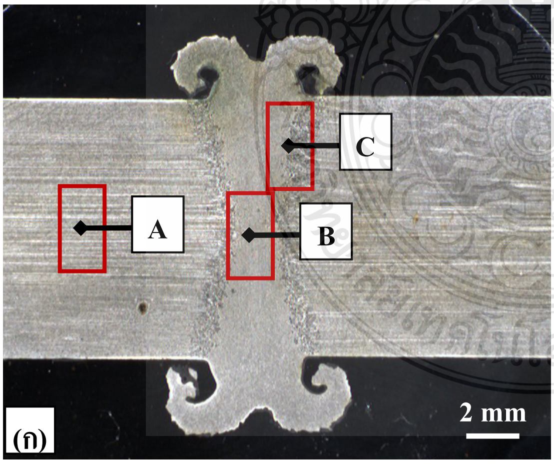
รูปที่ 4.10 กราฟค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานทดสอบความแข็งเปรียบเทียบกับค่าความแข็งเหล็กกล้า AISI 1045 ก่อนการทดลองโดยไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยให้ผลลัพธ์เปรียบเทียบอยู่ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ จากกราฟพบว่ากลุ่มตัวแปรชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียสให้ค่าความแข็งสูงกว่าค่าความแข็งชิ้นงานก่อนการทดลองโดยไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการอัดและแรงดันในการอัดเพิ่มขึ้น ตัวแปรที่ให้เปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งสูงที่สุดสูงกว่าค่าความแข็งชิ้นงานก่อนการทดลองอยู่ 14.80 เปอร์เซ็นต์ ที่ตัวแปรเวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa ชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870, 950 องศาเซลเซียสให้ค่าความแข็งน้อยกว่าค่าความแข็งชิ้นงานก่อนการทดลองโดยไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน และมีค่าเฉลี่ยความแข็งใกล้เคียงกัน อยู่ในระดับเดียวกัน ตัวแปรที่ให้เปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งน้อยที่สุดน้อยกว่าค่าความแข็งชิ้นงานก่อนการทดลองอยู่ 20.45 เปอร์เซ็นต์ ที่ตัวแปรเวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa

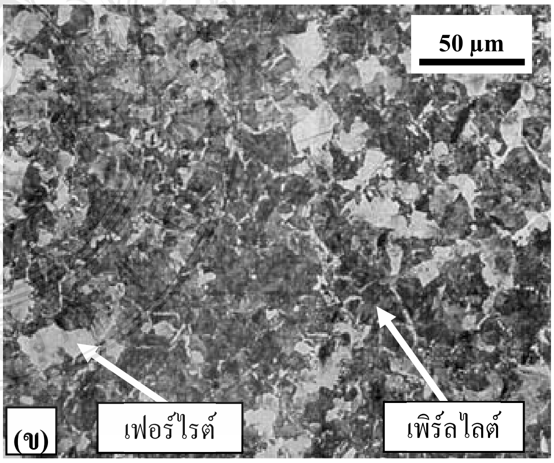
เมื่อนำค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบความแข็งในแต่ละตัวแปรมาเปรียบเทียบให้ผลลัพธ์เปรียบเทียบอยู่ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์กับค่าความแข็งเหล็กกล้า AISI 1045 ก่อนการทดลองโดยไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน มีค่าความแข็งอยู่ที่ 193.76 HV (ทำการทดสอบความแข็งที่อุณหภูมิปกติ) พบว่าที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส ให้ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม ทุกตัวแปรมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าค่าความแข็งชิ้นงานก่อนการทดลอง อันเนื่องมาจากแรงดันในการอัดน้อยส่งผลให้บริเวณรอยเชื่อมหรือบริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone : HAZ) มีความกว้างมากกว่าตัวแปรอื่นๆ ประกอบกับอุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่อยู่ภายใต้เส้น A3 โดยเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีส่วนผสมทางเคมีที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ 0.42- 0.50 เปอร์เซ็นต์มีอุณหภูมิที่บริเวณเส้น A3 อยู่ที่ 800 องศาเซลเซียสซึ่งอุณหภูมิแนะนำในการอบอ่อนเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางอยู่ที่ 10 – 30 องศาเซลเซียส เหนือเส้น A3 [21] ที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาค เกรนบริเวณรอยเชื่อมยังคงเป็นเกรนละเอียดเช่นเดิม จึงทำให้มีผลทดสอบความแข็งบริเวณรอยเชื่อมสูง ชิ้นงานทดลองอุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 870 องศาเซลเซียสมีอุณหภูมิเหนือเส้น A3 อยู่ 70 องศาเซลเซียส และชิ้นงานทดลองอุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 950 องศาเซลเซียสมีอุณหภูมิเหนือเส้น A3 อยู่ 150 องศาเซลเซียส การให้ความร้อนปริมาณทั้งสองทำให้โครงสร้างของเหล็กเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ (Austennite) เมื่อปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตาอบชุบอย่างช้าๆ โครงสร้างที่ได้จะเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลต์ชนิดหยาบประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite) [22] [23] เมื่อ

โครงสร้างที่ได้เป็นชนิดหยาบจึงทำให้ชิ้นงานทดลองมีสมบัติอ่อนเหนียวจึงทำให้ค่าความแข็งที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานที่อุณหภูมิ 870 และ 950 องศาเซลเซียสมีค่าความแข็งเฉลี่ยใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มอยู่ในระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 และจากค่าเฉลี่ยความแข็งชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียสที่ตัวแปรเวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาทีมีค่าความแข็งมากกว่าค่าความแข็งชิ้นงานก่อนการทดลองของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 อยู่ 10.14 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อน 870 และ 950 องศาเซลเซียสมีค่าความแข็งน้อยกว่าค่าความแข็งชิ้นงานก่อนทำการทดลอง อยู่ประมาณ 18.23 และ 18.17 เปอร์เซ็นต์

4.3 ผลตรวจสอบโครงสร้างมหาภาค โครงสร้างจุลภาค และขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อม

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็ก AISI 1045 ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม บริเวณรอยต่อชน บริเวณชิ้นงานเดิม และทำการตรวจสอบขนาดเกรน (Grain Side) บริเวณรอยเชื่อมกับบริเวณชิ้นงานเดิม เพื่อเปรียบเทียบขนาดเกรนชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทาน





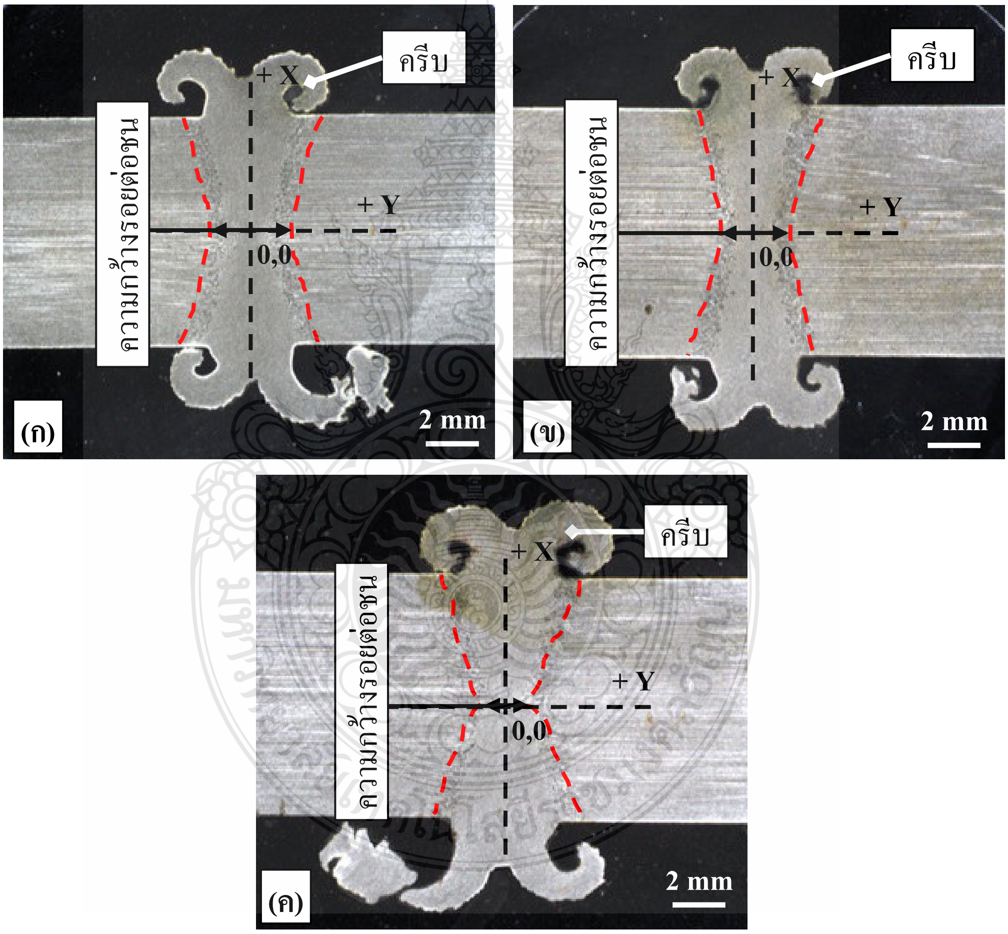
(ก) ตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

(ข) โครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045

รูปที่ 4.11 ตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045

รูปที่ 4.11 (ก) ตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิม (A) บริเวณรอยเชื่อม (B) และบริเวณรอยต่อชน (C) บนชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานตามตัวแปรที่กำหนด ดังรูปที่ 4.11 (ข) คือ โครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ชิ้นงานก่อนทำการทดลองที่มีส่วนผสมของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอยู่ที่ 0.47 เปอร์เซ็นต์ ทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 500 เท่า และทำการวัดขนาดเกรนได้ 46.63 ไมโครเมตร มีขนาดเกรนเบอร์ 5.5 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8]

4.3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อม

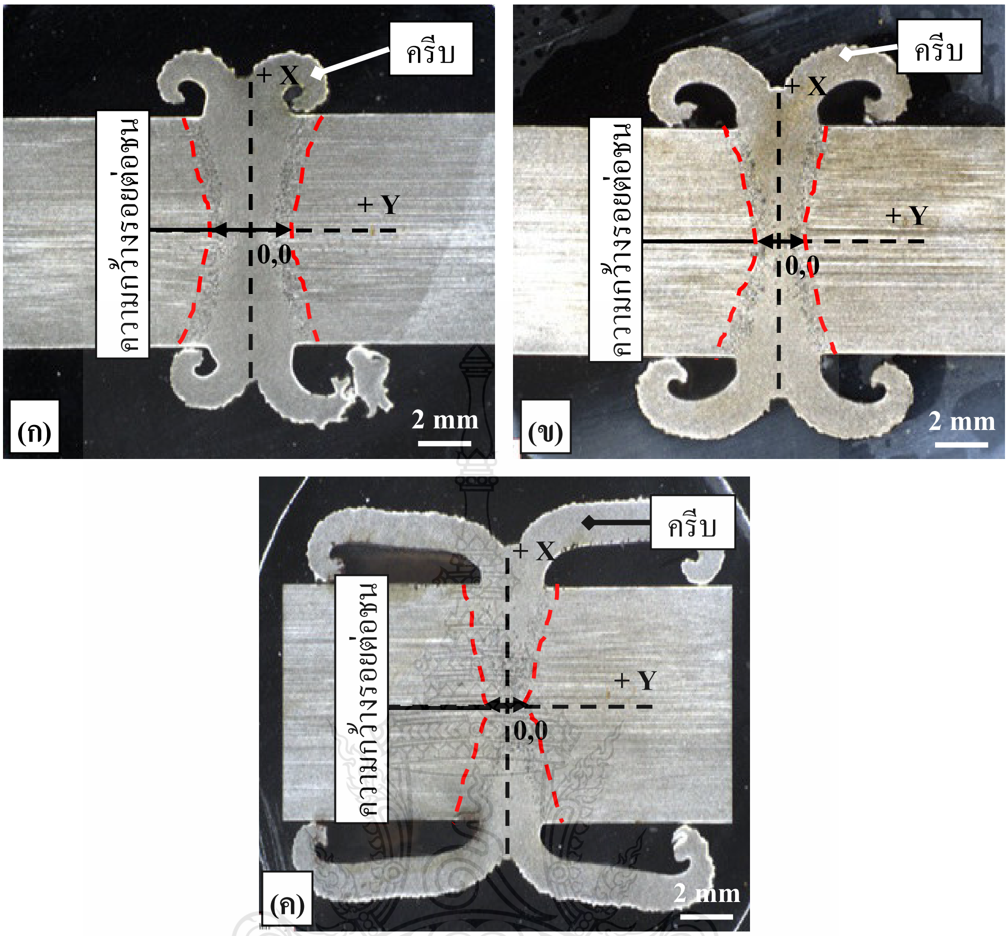


(ก) โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อม ที่เวลาในการอัด 2 วินาที ; แรงดันในการอัด 2 MPa

(ข) โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อม ที่เวลาในการอัด 2 วินาที ; แรงดันในการอัด 3 MPa

(ค) โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อม ที่เวลาในการอัด 2 วินาที ; แรงดันในการอัด 4 MPa

รูปที่ 4.12 โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อมที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัดแตกต่างกัน



(ก) โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อม ที่เวลาในการอัด 2 วินาที ; แรงดันในการอัด 2 MPa

(ข) โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อม ที่เวลาในการอัด 3 วินาที ; แรงดันในการอัด 3 MPa

(ค) โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อม ที่เวลาในการอัด 4 วินาที ; แรงดันในการอัด 4 MPa

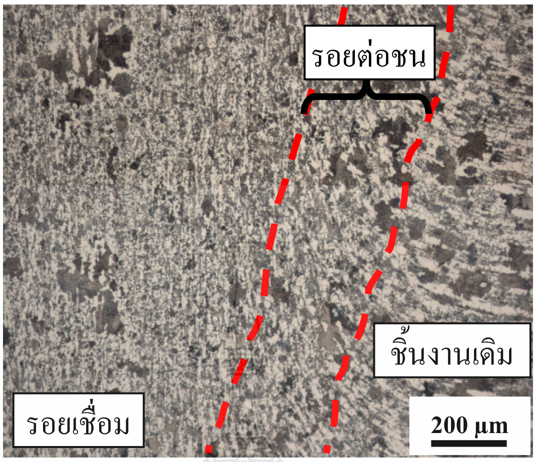
รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ตัวแปรเวลาในการอัดแตกต่างกัน

รูปที่ 4.12 ลักษณะของรอยต่อชนบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะเกิดเป็นคอคอดตรงกลางคล้ายกับนาฬิกาทรายโบราณในทุกตัวแปรการเชื่อม โครงสร้างมหาภาคความกว้างคอคอดหรือรอยต่อชนบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงานมีขนาดความกว้างที่ตำแหน่ง 0,0 แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ที่ตัวแปรเวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 2 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที มีขนาดความกว้างรอยต่อชนที่ตำแหน่ง 0,0 กว้างที่สุด ดังรูปที่ 4.12 (ก) เมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างรอยต่อชนตัวแปร ดังรูปที่ 4.12 (ข) และ (ค) และตัวแปรอื่นๆ ความแตกต่างของขนาดความกว้างรอยต่อชนเกิดขึ้นจากตัวแปรเวลาในการอัดและแรงดันในการอัดที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเวลาในการอัดเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันในการอัดมีเวลาในการอัด

แช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นและแรงดันในการอัดที่เพิ่มขึ้นทำให้กระบอกไฮดรอลิคมีแรงดันกระทำกับชิ้นงานเชื่อมที่กำลังเสียดทานเพิ่มมากขึ้น บริเวณที่กำลังเสียดทานเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากการเสียดทานทำให้เนื้อวัสดุบริเวณนั้นอ่อนตัว เมื่อมีแรงดันในการอัดมากระทำทำให้เนื้อวัสดุที่กำลังอ่อนตัวเคลื่อนที่ออกสู่พื้นที่ว่างรอบนอกบริเวณรอบรอยต่อชนจนเกิดเป็นครีบของรอยเชื่อมดังอธิบายไว้ ดังรูปที่ 4.1 เนื้อวัสดุที่เคลื่อนที่ออกมามากจึงทำให้ความกว้างรอยต่อชนนั้นลดลง ดังรูปที่ 4.12 (ก) (ข) และ (ค)

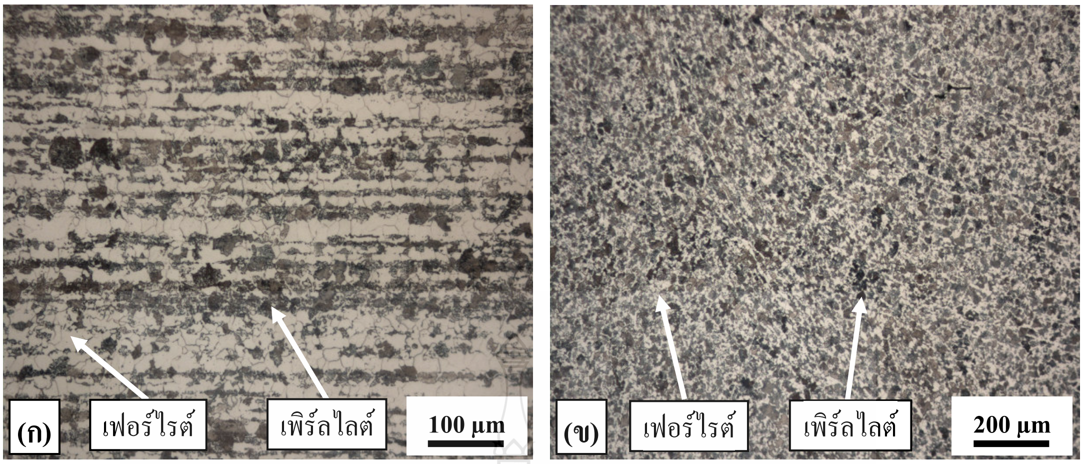
รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหาภาคบริเวณรอยเชื่อม เปรียบเทียบรอยต่อชนที่ตัวแปรเวลาในการอัดแตกต่างกันและแรงดันในการอัดแตกต่างกันเพื่อให้เห็นภาพอิทธิพลตัวแปรเวลาการอัดและแรงดันในการอัดที่มีผลต่อรอยเชื่อมอย่างชัดเจน ขนาดความกว้างรอยต่อชนที่ตัวแปรเวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 2 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที มีขนาดความกว้างรอยต่อชนที่ตำแหน่ง 0,0 กว้างที่สุด ดังรูปที่ 4.13 (ก) ที่ตัวแปรเวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 3 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที มีขนาดความกว้างรอยต่อชนที่ตำแหน่ง 0,0 กว้างปานกลาง ดังรูปที่ 4.13 (ข) และที่ตัวแปรเวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 4 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที มีขนาดความกว้างรอยต่อชนที่ตำแหน่ง 0,0 น้อยที่สุด ดังรูปที่ 4.13 (ค) ขนาดความกว้างรอยต่อชนที่เกิดเป็นคอคอดมีผลต่อการทดสอบความแข็งบริเวณเชื่อม รอยต่อชนที่มีขนาดความกว้างมากทำให้พื้นที่ในการกดทดสอบความแข็งที่ตำแหน่ง 0,0 มีมากขึ้น รอยต่อชนที่มีขนาดความกว้างน้อยทำให้พื้นที่ในการกดทดสอบความแข็งมีน้อยลงด้วยเช่นกัน

4.3.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อม



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุเมื่อได้รับแรงดันในการอัด

รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาค ณ ตำแหน่ง (C) ดังรูปที่ 4.11 (ก) ลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุเมื่อได้รับแรงดันในการอัด วัสดุที่ได้รับความร้อนจากการเสียดทานขณะทำการเชื่อมเสียดทานทำให้เนื้อวัสดุที่ได้รับความร้อนอ่อนตัว และเมื่อมีแรงดันในการอัดจากกระบอกไฮดรอลิคมากระทำ ทำให้เนื้อวัสดุที่อ่อนตัวเคลื่อนที่ออกจากภายในสู่ภายนอกรอบๆ บริเวณรอยเชื่อม ทิศทางการเคลื่อนที่มีลักษณะโค้งออกจากเนื้อวัสดุเดิมที่มีลักษณะเกรนหยาบมากกว่า ช่วงรอยต่อชนมีลักษณะเกรนเรียวยาว เนื้อวัสดุบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดเกรนละเอียดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณเนื้อวัสดุเดิม ดังรูปที่ 4.14

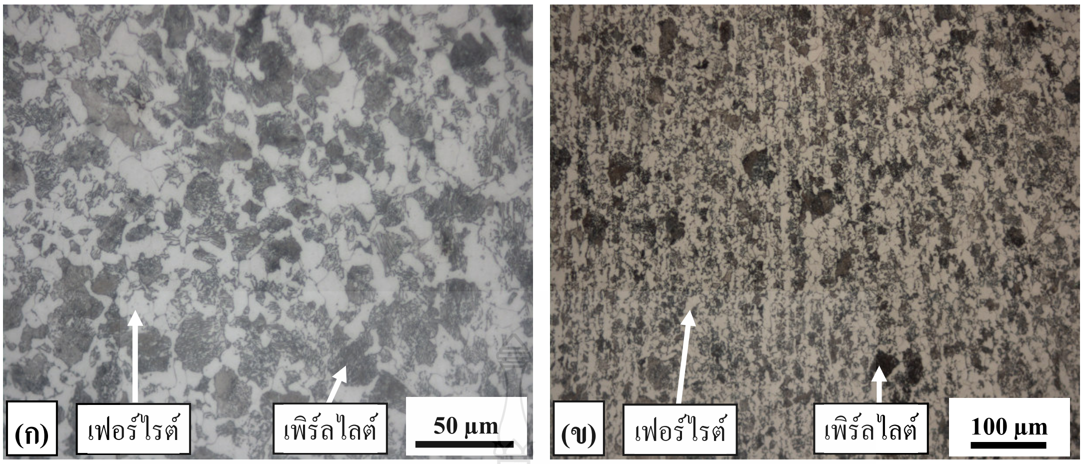


(ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A)

(ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมตำแหน่งตรวจสอบ (B)

รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส

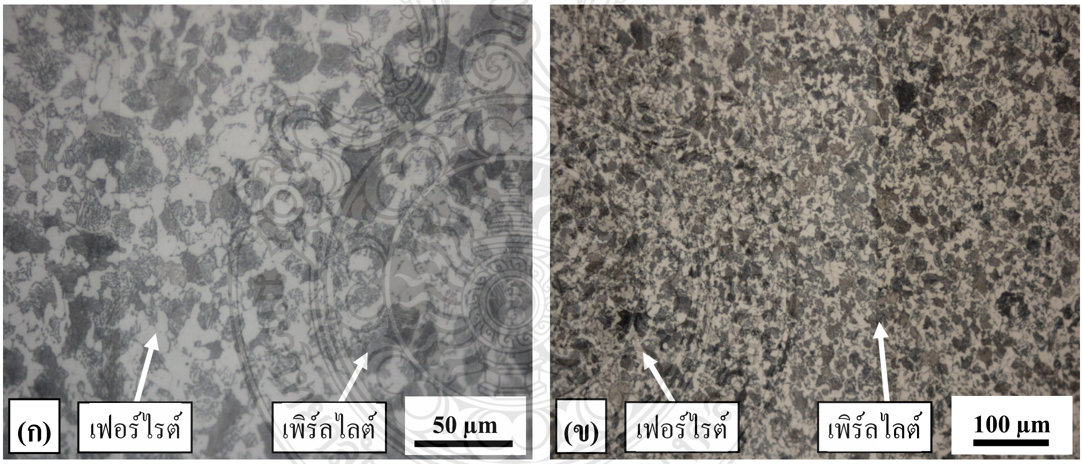
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 4.15 (ก) พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณชิ้นงานเดิมประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ลักษณะของเกรนมีการเรียงตัวกันเป็นแถวยาวและทำการวัดขนาดเกรนได้ 52.37 ไมโครเมตร มีขนาดเกรนเบอร์ 4.5 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8] โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ตำแหน่งตรวจสอบ (B) ทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังรูปที่ 4.15 (ข) จากการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนที่ละเอียดกว่าบริเวณชิ้นงานเดิมและทำการวัดขนาดเกรนได้ 34.09 ไมโครเมตร มีขนาดเกรนเบอร์ 6 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8]



(ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A)

(ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมตำแหน่งตรวจสอบ (B)

รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส



(ก) โครงสร้างจุลภาค บริเวณชิ้นงานเดิมตำแหน่งตรวจสอบ (A)

(ข) โครงสร้างจุลภาค บริเวณรอยเชื่อมตำแหน่งตรวจสอบ (B)

รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณชิ้นงานเดิม

ตำแหน่งตรวจสอบ (A) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังรูปที่ 4.16 (ก) พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณชิ้นงานเดิมประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟสเพิร์ลไลต์เช่นเดียวกับชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส ลักษณะของเกรนค่อนข้างหยาบและทำการวัดขนาดเกรนได้ 73.51 ไมโครเมตร มีขนาดเกรนเบอร์ 4 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8] โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ตำแหน่งตรวจสอบ (B) ทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 4.16 (ข) จากการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนค่อนข้างหยาบคล้ายกับเกรนบริเวณชิ้นงานเดิม เกรนประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟสเพิร์ลไลต์เช่นเดียวกับบริเวณชิ้นงานเดิมและทำการวัดขนาดเกรนได้ 69.47 ไมโครเมตร มีขนาดเกรนเบอร์ 4 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8]

รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวแปรในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณชิ้นงานเดิมที่ตำแหน่งตรวจสอบ (A) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังรูปที่ 4.17 (ก) พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณชิ้นงานเดิมประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟสเพิร์ลไลต์ลักษณะของเกรนค่อนข้างหยาบเช่นเดียวกับชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 และ 870 องศาเซลเซียส และทำการวัดขนาดเกรนได้ 76.32 ไมโครเมตร มีขนาดเกรนเบอร์ 4 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8] โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมที่ตำแหน่งตรวจสอบ (B) ทำการตรวจสอบที่กำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 4.17 (ข) จากการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนค่อนข้างหยาบคล้ายกับเกรนบริเวณชิ้นงานเดิม เกรนประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟสเพิร์ลไลต์เช่นเดียวกับบริเวณชิ้นงานเดิมและทำการวัดขนาดเกรนได้ 72.11 ไมโครเมตร มีขนาดเกรนเบอร์ 4 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8]

การวิเคราะห์โครงสร้างมหาภาค โครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมชิ้นงานตัวแปรที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่ตัวแปรเวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่ 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียส พบว่าตัวแปรเวลาในการอัดและแรงดันในการอัดมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างมหาภาคขนาดความกว้างรอยต่อชนบริเวณรอยเชื่อม เมื่อเพิ่มเวลาในการอัดและแรงดันในการอัดโครงสร้างหมาภาครอยต่อชนจะมีขนาดความกว้างลดลงทำให้พื้นที่ในการทดสอบความแข็งที่ตำแหน่ง 0,0 ลดน้อยลงตามไปด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการอัดและแรงดันในการอัดที่น้อยกว่าทำให้โครงสร้างหมาภาครอยต่อชนมีขนาดความกว้างมากกว่าและพื้นที่ใน

การทดสอบความแข็งที่ตำแหน่ง 0,0 มีมากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กลงเมื่อนำขนาดเกรนที่ได้จากการวัดตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8] มาทำการเปรียบเทียบกันกับขนาดเกรนโครงสร้างจุลภาคในส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิม ดังรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 ส่งผลให้บริเวณรอยเชื่อมนั้นมีความแข็งมากกว่าส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิม ที่อุณหภูมิอบให้ความร้อน 790 องศาเซลเซียสโครงสร้างจุลภาคยังคงเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ + ออสเตนไนท์ เมื่อชิ้นงานเชื่อมเย็นตัวในเตาอบชุบจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วโครงสร้างยังคงเดิมคือโครงสร้างเพิร์ลไลต์และโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เพราะอุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส เป็นอบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิยังไม่ถึงเส้น A3 ของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 ที่มีอุณหภูมิที่เส้น A3 อยู่ที่ 800 องศาเซลเซียส [21] จึงทำให้ขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดเกรนเบอร์ 6 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8] และส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิมมีขนาดเกรนเบอร์ 4.5 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8] ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะเดิมก่อนทำการอบให้ความร้อนเพียงเล็กน้อย หากเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 และ 950 องศาเซลเซียส ขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าบริเวณชิ้นงานเดิม ขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมมีความละเอียดมากกว่าขนาดเกรนบริเวณชิ้นงานเดิมและชิ้นงานก่อนทำการทดลองที่มีขนาดเกรนเบอร์ 5.5 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8] ดังรูปที่ 4.15 จึงส่งผลให้ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเมื่อทำให้อยู่ในรูปแบบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์แล้วมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งชิ้นงานก่อนทำการทดลองที่มีค่าความแข็งอยู่ที่ 193.76 HV และมีขนาดเกรนหยาบกว่าอยู่ 10.14 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.10 ที่อุณหภูมิอบให้ความร้อน 870 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่อยู่เหนือเส้น A3 ของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045 อยู่ 70 และ 150 องศาเซลเซียส การอบให้ความร้อนทั้งสองอุณหภูมิปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบชุบอย่างช้าๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมและส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิม ขนาดเกรนที่ละเอียดบริเวณรอยเชื่อมก่อนทำการอบให้ความร้อนเมื่อได้รับความร้อนสูงเหนือเส้น A3 ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบชุบอย่างช้าๆ ทำให้เกรนมีขนาดเกรนเบอร์ 4 ตามมาตรฐาน ASTM E1382 – 97 [8] มีขนาดใหญ่ขึ้นเท่าๆ กันกับขนาดเกรนบริเวณส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิม โดยทำการวัดและเปรียบเทียบขนาดเกรนทั้งสองบริเวณ ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ทำให้ผลการทดสอบความแข็งบริเวณรอยเชื่อมและค่าความแข็งส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิมมีค่าความแข็งเฉลี่ยใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มอยู่ในระดับเดียวกัน เมื่อทำค่าความแข็งเฉลี่ยทั้งสองอุณหภูมิให้อยู่ในรูปแบบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์แล้วมีค่าความแข็งน้อยกว่าค่าความแข็งชิ้นงานก่อนทำการทดลองอยู่ที่ 18.23 และ 18.17 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ตามตัวแปรที่กำหนดดังนี้

1. อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน 790, 870 และ 950 องศาเซลเซียส
2. เวลาในการอัด 2, 3 และ 4 วินาที
3. แรงดันในการอัด 2, 3 และ 4 MPa
4. เวลาที่ใช้ในการเสียดทาน 4 วินาที
5. แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa
6. ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที

จากผลการทดสอบความความต้านทานแรงดึง ผลการทดสอบความแข็ง ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหาภาคและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 อิทธิพลของตัวแปรเวลาในการอัดมีผลต่อขนาดความกว้างของรอยต่อชนบริเวณรอยเชื่อมเสียดทาน เมื่อเวลาในการอัดเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันในการอัดมีเวลาในการอัดแช่ชิ้นงานเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดความกว้างของรอยต่อชนที่ตำแหน่ง 0,0 น้อยลง ความกว้างที่น้อยมากที่สุดอยู่ที่ตัวแปรเวลาในการอัด 4 วินาที ความกว้างของรอยต่อชนที่มากที่สุดอยู่ที่ตัวแปรเวลาในการอัด 2 วินาที

5.1.2 อิทธิพลของตัวแปรแรงดันในการอัดมีผลต่อขนาดความกว้างรอยเชื่อม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม และขนาดความกว้างของรอยต่อชนบริเวณรอยเชื่อม เมื่อเพิ่มแรงดันในการอัดทำให้ขนาดของความกว้างของรอยเชื่อมมีความกว้างเพิ่มมากขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเชื่อมมีขนาดใหญ่สุดที่ตัวแปรแรงดันในการอัด 3 MPa ขนาดความกว้างของรอยต่อชนบริเวณรอยเชื่อมที่มีขนาดความกว้างมากอยู่ที่ตัวแปรแรงดันในการอัด 2 MPa ทำให้พื้นที่ในการกดทดสอบความแข็งที่ตำแหน่ง 0,0 มีมากขึ้น รอยต่อชนที่มีขนาดความกว้างน้อยอยู่ที่ตัวแปรแรงดันในการอัด 4 MPa ทำให้พื้นที่ในการกดทดสอบความแข็งมีน้อยลง

5.1.3 อิทธิพลของอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีผลต่อความแข็งแรง คือ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่ 870 และ 950 องศาเซลเซียส

ทำให้ชิ้นงานทดลองมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มอยู่ในระดับเดียวกันมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานก่อนทำการทดลอง อยู่ประมาณ 10.17 เปอร์เซ็นต์ รอยเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานเดิมและมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว รอยแตกหักอยู่บริเวณนอกรอยเชื่อมในส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิม

5.1.4 อิทธิพลของอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีผลต่อความแข็ง คือ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่ 870 และ 950 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบความแข็งบริเวณรอยเชื่อมและส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิมบนชิ้นงานทดลองทั้งสองอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยความแข็งที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มอยู่ในระดับเดียวกัน และมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยน้อยกว่าชิ้นงานก่อนทำการทดลองอยู่ประมาณ 18.20 เปอร์เซ็นต์

5.1.5 อิทธิพลของอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณชิ้นงานเดิม ที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อน 790 องศาเซลเซียสโครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณชิ้นงานเดิมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมก่อนทำการอบให้ความร้อนเพียงเล็กน้อย ขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมมีขนาดเกรนเบอร์ 6 เล็กกว่าขนาดเกรนบริเวณชิ้นงานเดิมมีขนาดเกรนเบอร์ 4.5 และเล็กกว่าชิ้นงานก่อนทำการทดลองที่มีขนาดเกรนเบอร์ 5.5 ส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งมากกว่าบริเวณชิ้นงานเดิมและชิ้นงานก่อนทำการทดลอง ชิ้นงานเชื่อมที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อน 870 และ 950 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคและขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณชิ้นงานเดิมมีขนาดใหญ่ขึ้นมีขนาดเกรนเบอร์ 4 เท่ากันทั้งสองบริเวณและสองอุณหภูมิ ส่งผลให้ผลการทดสอบความแข็งทั้งสองบริเวณมีค่าใกล้เคียงกัน โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ทั้งสามอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับทางเลือกในการอบให้ความร้อนชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานตามตัวแปรที่กำหนด โดยได้ศึกษาถึงอิทธิพลที่มีผลต่อสมบัติทางกลทั้งการทดสอบความแข็งแรง การทดสอบความแข็ง และการตรวจสอบโครงสร้างมหาภาคและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเท่านั้น จึงควรทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในด้านอื่นๆ อีก เพื่อเป็นการพัฒนาต่อยอดสำหรับผู้ที่สนใจ

5.2.1 ในขั้นตอนการเชื่อมชิ้นงานด้วยแรงเสียดทาน ไม่ทำการเพิ่มแรงดันในการอัดได้หรือไม่ หากไม่เพิ่มแรงดันในการอัด ชิ้นงานบริเวณรอยเชื่อมจะยังคงมีความแข็งแรงมากกว่าส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิมอยู่หรือไม่

5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบชิ้นงานทดลองควรมีการทดสอบความล้าตัว (Fatigue) และทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) เพิ่มเติม เพื่อศึกษาความทนทานต่อการล้าตัวของรอยเชื่อมและความทนทานต่อแรงกระแทกของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมเสียดทาน

5.2.3 ควรมีการศึกษาวิจัยในด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนของรอยเชื่อม การทนทานต่อสภาวะสิ่งสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นต้น

5.2.4 ควรมีการศึกษาวิจัยกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้วัสดุที่มีความแข็งสูงสามารถทำการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานผสานยึดติดกันได้

5.2.5 ควรมีการศึกษาวิจัยในแง่ของการนำไปใช้ในงานจริง เช่น งานปรับปรุงสมบัติทางเคมีของชิ้นงานหลังการเชื่อม เป็นต้น

รายการอ้างอิง

[1] ช่วงชัย ชุปวา, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ "การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและแรงดันในการอัดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม," **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย**, ครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย, 2552.

[2] Mumin Sahin, H. Erol Akata and Turgut Gulmez, "Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding," **Materials Characterization**, Vol. 58, 2007. pp. 1033 – 1038.

[3] MuminSahin, "Evaluation of the joint – interface properties of austenitic – stainless steel (AISI 304) joined by friction welding," **Materials Characterization**, Vol. 28, 2007. pp. 2244 – 2250.

[4] สุรสิงห์ อารยางค์กูร, และคณะ, **การเชื่อมเหล็กกลมด้วยความเสียดทาน,** วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2551.

[5] Sare Celik and Ismail Ersozlu, 2009. "Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels," **Materials & Design,** Vol. 30, 2009. pp. 269-273.

[6] ASTM International., "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials E8-04, & **Annual Book of ASTM Standard**, Volume 03.01, 1996. pp. 1-24.

[7] ASTM International., "Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materials E92 - 82, & **Annual Book of ASTM Standard**, Volume 03.01, 1996. pp. 1-9.

[8] ASTM International., "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size E 112-96 and Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis E 1382-97,& **Annual Book of ASTM Standard**, Volume 03.01, 1996. pp. 1-26.

[9] โลหะเหล็ก AISI 1045**. เว็บไซต์อาจารย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร** [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : http://www.teacher.snru.ac.th/preechasat/admin/news/files/IT%252002.doc (19 ตุลาคม 2555).

รายการอ้างอิง (ต่อ)

[10] ถังบรรจุของเหลวและเหล็กเส้นก่อสร้าง. **สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย** [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : http://www.isit.or.th/modules.php?mod=News&file=view&ID=4125 (23 ตุลาคม 2555).

[11] เฟือง (gear). **Robot** [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : http://phichitra999.wordpress.com/ลักษณะพิเศษของหุ่นยนต์/ (23 ตุลาคม 2555).

[12] Endmill. **MELIN** [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : http://www.endmill.com/pages/specials.html (23 ตุลาคม 2556).

[13] อดิศักดิ์ วรรณะวัลย์. 2521.**วิศวกรรมการเชื่อม.** กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์ประกอบเมไตร:พิมพ์ครั้งที่ 2

[14] ชลิตต์ มธุรสมนตรี และ คณะ. 2544. **กระบวนการผลิต.** กรุงเทพฯ : ศูนย์ส่งเสริมอาชีวะ.

[15] Enriquc. **Forge Welding** [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : http://www.artmetal.com/enrique/wrought/architectural/railings/jessie/weld04.JPG (30 ตุลาคม 2555).

[16] มนัส สถิรจินดา. 2543. **วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก.** กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (ไทย- ญี่ปุ่น).

[17] Sammak. **Microscope** [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : http:/www.princess-it.org/kp9/hrhprojects/file/20060327_sammakkee/Aee/Lunla/index.htm (2 ธันวาคม 2555).

[18] มานพ ตันตระบัณฑิตย์. 2546. **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม.** กรุงเทพฯ : ทีเอสบี โปรดักส์.

[19] มานพ ตันตระบัณฑิตย์. 2546 **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม (ฉบับปรับปรุง)**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

[20] เครื่องทดสอบแรงดึง**. เครื่องทดสอบแรงดึง** [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก : http://ayutthaya.olxthailand.com/iid163350218 (18 ธันวาคม 2555).

[21] พรวสา วงศ์ปัญญา,**เอกสารประกอบการสอนวิชา 431 204 ปฏิบัติการโลหะการกายภาพ 2**,15-26

[22] ณรงศักดิ์ ธรรมโชติ, **วัสดุวิศวกรรม (ฉบับปรับปรุง).** พิมพ์ครั้งที่ 1. ส.เอเซียเพรส (1989) จำกัด กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2549. 116 – 118.

[23] บัณฑิต ใจชื้น, **การอบชุบโลหะ,**พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ประกอบเมไตร กรุงเทพฯ:. 2528. 6.11 – 6.16.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

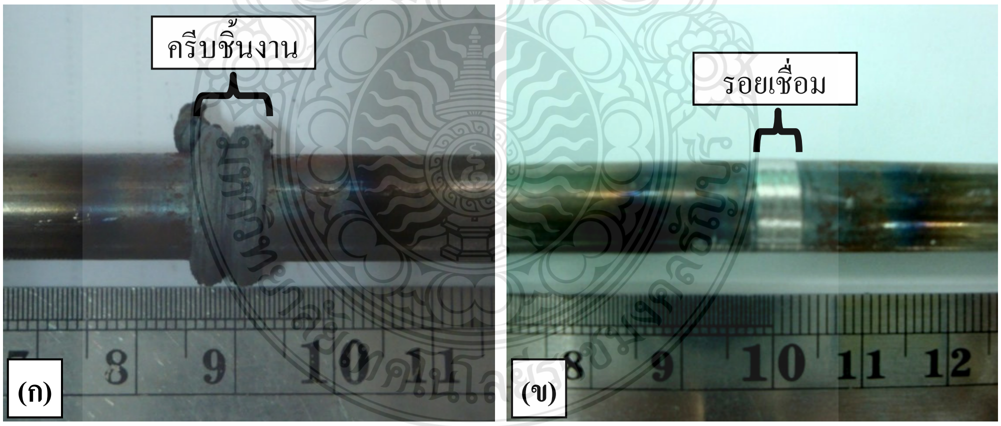
ผลการทดสอบก่อนการทดลอง (Pre - Test)

ก. ผลการทดสอบวัสดุเหล็กกล้า AISI 1045 ก่อนทำการทดลอง (Pre - Test)

หลังจากทำการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทาน ชิ้นงานจะเกิดครีบบริเวณรอยเชื่อม ดังรูปที่ ก.1 (ก) ซึ่งอาจมีผลต่อการแทรกซึมของความร้อนในการอบแช่ในกระบวนการทางความร้อน จึงได้ทำการทดสอบชิ้นงานเชื่อมก่อนทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบหาข้อแตกต่างของผลทดสอบความต้านทานแรงดึง ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานที่ผ่านการกลึงครีบออกก่อนทำการอบให้ความร้อน ดังรูปที่ ก.1 (ข) และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการกลึงครีบออกก่อนทำการอบให้ความร้อนโดยการเลือกชิ้นงานตามตัวแปร ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบก่อนทำการทดลอง (Pre - Test) มีดังนี้

ความเร็วรอบ (rpm)	เวลาในการเสียดทาน (วินาที)	เวลาในการอัด (วินาที)	แรงดันในการเสียดทาน (MPa)	แรงดันในการอัด (MPa)	อุณหภูมิที่ใช้อบชิ้นงานกลึงครีบออก	อุณหภูมิที่ใช้อบชิ้นงานไม่กลึงครีบออก
1,800	4	3	1.4	3	790	790



(ก) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการกลึงครีบออกก่อนทำการอบให้ความร้อน

(ข) ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงครีบออกก่อนทำการอบอบให้ความร้อน

รูปที่ ก.1 รูปร่างและลักษณะชิ้นงานทดสอบก่อนทำการทดลอง

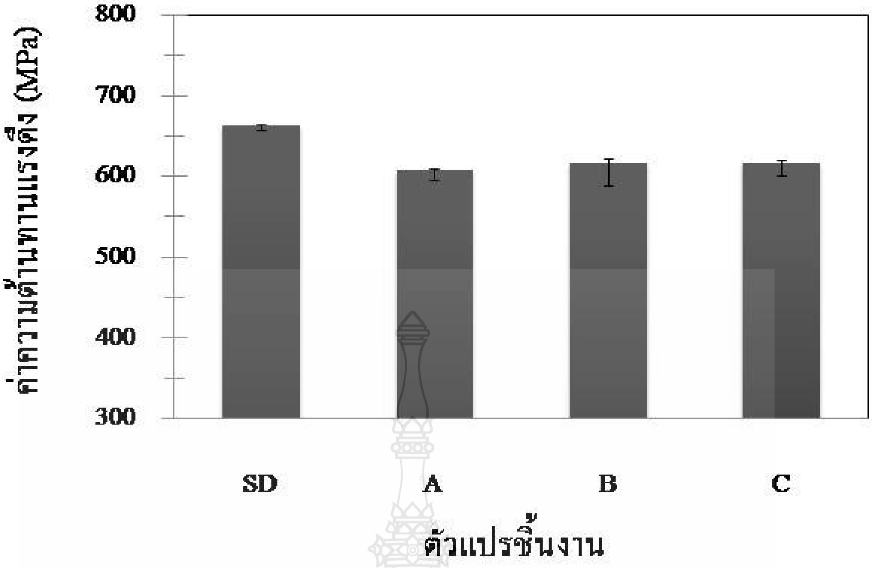
หลังจากทำการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทานตามตัวแปรที่กำหนดเรียบร้อยแล้ว ทำการคัดเลือกชิ้นงานตามตัวแปรดังตารางที่ ก.1 แบ่งชิ้นงานเชื่อมออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกไม่ต้องทำการกลึงครีบออก ดังรูปที่ ก.1 (ก) กลุ่มที่สองทำการกลึงครีบออก ดังรูปที่ ก.1 (ข) หลังจากนั้นนำชิ้นงานทั้งสองกลุ่มเข้าเตาอบชุบเพื่อทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยชิ้นงานเย็นตัวในเตาอบ ก่อนทำการอบได้ทำการคำนวณหาเวลาในการอบแช่ที่อุณหภูมิสูงสุดโดยใช้อัตราความสัมพันธ์เวลาและอุณหภูมิในการอบแช่ที่เวลา 60 นาทีต่อความหนาชิ้นงาน 25.4 มิลลิเมตร ในที่นี้วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเชื่อมได้ 10 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการอบแช่ที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียสประมาณ 25 นาที ต่อจากนั้นนำชิ้นงานที่เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องภายในเตาอบชุบไปทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ความแข็ง และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ก.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง

นำชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนทั้งสองกลุ่มไปทำการกลึงขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E8 -04 [6] จากนั้นนำไปทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง (ปราศจากการกระแทก) จนชิ้นงานขาดออกจากกัน ใช้ความเร็วในการยืดตัวต่ำ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ค่าที่ได้จากการทดสอบผิดพลาด ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

ชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ยแรงดึง (MPa)	สภาวะการทดสอบ
SD = Standard AISI 1045	662.93	อุณหภูมิปกติ
A = อบให้ความร้อนก่อนเชื่อม	607.65	อุณหภูมิปกติ
B = กลึงครีบก่อนอบให้ความร้อน	617.02	อุณหภูมิปกติ
C = ไม่กลึงครีบก่อนอบให้ความร้อน	616.57	อุณหภูมิปกติ



(SD) ค่าแรงดึงเหล็ก AISI 1045 ที่อุณหภูมิปกติ, (A) ค่าแรงดึงเหล็ก AISI 1045 อบให้ความร้อนก่อนเชื่อม, (B) ค่าแรงดึงเหล็ก AISI 1045 กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน, (C) ค่าแรงดึงเหล็ก AISI 1045 ไม่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน

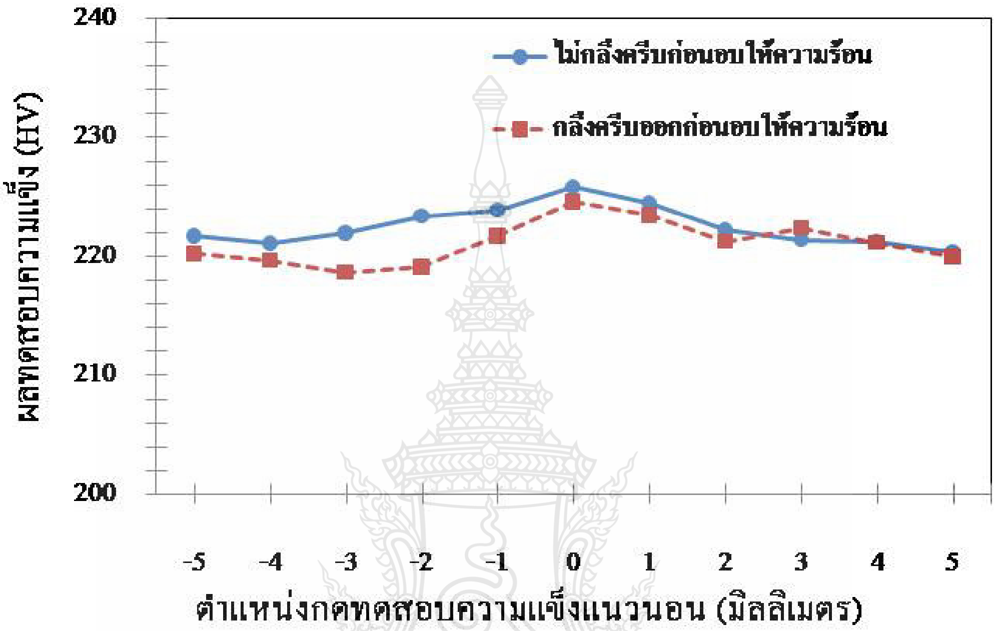
รูปที่ ก.2 ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงชิ้นงานทดสอบก่อนทำการทดลอง

รูปที่ ก.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงชิ้นงานกลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน (B) และชิ้นงานไม่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน (C) เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงโดยเฉลี่ยของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่อุณหภูมิปกติ (SD) และเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอบให้ความร้อนก่อนการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 (A) พบว่าชิ้นงานก่อนทำการทดลองไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดอยู่ที่ 662.93 MPa ค่าความต้านทานแรงดึงโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอบให้ความร้อนก่อนการเชื่อมอยู่ที่ 607.65 MPa เป็นอันดับที่สอง และชิ้นงานกลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อนและชิ้นงานไม่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อนมีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงใกล้เคียงกันอยู่ที่ 617.02 MPa และ 616.57 MPa ตามลำดับ

ก.2 ผลการทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนทั้งสองกลุ่มไปทำการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานตัวอย่าง แล้วทำการหล่อตัวเรือนด้วยเครื่องหล่อตัวเรือนชิ้นงาน เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบความแข็ง ทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Vicker Microhardness Test ตามมาตรฐาน ASTM E92 – 82 [7]

ทำการกดทดสอบชิ้นงานตามแนวนอน (Horizontal) ตัดขวางรอยเชื่อมทั้งหมด 11 จุดแต่ละจุดมีระยะห่างกัน 1 มิลลิเมตรโดยกำหนดจุดกึ่งกลางของชิ้นงานอยู่ที่จุดศูนย์กลางชิ้นงาน ซึ่งได้ผลการกดทดสอบความแข็งดังนี้



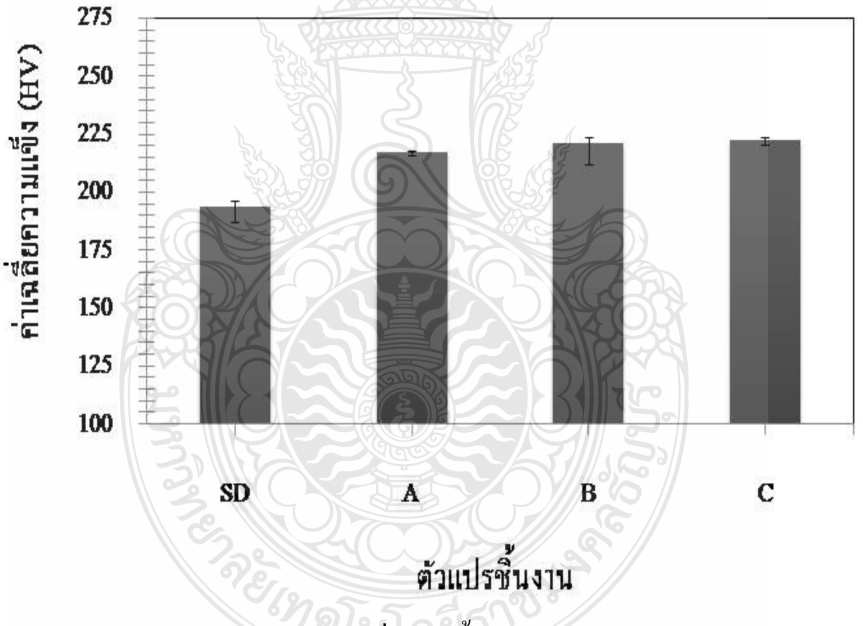
รูปที่ ก.3 ผลทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ไม่กลึงครีบก่อนอบให้ความร้อน และชิ้นงานที่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน

รูปที่ ก.3 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบความแข็งตรงตำแหน่งกดทดสอบของชิ้นงานที่ไม่กลึงครีบก่อนอบให้ความร้อน และชิ้นงานที่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน ผลการทดสอบพบว่าบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งกดทดสอบ 0 มีค่าความแข็งสูงสุดทั้งสองชิ้นงานทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบทั้งสองสามารถนำมาสรุปผลเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งโดยเฉลี่ยทั้งชิ้นงานทดสอบ ดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM E92 – 82 [7]

ชิ้นงาน	ผลการทดสอบความแข็ง (HV)	สภาวะการทดสอบ
SD = Standard AISI 1045	193.76	อุณหภูมิปกติ
A = อบให้ความร้อนก่อนเชื่อม	217.33	อุณหภูมิปกติ
B = กลึงครีบก่อนอบให้ความร้อน	221.05	อุณหภูมิปกติ
C = ไม่กลึงครีบก่อนอบให้ความร้อน	222.45	อุณหภูมิปกติ

จากตารางที่ ก.3 สามารถนำมาแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่กลึงครีบก่อนอบให้ความร้อน และชิ้นงานที่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน ก่อนทำการทดลอง ดังรูปที่ ก.4



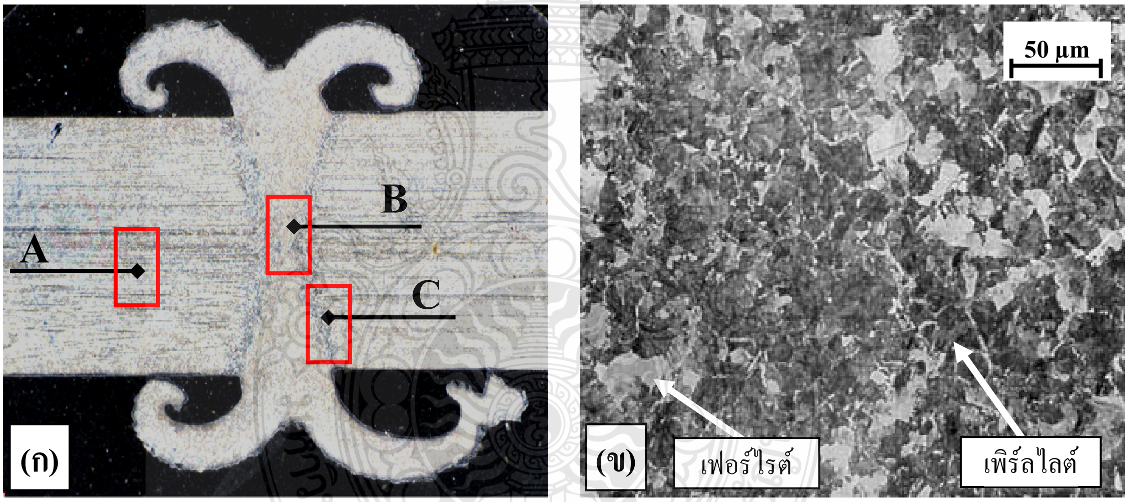
รูปที่ ก.4 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบก่อนทำการทดลอง

รูปที่ ก.4 ผลการทดสอบความแข็งชิ้นงานทดสอบก่อนทำการทดลอง นำมาเปรียบเทียบกันระหว่าง ผลการทดสอบความแข็งเหล็กกล้า AISI 1045 ที่อุณหภูมิปกติ (SD) ผลการทดสอบความแข็งเหล็ก AISI 1045 อบให้ความร้อนก่อนเชื่อม (A) ผลการทดสอบความแข็งเหล็กกล้า AISI 1045 กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน (B) และผลการทดสอบความแข็งเหล็กกล้า AISI 1045 ไม่กลึงครีบออก

ก่อนอบให้ความร้อน (C) การการเปรียบเทียบพบว่าค่าความแข็งเหล็กกล้า AISI 1045 ที่อุณหภูมิปกติ (SD) มีค่าความแข็งน้อยที่สุดอยู่ที่ 193.76 HV ค่าความแข็งชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนก่อนเชื่อม มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 217.33 HV และค่าความแข็งของชิ้นงานกลึงครีบออกก่อนอบอบให้ความร้อนและชิ้นงานไม่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อนมีค่าเฉลี่ยความแข็งโดยรวมใกล้เคียงกันอยู่ที่ 221.05 HV และ 222.45 HV ตามลำดับ

ก.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

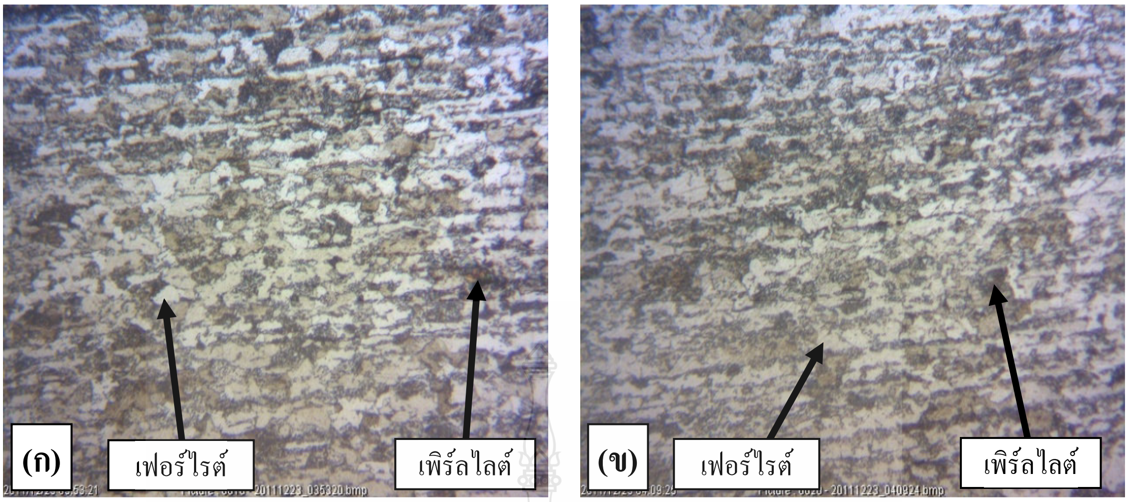
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 โดยทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณส่วนที่เป็นชิ้นงานเดิม ดังรูปที่ ก.5 (ก) ทั้งส่วนที่เป็นชิ้นงานกลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อนและชิ้นงานไม่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน



(ก) ตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

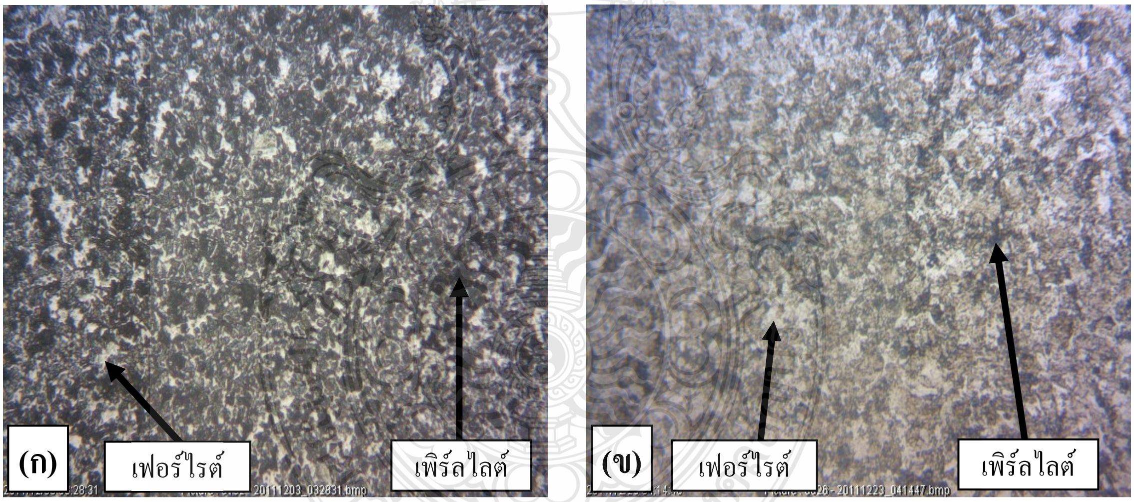
(ข) โครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045

รูปที่ ก.5 ตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1045



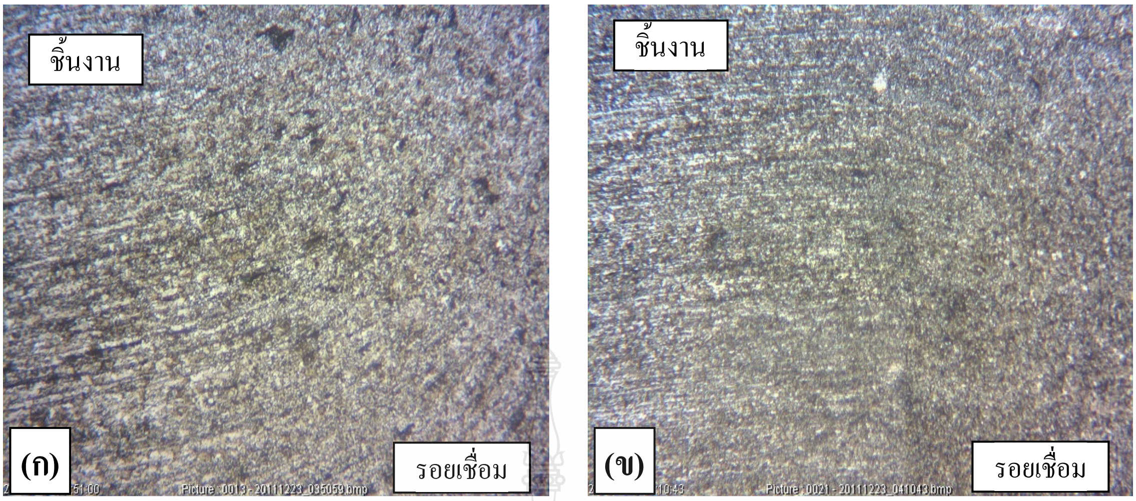
(ก) ชิ้นงานไม่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน (ข) ชิ้นงานกลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน

รูปที่ ก.6 โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งตรวจสอบ A กำลังขยาย 20 เท่า



(ก) ชิ้นงานไม่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน (ข) ชิ้นงานกลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน

รูปที่ ก.7 โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งตรวจสอบ B กำลังขยาย 20 เท่า



(ก) ชิ้นงานไม่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน (ข) ชิ้นงานกลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน

รูปที่ ก.8 โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งตรวจสอบ C กำลังขยาย 10 เท่า

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานไม่กลึงครีบออกก่อนอบอบให้ความร้อน และชิ้นงานกลึงครีบออกก่อนอบอบให้ความร้อนตรงตำแหน่งจุดตรวจสอบโครงสร้าง ดังรูป ก.5 (ก) พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณชิ้นงานเดิมนอกรอยเชื่อมตำแหน่งตรวจสอบโครงสร้าง (A) ยังคงเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งเหมือนกันกับโครงสร้างของเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานไม่ผ่านกระบวนการใดๆ ทั้งสิ้น ดังรูปที่ ก.5 (ข) โครงสร้างจุลภาคที่จุดตรวจสอบ (B) เป็นจุดตรวจสอบโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมตรงจุดศูนย์กลางชิ้นงาน ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังจากการอบให้ความร้อนหลังการเชื่อม พบว่าเกรนของโครงสร้างจุลภาคที่จุดตรวจสอบ (B) มีความละเอียดมากกว่าจุด (A) อาจกล่าวได้ว่าที่บริเวณจุดศูนย์กลางชิ้นงาน (B) เป็นจุดที่มีความเร็วรอบของชิ้นงานสูงที่สุดจึงทำให้เกิดความร้อนสูงประกอบกับแรงดันในการอัดที่กดให้ชิ้นงานทั้งสองยึดติดกัน ทำให้ขนาดเกรนบริเวณที่จุดตรวจสอบโครงสร้าง B มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงและความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่อบให้ความร้อนก่อนเชื่อม ซึ่งมีลักษณะเหมือนกันทั้งชิ้นงานไม่กลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อนและชิ้นงานกลึงครีบออกก่อนอบให้ความร้อน ลักษณะการเคลื่อนที่ของเนื้อวัสดุเมื่อได้รับความร้อนจนเนื้อวัสดุอ่อนนิ่ม ประกอบกันแรงดันในการเสียดทาน และแรงดันในการอัดที่กระทำกับชิ้นงานทั้งสองฝั่ง ทำให้เนื้อวัสดุด้านในพยายามเคลื่อนที่ออกมายังผิวรอบนอกชิ้นงานเชื่อมโดยรอบ เกิดเป็นครีบรอบๆ รอยเชื่อม ดังรูปที่ ก.1 (ก)

ก.4 สรุปผลการทดสอบวัสดุเหล็กกล้า AISI 1045 ก่อนทำการทดลอง (Pre Test)

จากทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ทดสอบความแข็ง และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่ตัวแปรเวลาในการเสียดทาน 4 วินาที เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการเสียดทาน 1.4 MPa แรงดันในการอัด 2 MPa ความเร็วรอบชิ้นงาน 1,800 รอบต่อนาที ทำการแบ่งชิ้นงานออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งทำการกลึงครีบออกก่อนทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่สองไม่ทำการกลึงครีบออกก่อนทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส พบว่าค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบทั้งสองกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกันที่ 617.02 MPa และ 616.57 MPa ตามลำดับ ผลการทดสอบความแข็งมีค่าเฉลี่ยความแข็งโดยรวมใกล้เคียงกันอยู่ที่ 221.05 HV และ 222.45 HV ตามลำดับ ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งสองกลุ่มยังคงเป็นโครงสร้างเดิมที่ประกอบด้วยเฟสเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite) เหมือนกัน จึงสรุปได้ว่าไม่ทำการกลึงครีบออกก่อนทำการอบให้ความร้อน เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด ลดขั้นตอนกระบวนการในการทดลอง ป้องกันการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคอันเกิดจากความร้อนในการตัดเฉือนของเครื่องมือตัด และรักษาลักษณะรูปลักษณ์เดิมหลังการเชื่อมเสียดทาน

ภาคผนวก ข
ตารางข้อมูลผลการทดสอบสมบัติทางกล

ข.1 ผลการวัดขนาดความกว้างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม

ตารางที่ ข.1.1 ผลการวัดขนาดความกว้างของรอยเชื่อม

ตัวแปร	ค่าที่วัดได้ (มม.)	ค่าเฉลี่ย
เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa	3.20 3.28 2.36 3.24 3.48 3.78 2.98 4.22 3.96 3.14 2.62 3.74 3.68 4.06 3.28 2.44 2.90 4.00 3.72 2.98 3.42 2.96 3.22 3.76	3.35
เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa	4.14 4.21 3.31 4.18 4.41 4.70 4.16 4.68 3.92 5.14 4.88 4.08 3.57 4.67 4.61 4.98 4.21 3.39 3.84 4.92 4.65 3.92 4.35 3.90	4.28
เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa	5.46 5.54 4.62 5.50 5.73 6.03 5.24 6.47 6.21 5.40 4.88 5.99 5.93 6.31 5.54 4.70 5.16 6.25 5.97 5.24 5.67 5.22 5.48 6.01	5.61
เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa	5.87 6.04 6.30 6.35 5.94 6.47 6.23 6.80 6.75 6.66 6.15 7.02 6.47 6.95 6.61 6.13 6.15 6.77 6.99 6.66 7.04 6.51 6.06 6.13	6.46
เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa	6.02 6.22 6.52 6.58 6.10 6.72 6.44 7.10 7.04 6.94 6.34 7.36 6.72 7.28 6.88 6.32 6.34 7.06 7.32 6. 7.38 6.76 6.24 6.32	6.71
เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa	7.16 7.31 7.19 7.52 7.30 7.78 7.35 8.16 8.04 7.71 7.17 8.17 7.75 8.22 7.72 7.09 7.26 8.07 8.14 7.66 8.07 7.54 7.30 7.53	7.63
เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa	7.53 7.68 7.57 7.89 7.68 8.16 7.72 8.54 8.42 8.08 7.54 8.54 8.13 8.60 8.09 7.47 7.63 8.44 8.51 8.03 8.45 7.91 7.68 7.90	8.01
เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa	10.56 10.50 10.08 10.58 10.39 10.96 10.72 11.68 11.19 10.84 10.41 11.72 11.20 11.73 10.88 10.26 10.55 11.60 11.70 10.75 11.65 10.86 10.41 10.62	10.91

ตารางที่ ข.1.2 ผลการวัดขนาดความกว้างของรอยเชื่อม (ต่อ)

ตัวแปร	ค่าที่วัดได้ (มม.)	ค่าเฉลี่ย
เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa	12.32 11.30 10.12 10.60 10.88 10.86 12.04 11.98 10.56 10.72 11.64 12.14 12.04 11.92 10.86 11.36 11.76 12.14 12.22 10.64 12.32 11.68 10.98 10.72	11.41

ตารางที่ ข.1.3 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม

ตัวแปร	ค่าที่วัดได้ (มม.)	ค่าเฉลี่ย
เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa	14.86 15.5 13.76 13.56 11.08 12.46 12.76 13.46 12.88 11.96 12.78 12.54 13.02 13.14 12.92 11.78 13.02 14.12 13.66 13.7 12.66 13.54 13.96 12.42	13.15
เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa	15.20 15.73 14.29 14.13 12.09 13.22 13.47 14.05 13.57 12.81 13.49 13.29 13.68 13.78 13.60 12.66 13.68 14.59 14.21 14.24 13.39 14.11 14.46 13.19	13.79
เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa	16.43 17.01 15.42 15.24 12.98 14.24 14.51 15.15 14.62 13.78 14.53 14.31 14.75 14.86 14.66 13.62 14.75 15.75 15.33 15.37 14.42 15.22 15.60 14.20	14.86
เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa	17.50 18.23 17.39 17.22 15.12 15.62 16.46 16.53 16.51 16.07 16.11 16.73 16.46 16.58 16.63 16.17 17.00 17.52 17.12 16.93 16.73 17.06 17.05 16.37	16.71

ตารางที่ ข.1.4 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อม (ต่อ)

ตัวแปร	ค่าที่วัดได้ (มม.)	ค่าเฉลี่ย
เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa	16.50 17.58 18.10 17.92 15.94 15.02 17.02 16.02 16.98 17.24 15.96 18.22 16.58 16.74 17.26 17.86 18.20 17.84 17.46 16.82 18.02 17.48 16.72 17.34	17.12
เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa	18.76 18.18 17.04 15.86 14.68 14.93 16.99 16.46 15.53 15.78 15.81 17.33 16.72 16.68 15.75 16.45 17.88 18.11 17.80 16.18 17.63 17.62 16.29 16.20	16.70
เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa	16.26 16.32 15.92 15.16 14.16 14.49 15.30 15.26 15.10 15.07 14.61 15.78 15.26 15.44 15.04 15.10 15.94 16.25 16.03 15.35 15.88 15.89 15.20 15.28	15.42
เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa	13.39 14.01 13.64 13.69 13.04 12.71 13.53 13.88 13.66 13.68 13.07 14.29 13.24 13.79 13.79 13.34 13.82 14.23 14.28 14.55 14.45 13.78 13.59 13.22	13.69
เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa	12.02 12.72 12.28 12.52 14.16 12.12 13.58 14.62 13.38 14.26 12.98 14.78 12.26 13.74 13.9 13.06 13.46 13.72 14.62 16.78 15.62 13.32 13.20 12.12	13.55

ข.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ข.2.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ข.2.1.1 ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานก่อนทำการทดลอง

เงื่อนไข / อุณหภูมิ (˚C)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)/ชิ้นที่			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
ชิ้นงานก่อนทำการทดลอง (สภาวะอุณหภูมิปกติ)	659.51	665.32	663.96	662.93
ชิ้นงานอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 790 ˚C	619.64	615.13	617.05	617.27
ชิ้นงานอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 870 ˚C	599.44	594.62	598.56	597.54
ชิ้นงานอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 ˚C	592.18	597.36	591.91	593.81

ตารางที่ ข.2.1.2 ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานอบให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045

ตัวแปรชิ้นงานเชื่อม			**ความต้านทานแรงดึง (MPa)**			**ค่าเฉลี่ย**
อุณหภูมิ (˚C)	**แรงดัน (MPa)**	**เวลา (วินาที)**	**1**	**2**	**3**	**(MPa)**
790	2	2	619.95	617.86	620.76	619.52
	3	3	612.34	615.53	618.32	615.40
	4	4	613.25	617.73	615.63	615.54
870	2	2	596.03	593.25	599.81	596.37
	3	3	595.83	600.81	594.04	596.90
	4	4	599.22	590.53	591.16	593.64
950	2	2	598.82	596.50	599.02	598.11
	3	3	593.25	595.24	588.28	592.25
	4	4	597.03	593.50	596.23	595.59

ข.2.2 ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ ข.2.2.1 ค่าความแข็งชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 ก่อนทำการทดลอง (สภาวะอุณหภูมิปกติ)

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV											เฉลี่ย
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	
1	192.11	192.86	193.19	194.47	195.56	197.68	193.63	193.46	194.66	190.89	195.36	193.99
2	195.44	191.65	192.18	194.05	191.79	193.23	190.48	192.36	190.14	194.94	195.21	192.86
3	193.78	191.40	194.68	192.76	193.67	195.46	196.06	192.91	196.40	193.81	197.79	194.43

ตารางที่ ข.2.2.2 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	219.05	221.24	223.27	227.15	229.11	231.95	224.54	222.02	218.32	217.92	208.19
2	222.16	223.97	226.26	228.49	230.06	233.44	228.68	224.18	220.14	199.81	210.24
3	222.17	224.83	226.86	229.89	230.77	229.58	223.37	220.31	217.11	216.93	209.03
เฉลี่ย	221.13	223.35	225.46	228.51	229.98	231.66	225.53	222.17	218.52	211.55	209.15

ตารางที่ ข.2.2.3 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 870 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	158.92	155.51	156.48	152.65	157.74	157.71	162.22	159.57	160.83	163.79	158.91
2	157.37	157.84	159.76	159.32	166.79	159.35	165.75	163.41	163.42	162.34	161.10
3	160.19	165.58	159.44	165.88	160.14	164.63	161.28	166.82	157.03	161.39	159.41
เฉลี่ย	158.77	159.60	158.50	159.23	161.43	160.53	163.03	163.23	160.4	162.53	159.80

ตารางที่ ข.2.2.4 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 950 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	160.16	166.42	159.67	161.91	162.56	164.91	159.82	154.47	152.27	151.43	155.51
2	160.13	160.71	159.42	161.93	161.80	160.74	160.84	165.58	163.71	160.07	157.25
3	161.76	158.44	158.49	156.74	162.41	161.86	157.53	163.77	154.42	159.31	156.66
เฉลี่ย	160.68	161.86	159.19	160.19	162.26	162.50	159.40	161.27	156.80	156.94	156.47

ตารางที่ ข.2.2.5 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	219.86	217.03	221.04	222.88	222.82	228.58	215.29	219.80	216.14	218.74	212.11
2	210.30	218.25	222.27	219.43	223.96	225.24	222.62	212.26	214.34	200.62	204.73
3	214.03	222.66	224.66	223.66	226.53	227.35	221.21	218.19	215.02	214.85	212.03
เฉลี่ย	214.73	219.31	222.66	221.99	224.43	227.06	219.71	216.75	215.17	211.40	209.62

ตารางที่ ข.2.2.6 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 870 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	151.01	152.74	150.67	146.99	151.88	151.85	156.18	156.21	163.45	160.02	153.00
2	153.24	153.69	155.56	155.13	162.38	158.16	161.37	159.10	159.11	158.06	156.86
3	154.54	159.72	153.82	160.00	154.49	158.80	155.59	160.91	151.51	155.69	153.79
เฉลี่ย	152.93	155.38	153.35	154.04	156.25	156.27	157.71	158.74	158.02	157.92	154.55

ตารางที่ ข.2.2.7 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 950 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	155.89	163.90	158.50	160.29	160.81	162.69	158.62	154.34	152.58	151.90	157.17
2	156.90	157.41	153.69	155.56	157.30	156.48	157.52	161.64	160.02	156.85	152.40
3	159.05	160.86	160.91	159.23	164.67	164.15	159.99	165.98	157.00	161.70	159.15
เฉลี่ย	157.28	160.72	157.70	158.36	160.93	161.10	158.71	160.65	156.53	156.82	156.24

ตารางที่ ข.2.2.8 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	211.89	212.83	215.62	219.05	220.78	223.29	226.74	214.52	211.25	210.90	202.30
2	216.47	217.23	221.48	220.67	225.22	228.54	223.86	219.44	211.46	195.48	205.73
3	218.49	220.86	222.67	221.37	226.15	225.09	224.56	216.84	211.99	213.83	206.80
เฉลี่ย	215.62	216.97	219.92	220.36	224.05	225.64	225.05	216.93	211.57	206.74	204.95

ตารางที่ ข.2.2.9 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 870 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	152.45	149.50	150.34	147.03	151.43	151.40	155.30	153.01	156.10	156.65	156.44
2	151.19	151.64	153.49	153.07	160.26	153.10	159.26	157.01	157.02	155.98	157.78
3	152.70	157.44	152.04	157.70	152.65	156.60	153.66	158.53	149.92	153.75	152.01
เฉลี่ย	152.11	152.86	151.96	152.60	154.78	153.70	156.07	156.18	154.34	155.46	155.41

ตารางที่ ข.2.2.10 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 950 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	156.82	161.20	155.40	155.32	157.88	159.90	155.53	150.93	147.04	148.31	151.82
2	156.68	157.23	156.01	156.38	158.26	157.26	157.35	155.83	156.06	156.62	153.96
3	157.48	154.45	154.50	150.91	158.07	157.57	153.63	156.30	150.80	146.25	152.83
เฉลี่ย	156.99	157.63	155.30	154.20	158.07	158.24	155.50	154.35	151.30	150.39	152.87

ตารางที่ ข.2.2.11 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	211.16	208.81	213.75	214.88	219.65	218.71	219.30	207.36	208.46	207.12	210.76
2	213.11	211.24	217.55	221.01	223.48	225.63	219.23	215.77	214.98	213.45	212.59
3	213.98	214.16	213.42	214.75	220.86	219.77	217.25	212.40	210.95	208.81	209.00
เฉลี่ย	212.75	211.40	214.91	216.88	221.33	221.37	218.60	211.84	211.46	209.79	210.79

ตารางที่ ข.2.2.12 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 870 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	161.41	163.11	163.65	161.87	163.95	163.67	163.59	163.80	166.61	165.32	163.12
2	153.20	154.46	158.51	162.05	155.42	163.69	169.70	167.08	166.63	168.46	166.84
3	160.85	158.13	160.00	160.87	158.87	162.34	164.75	164.76	157.52	155.69	158.88
เฉลี่ย	158.49	158.56	160.72	161.60	159.41	163.23	166.01	165.22	163.58	163.16	162.94

ตารางที่ ข.2.2.13 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 950 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	158.59	164.26	163.55	169.26	168.30	156.97	158.74	160.26	165.42	162.31	157.93
2	162.59	163.75	165.82	163.88	166.34	161.90	158.77	159.28	158.07	163.00	159.23
3	161.05	162.32	161.53	160.40	160.93	158.30	158.44	156.72	158.35	159.91	158.87
เฉลี่ย	160.74	163.44	163.63	164.51	165.19	159.06	158.65	158.75	160.62	161.74	158.68

ตารางที่ ข.2.2.14 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	209.31	208.96	211.96	213.11	214.91	217.02	212.52	205.44	206.56	205.19	204.83
2	207.25	208.54	212.30	216.22	219.03	221.48	214.21	210.27	209.37	207.64	206.66
3	215.12	215.34	214.43	216.08	218.68	222.27	214.23	213.17	211.38	208.74	208.98
เฉลี่ย	210.56	210.95	212.90	215.14	217.54	220.26	213.65	209.63	209.10	207.19	206.82

ตารางที่ ข.2.2.15 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 870 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	158.45	160.18	160.73	158.92	161.04	160.76	160.67	160.89	163.75	162.44	160.19
2	159.62	165.60	161.11	161.73	163.28	159.04	160.19	157.22	156.70	158.78	156.94
3	161.90	158.54	160.85	161.92	159.46	163.74	166.71	166.73	157.79	155.53	159.47
เฉลี่ย	159.99	161.44	160.90	160.86	161.26	161.18	162.52	161.61	159.41	158.92	158.87

ตารางที่ ข.2.2.16 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 950 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	158.82	158.41	157.53	162.11	158.46	164.22	157.76	158.41	156.14	157.23	154.30
2	161.32	162.75	165.31	162.91	165.95	160.47	156.61	157.24	155.74	161.83	157.17
3	162.15	163.72	162.74	161.35	162.00	158.75	158.92	156.80	158.82	160.74	159.46
เฉลี่ย	160.76	161.63	161.86	162.12	162.14	161.15	157.76	157.48	156.90	159.93	156.98

ตารางที่ ข.2.2.17 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	205.05	204.71	207.62	208.74	210.49	212.53	208.16	201.30	202.38	201.05	207.71
2	204.98	208.21	211.83	211.59	218.29	220.64	213.66	209.88	209.02	207.35	206.41
3	209.36	213.57	212.70	212.28	216.78	220.22	212.50	211.48	209.76	207.23	207.46
เฉลี่ย	206.46	208.83	210.72	210.87	215.18	217.80	211.44	207.55	207.05	205.21	207.19

ตารางที่ ข.2.2.18 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 870 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	157.03	158.70	160.24	161.48	159.54	159.27	159.18	159.39	162.17	158.90	156.71
2	159.26	165.00	160.69	162.28	162.77	158.70	159.80	156.95	156.45	156.45	154.68
3	159.64	156.44	158.64	163.65	157.32	161.38	164.20	154.22	155.73	153.58	157.33
เฉลี่ย	158.64	160.05	159.85	162.47	159.87	159.78	161.06	156.86	158.12	156.31	156.24

ตารางที่ ข.2.2.19 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 950 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	150.86	150.48	149.68	153.85	150.53	155.77	149.89	150.48	148.42	155.41	146.74
2	163.61	159.02	157.52	165.17	162.15	162.78	159.00	159.62	158.15	164.11	159.55
3	159.87	161.36	160.43	159.11	159.73	156.64	156.80	154.79	156.71	158.53	157.32
เฉลี่ย	158.11	156.95	155.88	159.38	157.47	158.40	155.23	154.96	154.42	159.35	154.54

ตารางที่ ข.2.2.20 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	201.75	203.44	205.70	220.63	220.83	222.45	211.83	209.79	221.28	216.76	214.09
2	203.13	202.75	209.02	210.09	211.00	219.77	209.39	209.25	207.75	206.27	204.16
3	205.69	206.66	207.48	207.46	208.85	209.57	209.80	208.36	207.97	206.93	205.82
เฉลี่ย	203.52	204.28	207.40	212.73	213.56	217.26	210.34	209.13	212.33	209.99	208.02

ตารางที่ ข.2.2.21 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 870 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	154.00	158.86	155.26	161.57	152.49	160.52	158.11	161.90	157.43	159.14	156.97
2	158.72	156.22	156.83	159.99	157.99	158.16	163.11	164.78	162.96	162.35	157.26
3	164.11	167.92	165.32	170.20	168.24	166.79	152.58	165.48	159.47	156.97	158.86
เฉลี่ย	158.94	161.00	159.13	163.92	159.57	161.83	157.93	164.05	159.96	159.49	157.69

ตารางที่ ข.2.2.22 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 2 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 950 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	152.20	150.87	159.36	160.49	159.93	158.21	162.35	159.25	160.23	163.52	152.49
2	149.31	147.55	163.45	160.17	164.14	157.43	161.46	160.03	156.94	157.80	155.76
3	157.49	154.73	151.16	154.96	150.56	158.83	159.66	158.18	163.03	158.34	154.66
เฉลี่ย	153.00	151.05	157.99	158.54	158.21	158.16	161.16	159.15	160.06	159.89	154.30

ตารางที่ ข.2.2.23 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	211.86	212.50	212.78	215.69	213.89	219.48	214.87	215.83	213.33	213.89	211.27
2	206.76	207.38	207.66	208.73	209.64	211.40	208.03	207.89	206.39	204.91	202.80
3	208.91	207.88	210.70	206.68	208.07	209.79	205.02	207.59	207.19	206.15	205.04
เฉลี่ย	209.18	209.26	210.38	210.37	210.53	213.56	209.31	210.43	208.97	208.31	206.37

ตารางที่ ข.2.2.24 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 870 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	152.20	157.04	153.45	159.74	150.70	151.69	156.29	152.10	153.63	154.34	153.16
2	156.93	154.42	155.03	158.21	156.20	159.40	161.33	156.99	161.18	160.57	155.47
3	153.12	156.94	164.33	159.22	167.25	165.81	151.59	154.49	158.48	155.97	150.86
เฉลี่ย	154.09	156.14	157.61	159.06	158.05	158.97	156.40	154.53	157.76	156.96	153.16

ตารางที่ ข.2.2.25 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 3 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 950 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	160.92	157.58	158.08	159.21	158.64	156.93	157.06	157.97	158.94	162.24	151.21
2	159.60	157.84	163.75	160.46	164.44	163.72	161.76	155.31	157.22	158.09	156.05
3	158.60	162.84	152.27	156.07	151.67	150.94	153.77	158.29	160.14	159.45	145.77
เฉลี่ย	159.71	159.42	158.03	158.58	158.25	157.20	157.53	157.19	158.77	159.93	151.01

ตารางที่ ข.2.2.26 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 790 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	210.55	212.94	212.29	213.11	213.29	214.72	214.17	214.13	213.68	209.68	207.32
2	203.26	203.82	204.07	205.03	205.85	204.74	204.40	204.27	202.92	201.59	199.69
3	201.60	202.47	203.21	203.19	204.44	205.09	205.30	204.01	203.65	202.71	201.71
เฉลี่ย	205.14	206.41	206.52	207.11	207.86	208.18	207.96	207.47	206.75	204.66	202.91

ตารางที่ ข.2.2.27 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 870 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	150.43	154.81	151.56	157.25	149.07	156.30	154.13	150.34	151.72	152.36	151.30
2	158.37	156.11	156.66	159.52	157.71	166.90	162.33	158.42	162.20	161.65	157.05
3	159.73	163.14	160.81	165.18	163.42	162.13	149.42	152.01	155.58	153.34	148.77
เฉลี่ย	156.18	158.02	156.34	160.65	156.73	161.78	155.29	153.59	156.50	155.78	152.37

ตารางที่ ข.2.2.28 ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้า AISI 1045 ที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 4 MPa อุณหภูมิอบให้ความร้อนที่ 950 องศาเซลเซียส

ระยะ (มม.) ชิ้นที่	ค่าความแข็ง HV										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	164.32	161.30	161.75	162.77	162.26	160.71	160.83	161.65	162.53	165.51	155.53
2	161.15	159.54	164.92	161.93	165.55	164.90	163.11	157.24	158.98	159.77	157.91
3	160.71	155.52	155.01	158.43	154.47	161.92	156.36	161.33	162.10	161.48	149.15
เฉลี่ย	162.06	158.79	160.56	161.04	160.76	162.51	160.10	160.07	161.20	162.25	154.20

ภาคผนวก ค

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 1045

品 質 證 明 書
MILL TEST CERTIFICATE

TAIWAN R.O.C.

客戶名稱 SOLD TO		產品名稱 TEST REPORT OF	磨光鋼棒 PRIME NEWLY PRODUCED COLD DRAWN STEEL ROUND BARS, OILED.				
規格名稱 SPEC.	JIS G4051 S45C	客戶編號 CUST ORDER NO.	913815	證明書日期 CERTIFICATE DATE		交運日期 SHIPPING DATE	
		產品編號 CUET ORDER NO.		發票號碼 INVOICE NO.		證明書編號 CERTIFICATE NO.	

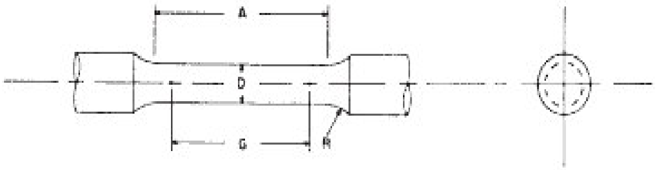
尺寸及規格 MATERIAL DESCRIPTION				爐號	拉力試驗 TENSILE TEST				化學成份 %												備註 REMARKS
直徑 DIA. mm/inch	長度 LENGTH (M)	數量 QTY (件)	重量 WEIGHT (KG)	HEAT NO	降伏強度 YIELD kgf/mm²	抗拉強度 TENSILE kgf/mm²	伸長率 ELONG %	硬度 HRB	C	MN	P	S	SI	CU	NI	CR	MO	V	AL	NB	
									X 100		X 1000		X 100					X100	X10	X100	
									42 48	60 90	30 MAX	35 MAX	15 35	30 MAX	20 MAX	20 MAX					
10	6	4	3788	3M169					47	75	21	9	21								

茲證明本表所列產品,均依材料規格製造及試驗,並符合規格之要求.
WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN MANUFACTURED AND TESTED WITH SATISFACTORY RESULTS IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENT OF THE ABOVE MATERIAL SPECIFICATION.

GENERAL QUALITY DEP.

ภาคผนวก ง

มาตรฐาน ASTM



Dimensions					
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard			
	in.	in.	in.	in.	in.
Nominal Diameter	0.500	0.350	0.250	0.160	0.113
G—Gage length	2.000 ± 0.005	1.400 ± 0.005	1.000 ± 0.005	0.640 ± 0.005	0.450 ± 0.005
D—Diameter (Note 1)	0.500 ± 0.010	0.350 ± 0.007	0.250 ± 0.005	0.160 ± 0.003	0.113 ± 0.002
R—Radius of fillet, min	⅜	¼	3⁄16	5⁄32	3⁄32
A—Length of reduced section, min (Note 2)	2¼	1¾	1¼	¾	⅝

NOTE 1—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 1 % larger in diameter than the center (controlling dimension).

NOTE 2—If desired, the length of the reduced section may be increased to accommodate an extensometer of any convenient gage length. Reference marks for the measurement of elongation should, nevertheless, be spaced at the indicated gage length.

NOTE 3—The gage length and fillets may be as shown, but the ends may be of any form to fit the holders of the testing machine in such a way that the load shall be axial (see Fig. 9). If the ends are to be held in wedge grips it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

NOTE 4—On the round specimens in Figs. 8 and 9, the gage lengths are equal to four times the nominal diameter. In some product specifications other specimens may be provided for, but unless the 4-to-1 ratio is maintained within dimensional tolerances, the elongation values may not be comparable with those obtained from the standard test specimen.

NOTE 5—The use of specimens smaller than 0.250-in. diameter shall be restricted to cases when the material to be tested is of insufficient size to obtain larger specimens or when all parties agree to their use for acceptance testing. Smaller specimens require suitable equipment and greater skill in both machining and testing.

NOTE 6—Five sizes of specimens often used have diameters of approximately 0.505, 0.357, 0.252, 0.160, and 0.113 in., the reason being to permit easy calculations of stress from loads, since the corresponding cross-sectional areas are equal or close to 0.200, 0.100, 0.0500, 0.0200, and 0.0100 in.^{2}, respectively. Thus, when the actual diameters agree with these values, the stresses (or strengths) may be computed using the simple multiplying factors 5, 10, 20, 50, and 100, respectively. (The metric equivalents of these five diameters do not result in correspondingly convenient cross-sectional areas and multiplying factors.)

FIG. 8 Standard 0.500-in. Round Tension Test Specimen with 2-in. Gage Length and Examples of Small-Size Specimens Proportional to the Standard Specimen

6.5.1 For material with a nominal thickness of 0.0005-0.1875 in., use the sheet-type specimen described in 6.3.

6.5.2 For material with a nominal thickness of 0.1875-0.500 in., use either the sheet-type specimen of 6.3 or the plate-type specimen of 6.2.

6.5.3 For material with a nominal thickness of 0.500–0.750 in., use either the sheet-type specimen of 6.3, the plate-type specimen of 6.2, or the largest practical size of round specimen described in 6.4.

6.5.4 For material with a nominal thickness of 0.750 in., or greater, use the plate-type specimen of paragraph 6.2 or the largest practical size of round specimen described in 6.4.

6.5.4.1 If the product specifications permit, material of a thickness of 0.750 in., or greater may be tested using a modified sheet-type specimen conforming to the configuration shown by Fig. 2. The thickness of this modified specimen must be machined to 0.400 +/- 0.020 in., and must be uniform within 0.004 in. throughout the reduced section. In the event of disagreement, a round specimen shall be used as the referee specimen.

6.6 *Specimens for Wire, Rod, and Bar*:

6.6.1 For round wire, rod, and bar, test specimens having the full cross-sectional area of the wire, rod, or bar shall be used wherever practicable. The gage length for the measurement of elongation of wire less than ⅛ in. in diameter shall be as prescribed in product specifications. In testing wire, rod, or bar that has a ⅛-in. or larger diameter, unless otherwise specified, a gage length equal to four times the diameter shall be used. The total length of the specimens shall be at least equal to the gage length plus the length of material required for the full use of the grips employed.

6.6.2 For wire of octagonal, hexagonal, or square cross section, for rod or bar of round cross section where the specimen required in 6.6.1 is not practicable, and for rod or bar of octagonal, hexagonal, or square cross section, one of the following types of specimens shall be used:

6.6.2.1 *Full Cross Section* (Note 10)—It is permissible to reduce the test section slightly with abrasive cloth or paper, or machine it sufficiently to ensure fracture within the gage marks. For material not exceeding 0.188 in. in diameter or distance between flats, the cross-sectional area may be reduced to not less than 90 % of the original area without changing the shape of the cross section. For material over 0.188 in. in diameter or distance between flats, the diameter or distance between flats may be reduced by not more than 0.010 in. without changing the shape of the cross section. Square, hexagonal, or octagonal wire or rod not exceeding 0.188 in. between flats may be turned to a round having a cross-sectional area not smaller than 90 % of the area of the maximum inscribed circle. Fillets, preferably with a radius of ⅜ in., but

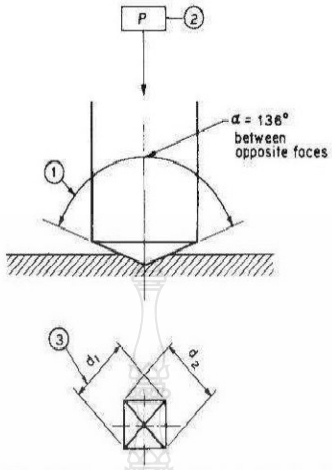


FIG. 1 Vickers Hardness Test (see Table 1)

TABLE 1 Symbols and Designations Associated with Fig. 1

Number	Symbol	Designation
1	...	Angle at the vertex of the pyramidal indenter (136°)
2	P	Test force in kilograms-force
3	d	Arithmetic mean of the two diagonals d^1 and d^2

TABLE 2 Vickers Hardness Numbers
(Diamond, 136° Face Angle, force of 1 kgf)

Diagonal of Impression, mm	Vickers Hardness Number for Diagonal Measured to 0.0001 mm									
	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.005	74 170	71 290	68 580	66 020	63 590	61 300	59 130	57 080	55 120	53 270
0.006	51 510	49 840	48 240	46 720	45 270	43 890	42 570	41 310	40 100	38 950
0.007	37 840	36 790	35 770	34 800	33 860	32 970	32 100	31 280	30 480	29 710
0.008	28 970	28 260	27 580	26 920	26 280	25 670	25 070	24 500	23 950	23 410
0.009	22 890	22 390	21 910	21 440	20 990	20 550	20 120	19 710	19 310	18 920
0.010	18 540	18 180	17 820	17 480	17 140	16 820	16 500	16 200	15 900	15 610
0.011	15 330	15 050	14 780	14 520	14 270	14 020	13 780	13 550	13 320	13 090
0.012	12 880	12 670	12 460	12 260	12 060	11 870	11 680	11 500	11 320	11 140
0.013	10 970	10 810	10 640	10 480	10 330	10 170	10 030	9 880	9 737	9 598
0.014	9 461	9 327	9 196	9 068	8 943	8 820	8 699	8 581	8 466	8 353
0.015	8 242	8 133	8 026	7 922	7 819	7 718	7 620	7 523	7 428	7 335
0.016	7 244	7 154	7 066	6 979	6 895	6 811	6 729	6 649	6 570	6 493
0.017	6 416	6 342	6 268	6 196	6 125	6 055	5 986	5 919	5 853	5 787
0.018	5 723	5 660	5 598	5 537	5 477	5 418	5 360	5 303	5 247	5 191
0.019	5 137	5 083	5 030	4 978	4 927	4 877	4 827	4 778	4 730	4 683
0.020	4 636	4 590	4 545	4 500	4 456	4 413	4 370	4 328	4 286	4 245
0.021	4 205	4 165	4 126	4 087	4 049	4 012	3 975	3 938	3 902	3 866
0.022	3 831	3 797	3 763	3 729	3 696	3 663	3 631	3 599	3 567	3 536
0.023	3 505	3 475	3 445	3 416	3 387	3 358	3 329	3 301	3 274	3 246
0.024	3 219	3 193	3 166	3 140	3 115	3 089	3 064	3 039	3 015	2 991
0.025	2 967	2 943	2 920	2 897	2 874	2 852	2 830	2 808	2 786	2 764
0.026	2 743	2 722	2 701	2 681	2 661	2 641	2 621	2 601	2 582	2 563
0.027	2 544	2 525	2 506	2 488	2 470	2 452	2 434	2 417	2 399	2 382
0.028	2 365	2 348	2 332	2 315	2 299	2 283	2 267	2 251	2 236	2 220
0.029	2 205	2 190	2 175	2 160	2 145	2 131	2 116	2 102	2 088	2 074
0.030	2 060	2 047	2 033	2 020	2 007	1 993	1 980	1 968	1 955	1 942
0.031	1 930	1 917	1 905	1 893	1 881	1 869	1 857	1 845	1 834	1 822
0.032	1 811	1 800	1 788	1 777	1 766	1 756	1 745	1 734	1 724	1 713
0.033	1 703	1 693	1 682	1 672	1 662	1 652	1 643	1 633	1 623	1 614

TABLE 2 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. (G)	$\bar{N}_A$		$\bar{A}$		$\bar{N}_L$ or $\bar{P}_L$ (mm^{-1})	$\bar{l}$	
	(No./in^2@ 100 ×)	(No./mm^2@ 1 ×)	(mm^2)	(µm^2)		(mm)	(µm)
00	0.25	3.88	0.2581	258100	2.210	0.4525	452.5
0	0.50	7.75	0.1290	129000	3.125	0.3200	320.0
0.5	0.71	10.96	0.0912	91200	3.716	0.2691	269.1
1.0	1.00	15.50	0.0645	64500	4.419	0.2263	226.3
1.5	1.41	21.92	0.0456	45600	5.256	0.1903	190.3
2.0	2.00	31.00	0.0323	32300	6.250	0.1600	160.0
2.5	2.83	43.84	0.0228	22800	7.433	0.1345	134.5
3.0	4.00	62.00	0.0161	16100	8.839	0.1131	113.1
3.5	5.66	87.68	0.0114	11400	10.511	0.09514	95.1
4.0	8.00	124.00	0.00806	8060	12.500	0.08000	80.0
4.5	11.31	175.36	0.00570	5700	14.865	0.06727	67.3
5.0	16.00	248.00	0.00403	4030	17.678	0.05657	56.6
5.5	22.63	350.73	0.00285	2850	21.023	0.04757	47.6
6.0	32.00	496.00	0.00202	2020	25.000	0.04000	40.0
6.5	45.25	701.45	0.00143	1430	29.730	0.03364	33.6
7.0	64.00	992.00	0.00101	1010	35.356	0.02828	28.3
7.5	90.51	1402.90	0.000713	713	42.045	0.02378	23.8
8.0	128.00	1984.00	0.000504	504	50.000	0.02000	20.0
8.5	181.02	2805.81	0.000356	356	59.461	0.01682	16.8
9.0	256.00	3968.01	0.000252	252	70.711	0.01414	14.1
9.5	362.04	5611.61	0.000178	178	84.090	0.01189	11.9
10.0	512.00	7936.02	0.000126	126	100.001	0.01000	10.0
10.5	724.08	11223.22	0.0000891	89.1	118.922	0.008409	8.4
11.0	1024.00	15872.03	0.0000630	63.0	141.423	0.007071	7.1
11.5	1448.15	22446.44	0.0000446	44.6	168.181	0.005946	5.9
12.0	2048.00	31744.06	0.0000315	31.5	200.002	0.005000	5.0
12.5	2896.31	44892.89	0.0000223	22.3	237.844	0.004204	4.2
13.0	4096.00	63488.13	0.0000158	15.8	282.845	0.003536	3.5
13.5	5792.62	89785.77	0.0000111	11.1	336.362	0.002973	3.0
14.0	8192.00	126976.25	0.0000079	7.9	400.004	0.002500	2.5

NOTE 1—$\bar{N}_A$ is the number of grains per unit area.
NOTE 2—$\bar{A}$ is the average grain area.
NOTE 3—$\bar{N}_L$ is the number of grains intercepted per unit length.
NOTE 4—$\bar{P}_L$ is the number of grain boundary intersections per unit length.
NOTE 5—$\bar{l}$ is the mean lineal intercept distance.
NOTE 6—$\bar{N}_L = \bar{P}_L$ for a single phase grain structure.
NOTE 7—The above table was calculated based upon the grain size definitions in Test Methods E 112.

TABLE 3 Grain Size Equations Relating Measured Parameters to the ASTM Grain Size, *G*

Determine the ASTM Grain Size, G, using the following equations:	
Equation	Units
1. $G = (3.321928 \text{ Log } \bar{N}_A) - 2.954$	$\bar{N}_A$ in mm^{-2}
2. $G = (6.643856 \text{ Log } \bar{N}_L) - 3.288$	$\bar{N}_L$ in mm^{-1}
3. $G = (6.643856 \text{ Log } \bar{P}_L) - 3.288$	$\bar{P}_L$ in mm^{-1}
4. $G = (-6.643856 \text{ Log } \bar{l}) - 3.288$	$\bar{l}$ in mm
5. $G = (-3.3223 \text{ Log } \bar{A}) - 2.955$	$\bar{A}$ in mm^2

NOTE 1—Equations 2 and 3 are for single phase grain structures.
NOTE 2—To convert micrometres to millimetres, divide by 1000.
NOTE 3—To convert square micrometres to square millimetres, divide by 10^6.
NOTE 4—A calculated G value of -1 corresponds to ASTM $G = 00$.

TABLE 4 95 % Confidence Interval Multipliers, t (Eq 13 and Eq 14)

No. of Fields, n^A	t multiplier	No. of Fields, n^A	t Multiplier
5	2.776	19	2.101
6	2.571	20	2.093
7	2.447	21	2.086
8	2.365	22	2.080
9	2.306	23	2.074
10	2.262	24	2.069
11	2.228	25	2.064
12	2.201	26	2.060
13	2.179	27	2.056
14	2.160	28	2.052
15	2.145	29	2.048
16	2.131	30	2.045
17	2.120	40	2.020
18	2.110	60	2.000
		∞	1.960

[A] or, number of grains, N.

14.7 For a duplex grain size distribution, the analysis is conducted as described in Appendix X2 of Test Methods E 1181.

15. Test Report

15.1 The report should document the identifying information regarding the specimen, its composition, specification designation or trade name, customer or data requester, date of analysis, heat treatment or processing history, specimen location and orientation, etchant and etch method, analysis method, and so forth, as required.

ภาคผนวก จ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ตามรอยพระยุคลบาท เกษตรศาสตร์กำแพงแสน
การประชุมวิชาการแห่งชาติ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
The 9th KU-KPS Conference ครั้งที่ 9
6-7 ธันวาคม 2555
บทคัดย่อ
Abstract

คณะกรรมการจัดสัมมนาวิชาการและจัดประชุมวิชาการแห่งชาติ

คณะกรรมการอำนวยการจัดประชุมวิชาการแห่งชาติ

ที่ปรึกษา	อธิการบดี
	ผู้ทรงคุณวุฒิพิเศษ นายศิริ ลียวัฒนานุพงศ์
	ผู้ทรงคุณวุฒิพิเศษ นายอุดร รัตนภักดิ์
ประธานกรรมการ	รองอธิการบดีวิทยาเขตกำแพงแสน
กรรมการและเลขานุการ	ผู้ช่วยรองอธิการบดีฝ่ายบริหารและประกันคุณภาพ วิทยาเขตกำแพงแสน
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ	ผู้อำนวยการสำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน
	ผู้อำนวยการกองธุรการ (กำแพงแสน)
ผู้ช่วยเลขานุการ	หัวหน้างานธุรการ กองธุรการ (กำแพงแสน)
	นางอุมากร วิสิฐอุดรการ
กรรมการ	ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายกิจการพิเศษและวิจัย วิทยาเขตกำแพงแสน
	ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายบริการวิชาการ วิทยาเขตกำแพงแสน
	ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายการศึกษาและวิเทศสัมพันธ์
	ผู้ช่วยรองอธิการบดีฝ่ายกิจการนิสิต กีฬา และศิลปวัฒนธรรม
	คณบดีคณะเกษตร กำแพงแสน
	คณบดีคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์
	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
	รองคณบดีคณะสัตวแพทยศาสตร์ กำแพงแสน
	คณบดีคณะศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์
	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์การกีฬา
	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน
	รองคณบดีวิทยาเขตกำแพงแสน บัณฑิตวิทยาลัย
	ผู้อำนวยการสถาบันสุวรรณวาจกกสิกิจฯ
	ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร
	ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมและฝึกอบรม กำแพงแสน
	ผู้อำนวยการศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว
	ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยควบคุมศัตรูพืชโดยชีวินทรีย์แห่งชาติ (ภาคกลาง)
	ผู้อำนวยการสำนักหอสมุด กำแพงแสน
	หัวหน้าสถานีวิจัยประมงกำแพงแสน

คณะกรรมการดำเนินงานจัดประชุมวิชาการแห่งชาติ

ที่ปรึกษา ผู้ทรงคุณวุฒิพิเศษ นายศิริ ลียวัฒนานุพงศ์

ผู้ทรงคุณวุฒิพิเศษ นายอุดร รัตนภักดิ์

ประธานกรรมการ รองอธิการบดีวิทยาเขตกำแพงแสน

กรรมการและเลขานุการ ผู้อำนวยการสำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน

กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ ผู้อำนวยการกองธุรการ (กำแพงแสน)

ผู้อำนวยการกองบริการการศึกษา (กำแพงแสน)

ผู้อำนวยการกองกิจการนิสิต (กำแพงแสน)

ผู้อำนวยการศูนย์กีฬา กำแพงแสน

ผู้อำนวยการกองอาคารสถานที่ (กำแพงแสน)

ผู้อำนวยการกองยานพาหนะภูมิทัศน์และสิ่งแวดล้อม (กำแพงแสน)

ผู้อำนวยการกองแผนงานและประกันคุณภาพ

ผู้อำนวยการกองทรัพย์สินและสิทธิประโยชน์

ผู้อำนวยการกองคลัง (กำแพงแสน)

ผู้อำนวยการทรัพยากรบุคคล

ผู้ช่วยเลขานุการ หัวหน้างานธุรการ กองธุรการ (กำแพงแสน)

นางอุมากร วิสิฐอุดรการ

นางปฏิญญา ชวนชม

กรรมการ ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายกิจการพิเศษและวิจัย วิทยาเขตกำแพงแสน

ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายบริการวิชาการ วิทยาเขตกำแพงแสน

ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายการศึกษาและวิเทศสัมพันธ์

ผู้ช่วยรองอธิการบดีฝ่ายบริหารและประกันคุณภาพ วิทยาเขตกำแพงแสน

ผู้ช่วยรองอธิการบดีฝ่ายกิจการนิสิต กีฬา และศิลปวัฒนธรรม

ประธานคณะกรรมการฝ่ายจัดหารายได้

(ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายบริการวิชาการ วิทยาเขตกำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายสถานที่ ยานพาหนะและรักษาความปลอดภัย

(ผู้ช่วยรองอธิการบดีฝ่ายบริหารและประกันคุณภาพ วิทยาเขตกำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายประเมินผล

(ผู้ช่วยรองอธิการบดีฝ่ายบริหารและประกันคุณภาพ วิทยาเขตกำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายเผยแพร่ผลงานนิสิต

(ผู้ช่วยรองอธิการบดีฝ่ายกิจการนิสิต กีฬา และศิลปวัฒนธรรม)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายจัดนิทรรศการหน่วยงานภาครัฐและเอกชน

(ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายบริการวิชาการ วิทยาเขตกำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายจัดสัมมนาและประชุมวิชาการ

(ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายการศึกษาและวิเทศสัมพันธ์)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายนิทรรศการงานวิจัยด้านพืช

และวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการเกษตร (คณบดีคณะเกษตร กำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายนิทรรศการงานวิจัยด้านวิศวกรรมศาสตร์

(คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายนิทรรศการงานวิจัยด้านการศึกษา และพัฒนาชุมชน

(คณบดีคณะศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายนิทรรศการงานวิจัยหอสมุด

(ผู้อำนวยการสำนักหอสมุด กำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายจัดการประกวดและแข่งขันระดับนักเรียน

(คณบดีคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายจัดแสดงและประกวดพืช

(คณบดีคณะเกษตร กำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายนิทรรศการงานวิจัยและประกวดสัตว์

(ผู้อำนวยการสถาบันสุวรรณวาจกกสิกิจเพื่อการค้นคว้าและพัฒนา

ปศุสัตว์และผลิตภัณฑ์สัตว์)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายนิทรรศการด้านสัตวแพทย์

(รองคณบดีคณะสัตวแพทยศาสตร์ กำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายจัดนิทรรศการด้านประมง

(หัวหน้าสถานีวิจัยประมง กำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายนิทรรศการด้านวิจัยและพัฒนา

(ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายบริการวิชาการและชุมชนสัมพันธ์

(ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมและฝึกอบรม กำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายพิธีการ และปฏิคม

(ผู้อำนวยการสำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายการเงิน

(ผู้อำนวยการสำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายศิลปวัฒนธรรมและบันเทิง

(ผู้ช่วยรองอธิการบดีฝ่ายกิจการนิสิต กีฬา และศิลปวัฒนธรรม)

ประธานคณะกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์

(ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายการศึกษาและวิเทศสัมพันธ์)

ผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

รองศาสตราจารย์ประเทือง อุษาบริสุทธิ์
รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล
รองศาสตราจารย์วิชา หมั่นทำการ
นายวันรัฐ อับดุลลากาซิม
นายวัชรพล ชยประเสริฐ
รองศาสตราจารย์บัญชา ขวัญยืน
รองศาสตราจารย์วราวุธ วุฒิวณิชย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศธร โสภาพันธุ์
นายสมชาย ดอนเจดีย์
นายจิระกานต์ ศิริวิชญ์ไมตรี
นายวิษุวัฒก์ แต้สมบัติ
รองศาสตราจารย์รังสินี โสธรวิทย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนต์ทิพย์ ช่ำชอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์รณฤทธิ์ ฤทธิรณ
นางสาวสุกัญญา วิชชุกิจ
นายณัฐดนัย ตัณฑ์วิรุฬห์
นายหทัยเทพ วงศ์สุวรรณ
นายปรีดา ปรากฏมาก
นายสุทธิพร เนียมหอม
นายกิติพงษ์ เจาจารึก
นายนันทวัฒน์ ขมหวาน
นางสาวปนัดดา กสิกิจวิวัฒน์
นายสมชาย ประยงค์พันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฐิติพงษ์ สถิรเมธีกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อมรฤทธิ์ พุทธิพิพัฒน์ขจร
นายกายรัฐ เจริญราษฎร์
นางสาวปาริฉัตร เสริมวุฒิสาร

ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

รองศาสตราจารย์ปารมนัส ศิริสมบูรณ์
รองศาสตราจารย์สาทิป รัตนภาสกร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรดิษฐ์ ตรูทัศนวินท์
นางสาวพนิดา บุษปฤกษ์
นางสาวเทวรัตน์ ทิพยวิมล
นายกระวี ตรีอำนรรค
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อารียา ฤทธิมา
นายวิชญ์ ศรีวงษา
นางพรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม
นายวัชระ เสือดี
นางสานิตย์ดา เตียวต๋อย
รองศาสตราจารย์ปานมนัส ศิริสมบูรณ์
รองศาสตราจารย์อัมพวัน ตั้นสกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นวภัทรา หนูนาค
รองศาสตราจารย์สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทศนพ กำเนิดทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปัณรสี ฤทธิประวัติ
นายปาษาณ กุลวานิช
นายประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนาดล คงสมบูรณ์
นายกิตติ ทรัพย์ประสม
นายทวิช พูลเงิน
นายนที สิริยานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรรณฤมล เต็มดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์รังสรรค์ ชัยศรีเจริญ
นายบุญเสริม แก้วกำเนิดพงษ์
นางสาวกลางใจ สิทธิถาวร
นายรวิศว์ บานชื่น

การออกแบบและสร้างโต๊ะเขียนผ้าบาติกที่ควบคุมอุณหภูมิโดยวงจรรีเลย์ 51
ระบบรักษาความปลอดภัยภายในบ้านพักอาศัยแบบไร้สายที่ใช้โมดูลสื่อสารซิกบี
ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์.. 53
กลยุทธ์การดำเนินงานสำหรับการผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดของระบบการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม
ในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ 55
การศึกษาอิทธิพลของการแปรพารามิเตอร์การกัดเจาะด้วยไฟฟ้าต่อคุณภาพของเหล็กกล้าเครื่องมือ..... 57
การกำจัดแบคทีเรีย Staphylococcus epidermidis ในอากาศด้วยแผ่นฟอกอากาศโฟโตคะตะไลติก ... 59
การศึกษาหาสภาวการทำงานที่เหมาะสมในด้านการประหยัดพลังงานของเครื่องดักฝุ่น
แบบถุงกรองในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ 61
การวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงของการผลิตสินค้าบกพร่องในโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์
โดยใช้ตัวแบบเชิงเส้นนัยทั่วไป (GLM) 63
การศึกษาอิทธิพลรัศมีและลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกรีดที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน
รูปถ้วยอลูมิเนียมด้วยกระบวนการหมุนขึ้นรูป 65
การปรับปรุงกระการผลิตด้วยการใช้เทคนิควิศวกรรมอุตสาหการกรณีศึกษา
โรงงานผลิตรองเท้าแบบฉีด 67
อิทธิพลของการอบอ่อนหลังการเชื่อมด้วยความเสียดทานเหล็ก AISI 1045 69
การศึกษาอิทธิพลความเร็วรอบแม่พิมพ์สปินนิ่งที่มีผลต่อการขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียม
ด้วยกระบวนการสปินนิ่ง 71
การศึกษาอิทธิพลรัศมีแม่สปินนิ่งที่มีผลต่อการขึ้นรูปถ้วยอลูมิเนียมด้วยกระบวนการสปินนิ่ง 73
อิทธิพลของการอบอ่อนที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็ก AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทาน 75
การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรพารามิเตอร์ต่อการเชื่อมความต้านทานแบบจุดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ
เกรด AISI 1010 กรณีศึกษาการเชื่อมแบบต่อเกย 3 ชั้น 77
การศึกษาสมบัติการไหลและการจำลองพฤติกรรมการไหลของยางคอมพาวนด์
ภายในช่องทางการไหลขนาดเล็ก 79

สาขาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

การควบคุมความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนและอัตราการบำบัดแอมโมเนีย
โดยตะกอนชีวภาพจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด 83
การเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Oxidation Pond
และ Extended Aeration Activated Sludge ของมหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา 85
ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนของเชื้ออนาม็อกบนตัวกลางชนิดต่างๆ
ในถังปฏิกรณ์ซีเควนซิ่งแบตช์ 87
ผลของอะซิเตตต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการอนาม็อกในถังปฏิกรณ์
แบบซีเควนนิ่งแบตซ์ที่มีตัวกลางสัมผัส 89

อิทธิพลของการอบอ่อนหลังการเชื่อมด้วยความเสียดทานเหล็ก AISI 1045

INFLUENCE OF ANNEALING AFTER FRICTIONWELDING AISI 1045 STEEL

วิษณุ แฟงเมือง[1], ศิริชัย ต่อสกุล[2]

Wisanu Fangmuang[1], Sirichai Torsakul[2]

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการอบอ่อนหลังการเชื่อมด้วยความเสียดทานเหล็ก AISI 1045 ซึ่งในการทดลองภายใต้เงื่อนไขการเชื่อมคือ แรงดันในการอัด 20 , 30 และ 40 บาร์ เวลาในการอัด 2 , 3 และ 4 วินาที ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการอบอ่อน 790 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานทดสอบแรงดึง ทดสอบความแข็ง และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณรอยเชื่อม หลังทำการวิเคราะห์ผลจากการเชื่อมด้วยความเสียดทาน พบว่าแนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงาน เพราะจากผลการทดสอบแรงดึงตำแหน่งที่ขาดออกจากกันอยู่นอกบริเวณแนวเชื่อมซึ่งอยู่ในส่วนของชิ้นงาน และค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานเชื่อมทั้ง 3 เงื่อนไขไม่แตกต่างกัน เวลาและแรงดันที่ใช้ในการอัดที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อความแข็งของแนวเชื่อม โดยเวลาและแรงดันในการอัดที่สูงขึ้นส่งผลให้ความแข็งของแนวเชื่อมลดลง โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมทุกเงื่อนไขในการทดลอง ไม่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากผลของการอบอ่อนหลังการเชื่อม เพราะการอบอ่อนทำให้โครงสร้างถูกปรับสภาพอยู่ในสภาวะที่สมดุล

คำสำคัญ : การเชื่อมด้วยความเสียดทาน , การอบอ่อน , เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

Abstract

The purpose of this paper was to study influence of annealing after friction welding of AISI 1045 steel with the experimental welding condition of 20, 30 and 40 bars compressor, compressing time for 2, 3 and 4 seconds, 1,800 rpm and annealing temperature of 790 degree Celsius. The work piece was tested for tensile stress, hardness and microstructure at the weld bead after the analysis of result of friction welding and it was found that the weld bead had more strength than the work piece since according to the result of tensile stress test, it was torn at the position outside the weld bead on the work piece and there was no difference of resistance value for tensile stress under 3 conditions. The increase of time and compressor used in compressing process affect the strength of weld bead by mean that the increase of time and compressor reduced the strength of weld bead. The structures of weld bead under all experimental conditions had no significant difference due to the result of

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

[1,2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110

annealing after welding since the annealing caused its structure to be reconditioned to produce balance of the structure.

Keywords: friction welding, annealing, medium carbon steel

E-mail address : Wisanu205@hotmail.com

คำนำ

การเชื่อมต่อวัสดุด้วยความเสียดทานเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ให้รอยเชื่อมที่ดี มีค่าความแข็งสูงเนื่องจากสามารถเชื่อมชิ้นงานได้ทั้งหน้าสัมผัส แตกต่างจากการเชื่อมด้วยวิธีการอื่นที่เชื่อมได้เฉพาะผิวด้านนอกเท่านั้นไม่สามารถซึมลึกเข้าถึงด้านในของชิ้นงานได้ อีกทั้งการเชื่อมโดยวิธีการอื่นนั้นต้องอาศัยช่างฝีมือที่มีทักษะ ความชำนาญ คุณสมบัติลวดเชื่อมก็มีส่วนสำคัญในการเชื่อม ซึ่งในการเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น จึงทำให้มีผู้สนใจศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยความเสียดทานมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งวัสดุที่นำมาเชื่อมด้วยความเสียดทานนั้นมีทั้งวัสดุชนิดเดียวกัน และวัสดุต่างชนิดกัน การศึกษาวิจัยเครื่องเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน [1] เวลาในการเสียดทาน [2] แรงดันและเวลาในการเชื่อม [3] ความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงาน [4] ตลอดจนการพัฒนาเทคนิคการเชื่อมแบบแรงเสียดทานสำหรับเชื่อมต่อโลหะ [5] และในเงื่อนไขอื่นที่กำลังศึกษาอยู่ ในส่วนของงานทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบอ่อนหลังการเชื่อมที่มีผลต่อรอยเชื่อมเหล็ก AISI 1045 และศึกษาในส่วนของอิทธิพลเวลาในการเสียดทาน แรงดันในการเสียดทาน โดยการทดลองนี้จะทำการทดสอบความแข็งที่จุดกึ่งกลางแนวนอนของชิ้นงาน ทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเพื่อหาขนาดของเกรน (Grain size) บริเวณรอยเชื่อม

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือและวิธีการศึกษา

ในการทดลองได้ใช้หลักการเชื่อมด้วยความเสียดทานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนความเสียดทานเป็นพลังงานความร้อนเพื่อให้ชิ้นงานสองชิ้นเชื่อมต่อกัน โดยในการเชื่อมจะจับยึดชิ้นงานด้านหนึ่งไม่ให้หมุน และชิ้นงานอีกด้านจะหมุนด้วยความเร็วรอบตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ จากนั้นเพิ่มแรงดันให้กับชิ้นงานฝั่งที่ไม่หมุนให้เกิดความเสียดทานกับชิ้นงานฝั่งที่กำลังหมุน โดยใช้เวลาในการเสียดทาน 4 วินาทีแรงดันในการเสียดทาน 14 bar จนเกิดความร้อนขึ้นบริเวณที่เสียดทานอุณหภูมิใกล้ถึงจุดหลอมละลายก่อนที่จะให้แรงดันในการอัดอัดชิ้นงานทั้งสองให้เกิดการเชื่อมประสานกันขึ้น โดยใช้เวลาในการอัดตามเงื่อนไขที่กำหนดเมื่อชิ้นงานทั้งสองชิ้นประสานรวมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วให้หยุดความเร็วในการหมุนทันที และปล่อยชิ้นงานให้เย็นตัวก่อนนำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึด ดังแสดงในรูปที่ 1

รูปที่ 1 แสดงลักษณะการจับยึดและเชื่อมด้วยความเสียดทาน [6]

เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

ในการทดลองครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้เครื่องกลึงยันศูนย์เป็นเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน และทำการออกแบบหัวจับและระบบแรงดันไฮดรอลิกส์ฝั่งชิ้นงานที่ไม่หมุนใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทาน เพื่อใช้ในการทดลองครั้งนี้ ซึ่งได้จัดสร้างขึ้นตามเงื่อนไขของการทดลอง ในการนำเครื่องกลึงยันศูนย์มาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมด้วยความเสียดทานนอกจากจะสามารถกำหนดความเร็วรอบในการหมุนได้แล้ว การหยุดชิ้นงานในทันทีทันใดก็สำคัญ ต้องอาศัยเครื่องกลึงที่ใช้ระบบมอเตอร์ชนิดมีเบรคแบบแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ Electromagnetic Brakes Motor ทำให้หยุดหัวจับได้โดยทันทีทันใด

รูปที่ 2 เครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้วัสดุที่เลือกใช้คือเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ทำการกลึงผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบ จำนวนสองชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 มาทำการเชื่อมต่อกันด้วยความเสียดทาน หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อกันแล้วไปทำการอบอ่อนเพื่อคลายความเครียดหรือเพื่อทำให้ความแข็งของชิ้นงานลดลงกลายเป็นเหล็กที่อ่อนนิ่ม

รูปที่ 3 ชิ้นงานเหล็ก AISI 1045 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร

วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดลองไว้ 6 เงื่อนไข คือ ความเร็วรอบ, แรงดันในการเสียดทาน, เวลาในการเสียดทาน, เวลาในการอัด, แรงดันในการอัด และอุณหภูมิในการอบอ่อน โดยค่าเงื่อนไขในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1

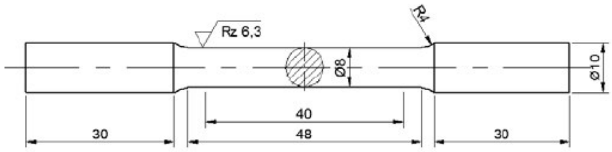
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลอง

รายการ	ค่าเงื่อนไข
ความเร็วรอบ	1,800 rpm
แรงดันในการเสียดทาน	14 bar
เวลาในการเสียดทาน	4 sec
เวลาในการอัด	2 , 3 , 4 sec
แรงดันในการอัด	20 , 30 , 40 bar
อุณหภูมิในการอบอ่อน	790 ̊ c

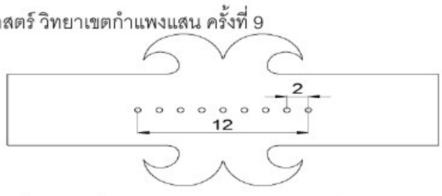
จากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดได้ความยาว 100 มิลลิเมตร ทำการกลึงผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบ จับยึดบนเครื่องเชื่อมด้วยความเสียดทาน และทำการเชื่อมตามเงื่อนไขทีละเงื่อนไข แสดงดังรูปที่ 4 เมื่อทำการเชื่อมเสร็จแต่ละเงื่อนไขนำชิ้นงานออกจากเครื่องเชื่อมแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมทดลองไปเข้าเตาอบชุบโลหะ ทำการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 790 ̊ c เวลารวม 2 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงในเตาอบชุบโลหะจนถึงอุณหภูมิห้อง

เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแล้วนำชิ้นงานที่ได้มาขึ้นรูปทำชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN 50125 Type A แสดงดังรูปที่ 5 และนำชิ้นงานบางส่วนไปเตรียมทำชิ้นทดสอบความแข็งรอยเชื่อมตามตำแหน่งที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 6 และเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

รูปที่ 4 แสดงลักษณะการจับยึดและเชื่อมชิ้นงาน



รูปที่ 5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 6 ตำแหน่งในการกดทดสอบความแข็ง (แนวนอน)

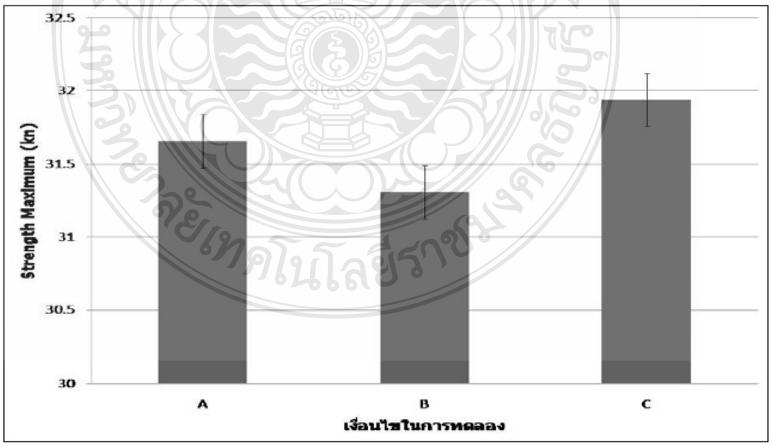
หลังจากเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงแล้ว นำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบแรงดึงเพื่อตรวจสอบค่าการรับแรงดึง และนำชิ้นทดสอบความแข็งเข้าเครื่องทดสอบความแข็ง ซึ่งในการทดสอบความแข็งจะใช้การทดสอบความแข็งแบบวิคเกอร์ โดยการทดสอบหาค่าความแข็งจะทดสอบบริเวณรอยเชื่อมและพื้นที่กระทบร้อน และนำชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคไปทำการตรวจสอบตามกระบวนการทางโลหะวิทยาแล้วถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคเพื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างและระบุขนาดเกรน (Grain size) ตามลำดับ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองที่ได้เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ผลค่าในการรับแรงดึง ค่าความแข็ง และลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

ผลการวิเคราะห์ค่าการรับแรงดึง

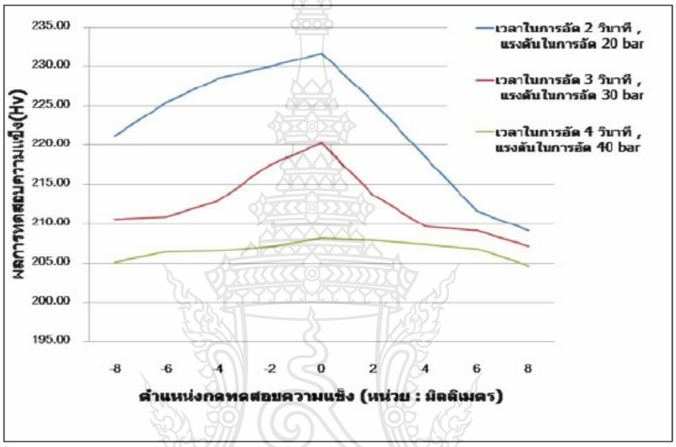
จากการทดลองพบว่า ค่าการรับแรงดึงของรอยเชื่อมชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 790 ° c เวลาในการอัดและแรงดันในการอัดต่างกัน ความแข็งแรงในการรับแรงดึงก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขที่ทดลอง ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลพบว่าค่าการรับแรงจะไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งค่าการรับแรงดึงที่ได้จากการทดลองที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 20 bar จะให้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ 31.66 kn ชิ้นงานที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 30 bar ให้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ 31.31 kn ส่วนชิ้นงานที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 40 bar ให้ค่าแรงดึงสูงสุด 31.94 kn แสดงดังรูปที่ 7



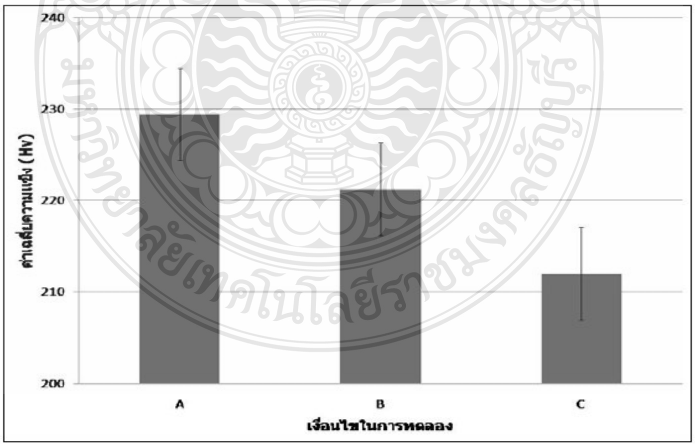
รูปที่ 7 เปรียบค่าการรับแรงดึงของชิ้นงานตามเงื่อนไข (A) เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 20 bar , (B) เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 30 bar และ (C) เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 40 bar

ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็ง

จากการวิเคราะห์ค่าความแข็งตรงตำแหน่งในการกดทดสอบพบว่าชิ้นงานเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 790°c เวลาในการอัดและแรงดันในการอัดที่แตกต่างกันส่งผลต่อความแข็งของรอยเชื่อม ซึ่งพบว่าเวลาในการอัดและแรงดันในการอัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งของรอยเชื่อมลดลง บริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งมากกว่าส่วนที่อยู่นอกบริเวณรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 20 bar ให้ค่าความแข็งที่ 229.44 Hv ชิ้นงานที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 30 bar ให้ค่าความแข็งที่ 221.25 Hv และชิ้นงานที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 40 bar ให้ค่าความแข็งที่ 212.02 Hv แสดงดังรูปที่ 9



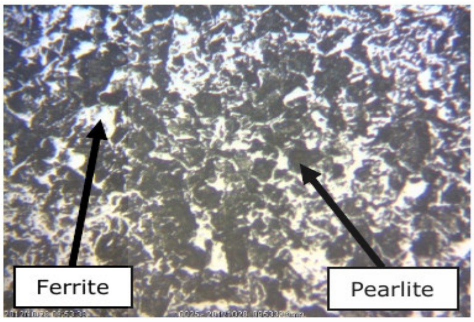
รูปที่ 8 ค่าความแข็งตรงตำแหน่งกดทดสอบความแข็งบริเวณรอยเชื่อมบนชิ้นงานทั้ง 3 เงื่อนไข



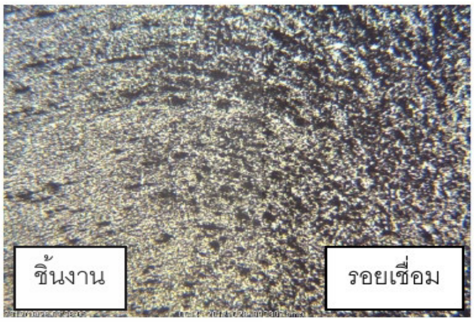
รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานตามเงื่อนไข (A) เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 20 bar , (B) เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 30 bar และ (C) เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 40 bar

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมด้วยความเสียดทาน พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานนอกรอยเชื่อมทุกเงื่อนไขในการทดลองไม่แตกต่างกันเนื่องจากผลของการอบอ่อนหลังการเชื่อม เพราะการอบอ่อนทำให้โครงสร้างถูกปรับสภาพให้เกิดความสมดุลของโครงสร้างจึงทำให้โครงสร้างของชิ้นงานแต่ละเงื่อนไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 10, 11 และ 12

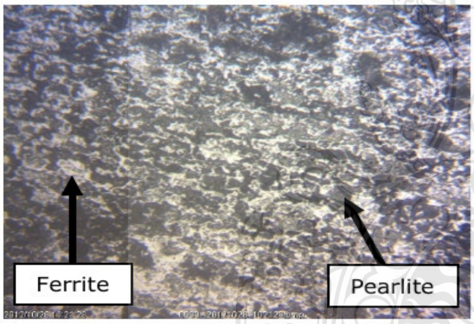


(ก) กำลังขยาย 20 เท่า บริเวณนอกรอยเชื่อม

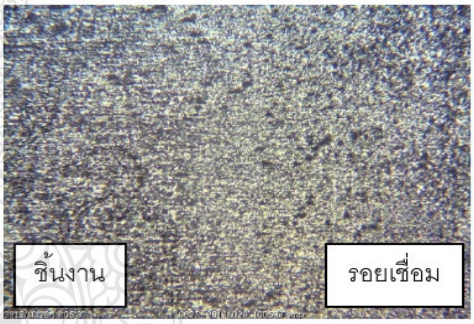


(ข) กำลังขยาย 5 เท่า บริเวณรอยเชื่อม

รูปที่ 10 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 20 bar

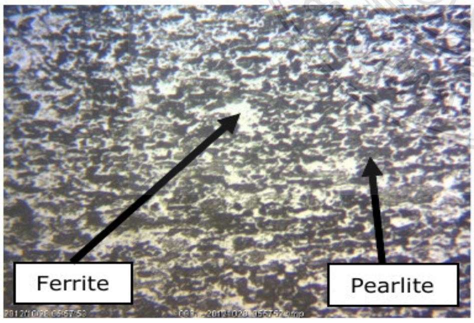


(ก) กำลังขยาย 20 เท่า บริเวณนอกรอยเชื่อม

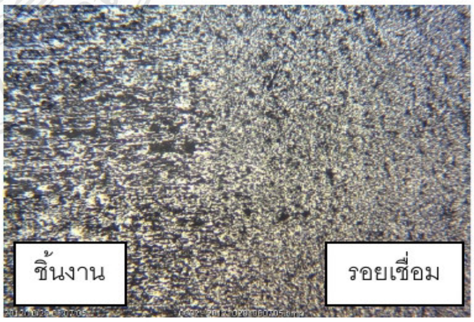


(ข) กำลังขยาย 5 เท่า บริเวณรอยเชื่อม

รูปที่ 11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 30 bar



(ก) กำลังขยาย 20 เท่า บริเวณนอกรอยเชื่อม



(ข) กำลังขยาย 5 เท่า บริเวณรอยเชื่อม

รูปที่ 12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่เวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 40 bar

สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 790° c หลังการเชื่อมด้วยความเสียดทานเหล็ก AISI 1045 ตามเงื่อนไขการทดลองที่เวลาในการอัด 2 วินาที แรงดันในการอัด 20 bar, เวลาในการอัด 3 วินาที แรงดันในการอัด 30 bar และเวลาในการอัด 4 วินาที แรงดันในการอัด 40 bar ได้ข้อมูลและผลการทดลองซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

1.แนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงาน เพราะจากผลการทดสอบแรงดึง ตำแหน่งที่ขาดออกจากกันจะอยู่นอกบริเวณรอยเชื่อมซึ่งอยู่ในส่วนของชิ้นงาน และค่าความต้านทานแรงดึงชิ้นงานเชื่อมทั้ง 3 เงื่อนไขไม่แตกต่างกัน

2.เวลาและแรงดันที่ใช้ในการอัดที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อความแข็งของรอยเชื่อมโดยเวลาที่ใช้ในการอัด และแรงดันที่สูงทำให้ความแข็งของแนวเชื่อมลดลง

3.โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมทุกเงื่อนไขในการทดลอง ไม่แตกต่างกันเนื่องจากผลของการอบอ่อนหลังการเชื่อม เพราะการอบอ่อนทำให้โครงสร้างถูกปรับสภาพให้เกิดความสมดุลของโครงสร้างจึงทำให้โครงสร้างของชิ้นงานแต่ละเงื่อนไขไม่แตกต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] สุรสิงห์ อารยางกูร, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์, และ ชูชาติ พยอม. 2552. คุณลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมของเหล็กคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลไทยครั้งที่ 23 ,เชียงใหม่, ประเทศไทย,4-7 พฤศจิกายน 2552

[2] Hascalik A. and Orhan,N (2007). "Effect of particle size on welding of Al_2o_3 reinforced 6160 Al alloy composite and SAE 1020 steel" Materials and Design.28: 313-317

[3] Ozdemir,N.,Sarailmaz,F. and Hascalik,A.(2007). "Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welding AISI 304L to 4340 steel" ,(Shot communication) Materials and Design.28:301-307.

[4] Ates, H., Turker, M. and Kurt,A. (2007). "Effect of friction pressure on the Friction – welded MA956 iron-basd superalloy",Material and Design.28:948-953

[5] อนันต์ พรหมสิทธิ. 2546. การพัฒนาเทคนิคการเชื่อมแบบแรงเสียดทานสำหรับเชื่อมต่อโลหะ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวัสดุศาสตร์. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[6] Sahin Mumin. 2547. Simulation of friction welding using a developed computer program Department of Mechanical Engineering, Trakya University.

ประวัติผู้เขียน

ประวัติผู้เขียน	นายวิษณุ แฟงเมือง
วัน เดือน ปีเกิด	8 กรกฎาคม 2528
ที่อยู่	เลขที่ 6 หมู่ที่ 8 ตำบลยางตาล อำเภอโกรกพระ จังหวัดนครสวรรค์ 60170
การศึกษา	
พ.ศ. 2551	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2552 – 2552	บริษัท แม็กซิส อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์หันตรา
โทรศัพท์	087-2055991
อีเมล์	Wisanu205@hotmail.com

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี