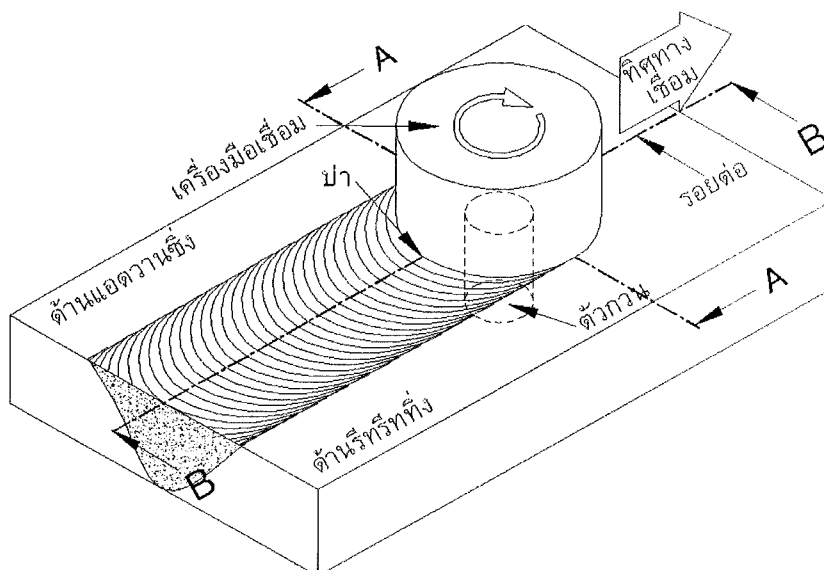


บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการต่อรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียม AA 6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 ไม่ได้มีรายงานการวิจัย ดังนั้นการค้นหาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมและโลหะวิทยาทั้งสองรวมไปถึงงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกันเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในบทนี้กล่าวถึง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง ผลการทดลองและการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองต่อไป [1]

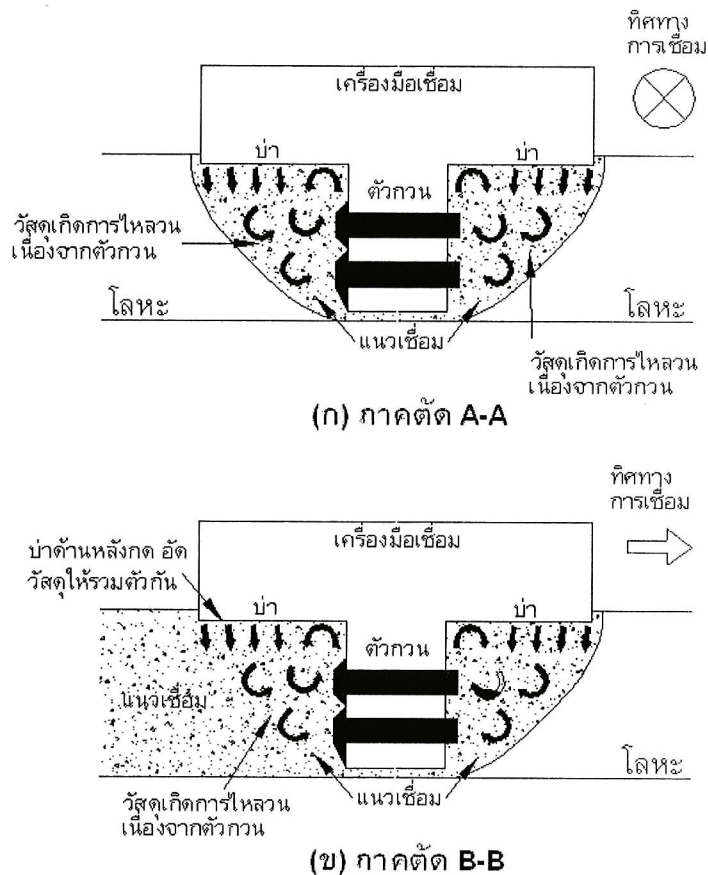
2.1 หลักการพื้นฐานการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมปัจจุบันเพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลายดั้งเดิม (Conventional Fusion Welding) เช่น อลูมิเนียมผสม [1] เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย FSW สามารถทำให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมมีค่าสูงในบริเวณแนวเชื่อม (Welded Zone) กระบวนการนี้ FSW ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ และเรือเดินสมุทร (Thomas and Nicolas, 1991) และปัจจุบันเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการเชื่อมโดยสังเขปดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (FSW) [1]

ตัวกวน (Probe or Stirrer) ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือเชื่อม (Rotating Tool) สอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งบ่า (Shoulder) ของเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและบ่าของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะคล้ายของไหล (Plastic Fluid-like State) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อมดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงภาคตัด A-A และ B-B ดังรูปที่ 2.2 แสดงวัสดุที่เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่ด้านบนของรอยต่อ และเกิดการกดเย็นลงมาเนื่องจากการกดของบ่าเครื่องมือทำให้วัสดุเกิดการไหลวน หรือเกิดการกวน (Stirring) ภายใต้บ่าขึ้นซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งที่ผู้คิดค้นกำหนดชื่อกระบวนการว่า “Friction Stir Welding” อย่างไรก็ตามคำจำกัดความในภาษาไทยในปัจจุบันยังไม่มีกำหนดขึ้น ดังนั้นผู้เขียนจึงขอใช้คำว่า “การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน” เพื่อการอธิบายเป็นเบื้องต้น



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดการรวมตัวของวัสดุ [1]

ขั้นตอนต่อไปเมื่อวัสดุที่อ่อนตัวเกิดการไหลวนแล้ว และเมื่อตัวกวนเกิดการไหลวนแล้ว และเมื่อวัสดุตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ วัสดุที่อ่อนตัวและเกิดการกวนอยู่ด้านหน้าของตัวกวนจะถูกถ่ายเทมา

ผู้ด้านหลังตามทิศทางการหมุนของตัวกวนทางด้านรีทริทิ่ง และบางส่วนจะไหลจากด้านหลังสู่ด้านหน้าทางด้านแอดวานซ์ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 (ด้านรีทริทิ่ง คือด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเชื่อม ขณะที่ด้านแอดวานซ์ คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนขนานกับทิศทางการเชื่อม) จากนั้นเมื่อวัสดุส่งผ่านรอบๆ ตัวกวนและตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ป่าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อมจะกดอัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อมดัง รูปที่ 2.1 และ 2.2 (ข)

2.2 ตัวแปรการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

รอยต่อของวัสดุที่เกิดจากการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เกิดจากการไหลตัวของวัสดุที่อ่อนตัวจากความร้อนเสียดทานและเกิดการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ ตัวแปรการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่บ่งชี้การเกิดขึ้นของการไหลอย่างมีประสิทธิภาพของวัสดุ และค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน ตัวแปรการเชื่อมที่สำคัญประกอบไปด้วย

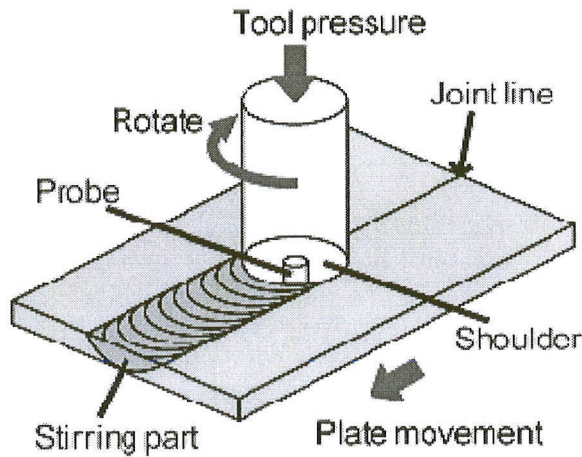
- 1) ความหนาของวัสดุ
- 2) ชนิดของรอยต่อ
- 3) ชนิดของวัสดุ
- 4) ตำแหน่งการวางแผ่นวัสดุ
- 5) รูปร่างของตัวกวน
- 6) ความเร็วรอบของตัวกวน
- 7) ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม
- 8) ความเอียงของตัวกวน

ในอดีตที่ผ่านมา มีการศึกษาถึงอิทธิพลตัวแปรบางตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของรอยต่อวัสดุต่างๆ เช่น Lee et al. รายงานว่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียมหล่อ A356 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคซิลิกอนเกิดการตกผลึกในสารละลายอลูมิเนียมและทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งแรงของสารละลาย (Solid Solution Hardening) ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อมีค่าสูงสุดมากกว่าค่าความแข็งแรงของอูมิเนียม 20% อย่างไรก็ตาม Ericson and Sandstrom. [11] พบว่าความแข็งแรงต่อความล้าของรอยต่อชนอลูมิเนียม A6082 มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินแนวเชื่อม โดยในรายงานไม่ได้ระบุถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมอาร์คด้วยลวดทังสเตน (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW) หรือการเชื่อมทิก (Metal Inert Gas : TIG) แล้ว รอยเชื่อม FSW มีค่าความต้านทานความล้ามากกว่า Lie et al. แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 2017-T351 ลดลงเมื่อระยะห่างการเคลื่อนที่ (Revolution Pitch or Welding Speed / Rotating Speed) มีค่าเพิ่มขึ้น และพื้นที่

รอบๆ การเกิดการกววนของวัสดุ คือพื้นที่ที่มีความแข็งต่ำสุดและเป็นตำแหน่งที่เกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบ จากตัวอย่างทั้ง 3 งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของรอยต่อของอลูมิเนียมด้วยเหตุนี้จึงมีความเป็นไปได้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม FSW เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดต่อไป [1]

2.3 กลไกสำคัญในการเชื่อมยึดอลูมิเนียมและเหล็ก

ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก ได้มีการรายงานกลไกการเชื่อม FSW ที่น่าสนใจ โดย Kimapong and Watanabe [2] รายงานเทคนิคการเชื่อมรอยต่ออลูมิเนียม A5083 และเหล็กกล้า SS400 ว่าในการสอดตัวกววนเข้าสู่แนวรอยต่อชนของแผ่นอลูมิเนียมและเหล็ก จะมีความแตกต่างจากการสอดตัวกววนเข้าสู่แนวต่อของการเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันดังรูปที่ 2.3 โดยการเชื่อมอลูมิเนียมผสมแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกววนจะต้องอยู่แนวเดียวกับแนวรอยต่อ (Butt Path) ของแนวเชื่อมขณะเดียวกันในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็ก การสอดตัวกววนที่แนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกววนและแนวรอยต่อเป็นแนวเดียวกันนั้นเป็นไปได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากจะทำให้เกิดการพังทลายของตัวกววน จึงจำเป็นต้องสอดตัวกววนลงไปในด้านของอลูมิเนียมก่อนและเคลื่อนผิวด้านข้างของตัวกววนเข้าสู่ด้านของเหล็กดังรูปที่ 2.3 การวางแผนของวัสดุนี้มีความสำคัญที่ต้องพิจารณาให้ดี เนื่องจากตามการรายงานของ Kimapong and Watanabe [2] ได้แสดงให้เห็นว่าเหล็กต้องวางอยู่ที่ด้านแอดวานซ์ซึ่ง (ด้านที่มีทิศทางการหมุนของตัวกววนและทิศทางการเดินแนวเชื่อมไปในทิศทางเดียวกัน) และแผ่นอลูมิเนียมต้องวางที่ด้านรีทริทติ้ง (ด้านที่มีทิศทางการหมุนของตัวกววนและทิศทางการเดินแนวเชื่อมสวนทางกัน) เท่านั้น เมื่อตัวกววนสอดเข้าไปในแผ่นอลูมิเนียมแล้ว ความร้อนเสียดทานที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างผิวของเครื่องมือเชื่อมทำให้อลูมิเนียมอ่อนตัวและเกิดการกววนอยู่ภายใต้ปาเครื่องมือเชื่อม เมื่อผิวด้านข้างของตัวเคลื่อนที่เข้าไปอยู่กับผิวรอยต่อของเหล็ก ชั้นออกไซด์ต่างๆ จะถูกขจัดให้หลุดออกไปทำให้ผิวบริเวณดังกล่าวเกิดการกระตุ้นและพร้อมจะรับการยึดเกาะจากวัสดุใดๆที่เคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งอลูมิเนียมที่อ่อนตัวที่เคลื่อนที่ภายใต้เครื่องมือเชื่อม คือวัสดุที่อยู่ใกล้กับผิวกระตุ้น ทำให้ถูกอัดดันเข้าไปสู่พื้นที่ดังกล่าวด้วยแรงหมุนและเกิดการเกาะยึดกับผิวของเหล็กต่อไป เทคนิคนี้เรียกว่าเทคนิคการกระตุ้นผิวของเหล็กเพื่อให้เกิดการเกาะยึด (Interface Activated – adhesion Technique) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งการเริ่มสอดตัวกวนเข้าสู่แนวรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก [1]

ขั้นตอนที่ 1 ตัวกวนที่หมุนสอดลงไปในพื้นที่งานจนกระทั่งปลายของตัวกวนอยู่ในตำแหน่งความลึกที่กำหนด ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างวัสดุและตัวกวนทำให้วัสดุรอบๆตัวกวนอ่อนตัวเข้าสู่ภาวะพลาสติกไหลคล้อยของไหล (Fluid-like Plastic State) อลูมิเนียมจะเกิดการเคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวน

ขั้นตอนที่ 2 ผิวของเหล็กภายใต้ปลายตัวกวนจะถูกขัดและกำจัดชั้นบางๆ บนผิวหน้าของเหล็กด้วยตัวกวนที่กำลังหมุน ส่วนของผิวหน้าเหล็กจะถูกดันขึ้นไปบนด้านอลูมิเนียมและมีลักษณะคล้ายกับครีบของปลา (Fin-like Shape) ผิวของเหล็กที่ติดกับตัวกวนที่หมุนจะเปลี่ยนสถานะเป็น “ผิวกระตุ้น (Activated Steel Surface)”

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อตัวกวนเริ่มเคลื่อนที่ตามทิศทางเดินแนวเชื่อมอลูมิเนียมจะถูกส่งผ่านรอบๆ ตัวกวนจากด้านหน้าของบ่าเครื่องมือสู่ด้านหลังของบ่าเครื่องมือ และเข้าสู่ช่องว่างระหว่างตัวกวนและครีบของเหล็กที่สร้างขึ้นและมีภาวะเป็นผิวกระตุ้นในขั้นตอนที่ 2 ทิศทางการเติมอลูมิเนียม จากนั้นผิวกระตุ้นของเหล็กดึงดูดอลูมิเนียมที่เคลื่อนที่ใกล้เคียงและเกิดการยึดเหนี่ยวกันระหว่างโลหะสองชนิดด้วยพันธะโลหะ (Metallic Bond)

ขั้นตอนที่ 4 ตัวกวนที่หมุนและเคลื่อนที่ตามทิศทางเดินแนวเชื่อมสร้างครีบของเหล็กขึ้นมาและเปลี่ยนสถานะเป็นผิวกระตุ้นเมื่อครีบอันอื่นๆ ถูกสร้างขึ้นและดันเข้าหาอลูมิเนียมและทำการเชื่อมยึดระหว่างโลหะทั้งสองขึ้น [1]

2.4 โลหะวิทยาพื้นฐานของอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม

2.4.1 อลูมิเนียม

อลูมิเนียมเป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับสองของโลก [3] และเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมในปัจจุบัน สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอลูมิเนียมแสดงไว้ในตาราง

ที่ 2.1 อลูมิเนียมมีความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือประมาณหนึ่งในสามส่วนของ เหล็กกล้า (7.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมใน บรรยากาศน้ำทะเล ปิโตรเลียม และระบบเคมีอื่นๆ ผิวของอลูมิเนียมมีความสะท้อนแสงสูงอลูมิเนียม มีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักมีค่าสูงกว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel) อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดถึง 90 MPa และความแข็งแรงดึงสามารถเพิ่มขึ้นถึง 680 MPa เมื่อทำการขึ้นรูปเป็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์

1) ประเภทของอลูมิเนียม

จากสมบัติที่หลากหลายของอลูมิเนียมที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงได้มีการแบ่งประเภท ของอลูมิเนียมตามกรรมวิธีการผลิตได้ดังนี้

- อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure aluminum) มีเปอร์เซ็นต์ของอลูมิเนียมอยู่ถึง 99.00 % และมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่อีก 1% เช่น เหล็กและซิลิคอน หรือไม่มีส่วนผสมอื่นๆ อยู่เลย อลูมิเนียมชนิด นี้ใช้ในงานขึ้นรูปได้ดี ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [5]

สัญลักษณ์	Al
หมายเลขอะตอม	13
ความถ่วงจำเพาะ	2.7
โครงสร้างผลึก	FCC
จุดหลอมเหลว	660°C
โมดูลัสยืดหยุ่น	69,000 MPa
สินแร่	บอกไซต์ (สารมลทินผสมระหว่าง Al_2O_3 และ $Al(OH)_3$)
ธาตุผสม	Cu, Mg, Mn, Si, Zn
การใช้งาน	บรรจุภัณฑ์ อลูมิเนียมแผ่นบาง ตัวนำไฟฟ้า หม้อ กระทะ ชิ้นส่วน โครงสร้างยานอวกาศ รถยนต์ หรือชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา

- อลูมิเนียมผสม (Wrought aluminum) คือ อลูมิเนียมที่มีธาตุอื่นผสมอยู่ตั้งแต่ หนึ่งธาตุขึ้นไปทำให้มีความคงทนต่อแรงดึงสูง ธาตุที่ผสมอยู่ในอลูมิเนียม ได้แก่ ทองแดง แมงกานีส แมกนีเซียม โครเมียม สังกะสี และนิกเกิล ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของอลูมิเนียมผสม [5]

รหัส	ส่วนผสมทางเคมี(%)						การอบ	ความแข็งแรง (MPa)	%การ ยืดตัว
	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si			
1050	99.5	-	0.4	-	-	0.3	O	76	39
							H18	159	7
1100	99.0	-	0.6	-	-	0.3	O	90	40
							H18	165	10
2024	93.5	4.4	0.5	1.5	0.6	0.5	O	185	20
							T3	485	18
3034	96.5	0.3	0.7	1.0	1.2	0.3	O	180	22
							H36	260	7
4043	96.6	0.3	0.8	-	-	5.2	O	130	25
							H18	285	1
5050	96.9	0.2	0.8	1.4	0.1	0.4	O	125	18
							H38	200	3
6063	98.5	0.1	0.3	0.7	-	0.4	O	90	25
							T4	172	20

● อลูมิเนียมหล่อ (Cast aluminum) อลูมิเนียมชนิดนี้ได้จากกรรมวิธีการหล่อ 3 แบบใหญ่ๆ คือ หล่อทราย หล่อแบบถาวร และหล่อแบบอัดฉีด (Die Cast) ซึ่งอลูมิเนียมหล่อสามารถที่จะทำการเชื่อมได้แต่ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ โดยก่อนการเชื่อมจะต้องทำการอุ่นชิ้นงานเสียก่อน เพื่อป้องกันการสูญเสียสมบัติของมันเอง ข้อเสียของอลูมิเนียมหล่อ คือสมบัติทางกลด้อยกว่าอลูมิเนียมเหนียว [4]

2) สมบัติทางกล

สมบัติทางกล คือสมบัติที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระทำ สมบัติเหล่านี้ปกติจะอธิบายด้วยเทอมที่เกี่ยวข้องกับแรงเค้นและความเครียดหรือทั้งสองเทอม

- ความแข็งแรง (Tensile strength) 8-10 kg/mm²
- พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) 3 kg/mm²
- อัตราการยืดตัว (Percent elongation) 40-45 %
- ความแข็ง (Hardness) 16-20 HB.

- โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) 7800 kg/mm^2
- มีความเหนียวมาก สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่ายและรุนแรงโดยไม่

เสี่ยงต่อการแตกหัก [4]

3) สมบัติเชิงกายภาพ

สมบัติเชิงกายภาพ คือลักษณะของพื้นผิว สี กลิ่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด ความหนาแน่น ของสารละลาย ขี้ และอื่นๆ

- มีความหนาแน่นน้อย มีน้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูง (Strength to weight ratio) จึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้ไม้สอยตลอดจนชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด จีปนาอูท และอุปกรณ์ในรถยนต์เพื่อลดน้ำหนักของรถให้น้อยลงจะได้ประหยัดเชื้อเพลิง

- จุดหลอมเหลวต่ำ หลอมง่าย
- ค่าการนำไฟฟ้าคิดเป็น 64.94% (International Annealed Copper Standard:

IACS) ซึ่งไม่สูงมากนัก แต่เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ดังนั้นจึงใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในกรณีที่คำนึงถึงเรื่องน้ำหนักเบาเป็นส่วนสำคัญ

- เป็นโลหะไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ (Nontoxic) และมีค่าการนำความร้อนสูง ใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหารและห้องรับอาหาร
- ผิวหน้าอลูมิเนียมบริสุทธิ์มีดัชนีการสะท้อนกลับของสูงมาก จึงใช้ทำแผ่นสะท้อนในแฟลชถ่ายรูป งานสะท้อนแสงในโคมไฟฟ้า ไฟหน้ารถยนต์
- ทนทานต่อการเกิดสนิมและการผุกร่อนในบรรยากาศที่ใช้งานโดยทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนทานการกัดกร่อนในกรณีที่ชั้นผิวออกไซด์ถูกสารละลายที่สามารถละลายชั้นผิวออกไซด์ได้ เช่น ค่างเข้มข้น ปูนขาวสด และหินปูนก่อสร้าง

2.4.2 เหล็กกล้าไร้สนิม

สเตนเลส ตามศัพท์บัญญัติเรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 2%) มีส่วนผสมของโครเมียมอย่างน้อย 10.5% เมื่อนักวิทยาศาสตร์พบว่าการเติมนิเกิล โมลิบดีนัม ไททาเนียม ไนโอเนียม หรือโลหะอื่นแตกต่างกันไปตามชนิดของคุณสมบัติเชิงกลและการใช้ลงในเหล็กกล้าธรรมดา ทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการเกิดสนิมได้ [5] จุดประสงค์หลักในการเติมโครเมียม เพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อน (Corrosion) ในเหล็กกล้า โครเมียมในเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มบางๆ ของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เคลือบที่ผิวป้องกันไม่ให้ออกซิเจนสัมผัสกับผิวหน้าของเหล็กจึงไม่เกิดการกัดกร่อนขึ้น นอกจากนั้นจากการเติมโครเมียมสูงทำให้ความแข็งแรงและความเหนียวเนื่องจากแรงดึงขึ้น ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีและกลสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม [5]

ชนิด	ส่วนผสมทางเคมี(%)					ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)	%การยึดตัว
	Cr	Ni	C	Mn	อื่นๆ		
เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก							
301	17.0	7.0	0.15	2.0	-	620	40
302	18.0	8.0	0.15	2.0	-	515	40
304	18.0	8.0	0.08	2.0	-	515	4
309	23.0	13.0	0.15		-	515	
316	17.0	12.0	0.08	2.0	2.5	515	
เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก							
405	13.0	-	0.08	1	-	415	20
430	17.0	-	0.12	1	-	415	20
เหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิติค							
403	12	-	0.15	1	-	485	20
เหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิติค							
403 ^b	12	-	0.15	1	-	825	12
416	13	-	0.15	1	-	485	20
416 ^b	13	-	0.15	1	-	965	10
440	17	-	0.65	1	-	725	20

หมายเหตุ ^b คือ การอบชุบด้วยความร้อน

1) ประเภทของโลหะผสม

- เบอร์ 304 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมพื้นฐานที่ใช้ในการตกแต่งเพื่อความสวยงาม เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ง่ายต่อการขึ้นรูปและป้องกันการเกิดสนิมได้เป็นอย่างดี
- เบอร์ 304L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304 ที่ใช้คาร์บอนเป็นส่วนประกอบน้อยลงมาใช้ในการเชื่อมอย่างกว้างขวาง
- เบอร์ 316 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกออกแบบให้มาป้องกันการเกิดสนิมได้เป็นอย่างดี ถูกใช้ในงานอุตสาหกรรมหนักและสถานที่ใกล้ทะเล
- เบอร์ 316L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316 ที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนน้อย
- เบอร์ 430 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้โครเมียมเป็นส่วนประกอบ 100% และมี

โอกาสเกิดสนิมน้อยกว่าเบอร์ 300 พวกนี้นิยมใช้ตกแต่งภายใน [6]

2) สมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ใน ส่วนของคุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อนความสามารถทนความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม มีข้อสังเกต 3 ประการคือ

- การที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีอัตราความคืบตี เมื่อเทียบกับเซรามิกที่ อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส
- การที่มีค่านำความร้อนระดับปานกลาง ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องทนความร้อน (คอนเทนเนอร์) หรือต้องการคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี (เครื่องถ่ายเทความร้อน)
- การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลาง จึงสามารถใช้ความยาวมาก ๆ ได้โดยใช้ตัวเชื่อมน้อย (เช่น ในการทำหลังคา) [6]

3) สมบัติเชิงกล

เหล็กกล้าไร้สนิม โดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของเหล็กประมาณ 70-80% จึงทำให้มีสมบัติของเหล็กที่สำคัญ 2 ประการคือ ความแข็งและความแกร่ง จะเห็นว่าพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมีความแข็งแรง และโมดูลัส ความยืดหยุ่นต่ำ ส่วนเซรามิกมีความแข็งแรงและความเหนียวสูงแต่มีความแกร่งหรือความสามารถรับแรงกระแทกโดยไม่แตกหักต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิม ให้ค่าที่เป็นกลางของทั้งความแข็ง ความแกร่ง และความเหนียว เนื่องจากมีส่วนผสมของธาตุเหล็กอยู่มาก

โลหะทุกชนิดทั่วไปจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์บนผิวโลหะหรือออกไซด์ที่เกิดบนผิวเหล็กทั่วไปจะทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์และทำให้เกิดสภาพพื้นผิวเหล็กผุกร่อน ที่เราเรียกว่า เป็นสนิม แต่เหล็กกล้าไร้สนิม มีโครเมียมผสมอยู่ 10.5% ขึ้นไป ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นฟิล์มปกป้อง หรือพลาสติกพาสซีฟ (Passive Layer) ที่เหมือนเกราะป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า พาสซีวิตี (Passivity) ฟิล์มปกป้องนี้จะมีขนาดบางมาก (สำหรับแผ่นสเตนเลสบางขนาด 1 มม. ฟิล์มหรือพาสซีฟ เลเยอร์นี้ จะมีความบางเทียบเท่ากับวาทะดาศ 1 แผ่น บนตึกสูง 20 ชั้น) และมองตาเปล่าไม่เห็นฟิล์มนี้จะเกาะติดแน่น และทำหน้าที่ปกป้องสเตนเลส จากการกัดกร่อนทั้งหมดหากนำไปผลิตแปรรูปหรือใช้งานในสภาพเหมาะสม เมื่อเกิดมีการขีดข่วน ฟิล์มปกป้องนี้จะสร้างขึ้นใหม่ได้เองตลอดเวลา

ความคงทนของพาสซีฟเลเยอร์ เป็นปัจจัยหลักของความต้านทานการกัดกร่อนของสเตนเลส นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพการกัดกร่อนอันได้แก่ ความรุนแรง ของปฏิกิริยาออกซิไดซ์ ความเป็นกรดปริมาณสารละลายคลอไรด์ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณ โครเมียมจะช่วยเพิ่มความต้านทาน การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม การเติมนิเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัด

กร่อนโดยทั่วไป ให้ทนสภาวะกัดกร่อนรุนแรงได้ส่วนโมลิบดีนัมจะช่วยเพิ่ม ความต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะที่ เช่นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) [6]

2.5 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบโดยการดึงเป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายที่สุด ในวิธีของการทดสอบหาสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นสมบัติทางกลด้านพื้นฐานพอสมควร เช่น ความต้านทานแรงดึง ความยืดตัว และความเปราะ ซึ่งเป็นข้อสำคัญที่สุดและเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบวิธีการทดสอบทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงดังรูปที่ 2.4 โดยชิ้นทดสอบมาตรฐานจะถูกดึงด้วยแรงที่กำหนดทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปร่างกระทั่งพังทลาย ในการทดสอบแรงดึงอ้างอิงดังรูปที่ 2.4 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังแสดงในสมการที่ 2.1 ถึง 2.5 ดังนี้ [7]



$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

$$e_t = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (2.2)$$

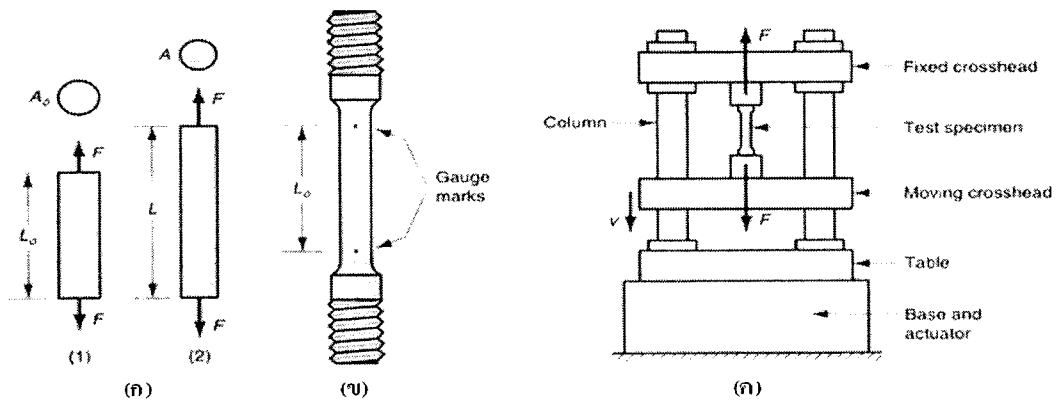
$$\%elongation = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\%R.A. = \frac{(A - A_0)}{A_0} \times 100\% \quad (2.4)$$

$$E = \frac{\sigma_t}{e_t} \quad (2.5)$$

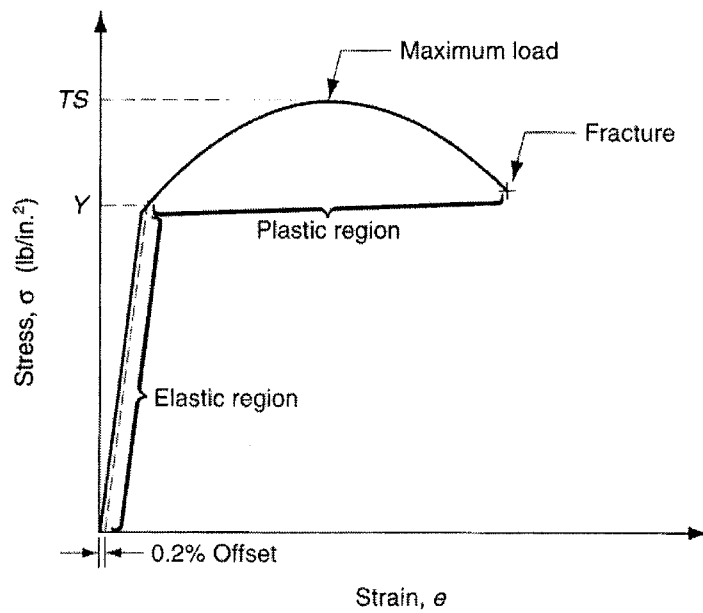
เมื่อ	σ_t	=	ความเค้น
	F_t	=	แรงกระทำ
	e_t	=	ความเครียด
	L	=	ความยาวสุดท้าย
	L_0	=	ความยาวเริ่มต้น
	A	=	พื้นที่หน้าตัดสุดท้าย
	A_0	=	พื้นที่หน้าตัด

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	- 5 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน.....	244419
เลขเรียกหนังสือ.....	



รูปที่ 2.4 การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ [5]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้นความเครียด ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและค่าความเครียดในแกนนอนดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด [3]

ตารางที่ 2.4 โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด [5]

โลหะ	โมดูลัสการยืดหยุ่น (MPa)
อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม	69×10^3
เหล็กหล่อ	138×10^3
ทองแดงและทองแดงผสม	110×10^3
เหล็ก	209×10^3
ตะกั่ว	21×10^3
แมกนีเซียม	48×10^3
นิกเกิล	209×10^3
เหล็กกล้า	209×10^3

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้นความเครียดเราพบว่าเมื่อเราเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้าๆ ขึ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออกจนถึงจุดๆ หนึ่งในช่วงนี้ที่จะกราฟมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดเป็นสัดส่วนคงที่ กราฟเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's Law) คือความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด เรียกว่าจุดพิคัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิคัดสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) คือเมื่อปล่อยแรงกระทำขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม และเมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปอีกจนเกินพิคัดสัดส่วนเส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรงกราฟ วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่งนั้น เรียกว่าจุดพิคัดการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งที่จุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Permanent Deformation) กับวัสดุนั้นแต่เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) และจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ที่จุดนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) ซึ่งค่านี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราจะใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ในวัสดุหลายชนิดเช่น อลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.20% แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นโค้งของกราฟค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่าความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) ดังรูปที่ 2.5 ค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิดและความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด แสดงไว้ดังตารางที่ 2.4 ถึง 2.5 ตามลำดับ

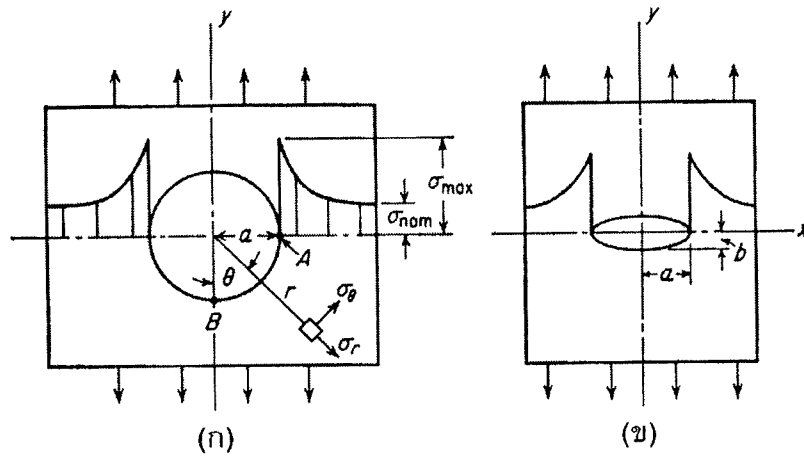
ตารางที่ 2.5 ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด [3]

โลหะ	(Yield Strength , MPa)	(Tensile Strength , MPa)
อลูมิเนียมผสม	175	350
เหล็กหล่อ	275	275
ทองแดงผสม	205	410
แมกนีเซียมทองแดง	175	275

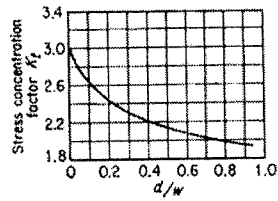
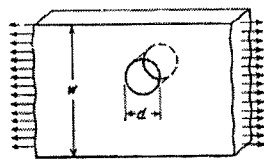
โดยทั่วไปในการทดสอบความแข็งแรงดึง รูปร่างของชิ้นงานที่ไม่มีความต่อเนื่อง เช่น รู ร่องบาก ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณใกล้เคียงพื้นที่ไม่ต่อเนื่องนั้นจะมีค่าความเค้น (σ_{max}) ก่อนข้างสูงกว่าความเค้นเฉลี่ยที่บริเวณพื้นที่ที่ห่างจากความไม่ต่อเนื่องดังรูปที่ 2.7 บริเวณด้านข้างของรูวงกลมและรูวงรี หากไม่มีรูความเค้นที่กระจายตลอดทั้งแผ่นจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดของแนวแรงดึงที่กล่าวผ่านมาก่อนหน้านี้ ค่าความเข้มข้นของความเค้นหาค่าได้โดยการหาค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี (Theoretical stress concentration factor: K_t) ดังสมการที่ 2.6 ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายอัตราส่วนระหว่างความเค้นสูงสุดกับค่าความเค้นปกติที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดจริงของชิ้นงาน ลักษณะระดับความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างชิ้นงานตัวอย่างที่มีความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิว และค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี ดังรูปที่ 2.8

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nominal}} \quad (2.6)$$

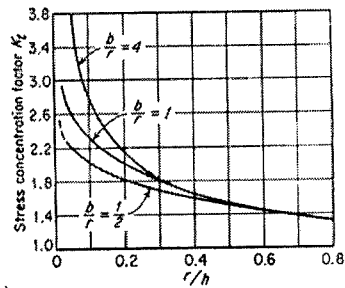
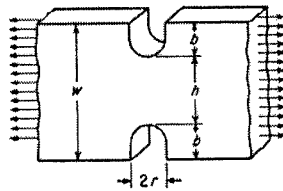
- เมื่อ
- K_t = องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี
 - σ_{max} = ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใกล้จุดที่มีความไม่ต่อเนื่อง
 - $\sigma_{nominal}$ = ความเค้นปกติในชิ้นงานที่มีความต่อเนื่อง



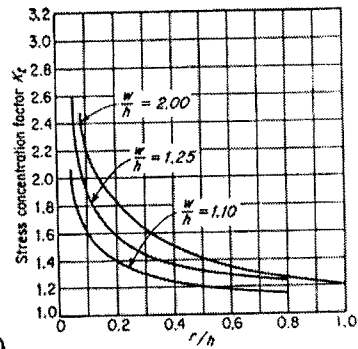
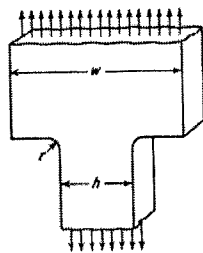
รูปที่ 2.6 การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รูวงกลม และ (ข) รูวงรี [8]



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.7 องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ [8]

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะด้วยการตรวจสอบโครงสร้างแบบมหภาคมีจุดประสงค์ ดังนี้ คือ การควบคุมสมบูรณ์ของแนวเชื่อม จำนวนชั้นของแนวเชื่อม บริเวณที่มีผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) สลักฝังในการเชื่อมของแนวเชื่อม และรูพรุนของงานเชื่อมการเตรียมชิ้นทดสอบมหภาค (Macro specimen) โดยการกัดผิวแล้วกัดด้วยน้ำยาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) หรือใช้กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่าเข้าช่วยการตรวจสอบที่ให้ผลดีที่สุดนั้น ผู้ตรวจสอบต้องรับผิดชอบและควบคุมการตรวจสอบตามวิธีอย่างถูกต้อง และพิจารณาขอบพร้อมที่ปรากฏเปรียบเทียบกับเกณฑ์การตัดสินตรวจสอบเพื่อสรุปผลว่าชิ้นงานนั้นยอมรับได้หรือไม่ [7]

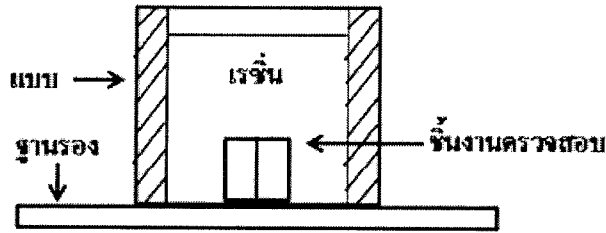
2.6.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ตัดชิ้นงานตามขวางออกเป็นชั้นประมาณ 6 ชั้น ชั้นแรกและชั้นสุดท้ายจากขอบงานประมาณ 30 มม. ของปลายทั้งสองข้าง และที่เหลือตัดแบ่งออกเป็น 4 ชั้น ชั้นละ 25 มม. ข้อควรระวัง คือ การตัดชิ้นงานต้องพยายามมิให้เกิดความร้อน หรือ ใช้แรงกดระหว่างการตัดมากเกินไป เพราะจะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนรูปได้

2.6.2 ขั้นตอนการตรวจสอบ

การเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบจะต้องทำการขึ้นตัวเรือน (Mounting) คือการฝังชิ้นงานลงในเรซิน ดังรูปที่ 2.8 โดยมีจุดประสงค์ เพื่อให้ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เป็นระนาบและมีขนาดที่พอเหมาะกับการจับยึดได้สะดวก ทั้งยังรักษาขอบของชิ้นงานไม่ให้เกิดลักษณะโค้งมน ก่อนทำการขึ้นเรือนควรลบเหลี่ยมคม และมุมแหลมของชิ้นงานอยู่เสมอ จากนั้นทำการขัดผิวชิ้นงานแบบหยาบด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์ เบอร์ 600 800 1000 1200 ตามลำดับ โดยการขัดน้ำ (การขัดต้องวางกระดาษทรายบนแผ่นที่เรียบ เช่น กระดาษหนา เพื่อให้ได้ระนาบเดียวกัน) จนรอยกระดาษทรายมีทิศทางเดียวกันตลอดชิ้นทดสอบ แล้วหมุนชิ้นทดสอบทำมุม 90 องศา ขัดจนรอยเดิมหายไปแล้วเปลี่ยนกระดาษทรายเบอร์ที่ละเอียดขึ้นไปจนกระทั่งถึงเบอร์ 1200

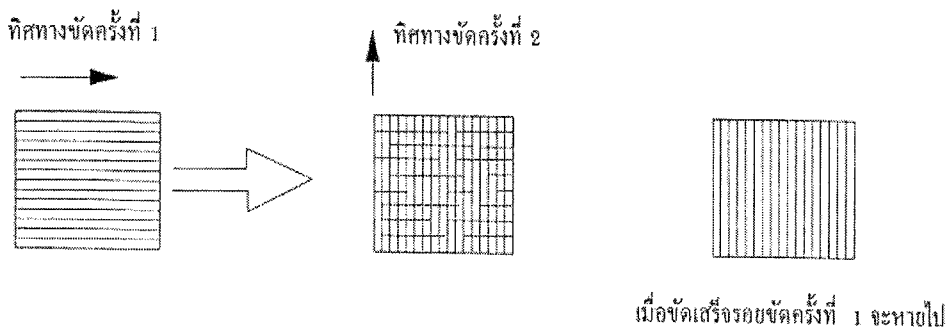
การตรวจสอบและผลการตรวจสอบ อาศัยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) ตามมาตรฐาน ASME Section V โดยตรวจสอบด้วยตาเปล่า หรืออุปกรณ์กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า แล้วบันทึกผลที่ปรากฏ โดยการถ่ายรูป หรือสเก็ตภาพ [7]



รูปที่ 2.8 การเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค [4]

- การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ

การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิโคนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 600 800 1000 และขัดจนถึงเบอร์ 1200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะและซิลิโคนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การขัดผิวชิ้นทดสอบ [4]

อนึ่ง การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากจนเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบ โครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด

การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium oxide) หรืออาจจะใช้เพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอน และการขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

2.6.3 การกัดกรด

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดของน้ำยากัดขึ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก [5]

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริกและไฮโดรคลอริก (Nitric Acid and Hydrochloric)	กรดไนตริก (HNO ₃) 3 มิลลิลิตร, ไฮโดรคลอริก (HCl) 10 มิลลิลิตรและเมทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กเครื่องมือ เหล็กกล้าคาร์บอน	จุ่มขึ้นตรวจสอบ นาน 10-30 วินาที
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรดไนตริก (Ferric Chloride and Nitric Acid)	ผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl ₃) ในกรดไฮโดรคลอริก	เหล็กกล้าไร้สนิม	จุ่มแช่หรือเช็ดด้วย สำลี นาน 5-120 วินาที
ไนตริกและอะเซติก (Nitric and Acetic Acid)	ไนตริกแอซิด (HNO ₃) 30 มิลลิลิตร เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl ₃) 2 มิลลิลิตร ผสมกรดน้ำส้มอะเซติกแอซิด (CH ₃ COOH) 20 มิลลิลิตร	เหล็กไร้สนิมที่มี ส่วนผสมของ นิกเกิลและ โคบอลต์เป็น จำนวนมาก	เช็ดดูด้วยสำลีชุบ กรด นาน 10-30 วินาที
โซเดียมเมตาบิสซัลไฟต์ (Sodium Metabisulfite)	โซเดียมเมตาบิสซัลไฟต์ (Na ₂ S ₂ O ₅) 15 มิลลิลิตร ผสมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าเครื่องมือ รอบสูง	กัดด้วยกรดในเวลา 10-60 วินาที
ไนทัล (Nital)	ไนตริกแอซิด (HNO ₃) 1 มิลลิลิตร ผสม เอทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กชุบแข็งผิว และเหล็กทั่วไป	กัดด้วยกรด นาน 10-15 วินาที
กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid)	ไฮโดรคลอริกแอซิด (HCl) 50 มิลลิลิตร ผสม แอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าที่มี ส่วนผสมของ โครเมียมและ นิกเกิล	กัดด้วยกรด นาน 10-30 วินาที

ตารางที่ 2.7 รายละเอียดของน้ำยาคัดชั้นตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก [5]

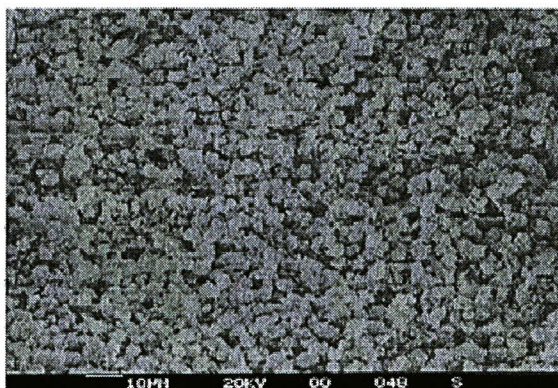
น้ำยาคัดผิว ตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริก	กรดไนตริก (HNO ₃) 10 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 90 มิลลิลิตร	ทองแดงและ ทองเหลือง	จุ่มหรือแช่คานานาน 10 -30 วินาที
เฟอร์ริกคลอไรด์และ กรดไฮโดรคลอริก (Ferric Chloride and Hydrochloric Acid)	เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl ₃) 2-5 มิลลิลิตร กรดไฮโดร คลอริก (HCl) 5-30 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 100 มิลลิลิตร	ทองแดงผสม	จุ่มหรือแช่คานานานด้วยสำลี นาน 5-15 วินาที
กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid)	กรดไฮโดรฟลูออริก ½ ถึง 2 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	จุ่มหรือแช่คานานาน 15-45 วินาที
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 มิลลิลิตร ผสม กับน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	แช่ด้วยสำลีนาน 10-15 วินาที
กรดอะเซติก (Acetic Acid)	กรดอะเซติก 2-5 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	แมกนีเซียมผสม	จุ่มแช่
กรดไนตริกและ กรดอะเซติก (Nitric Acid and Acetic Acid)	กรดไนตริก (HNO ₃) 50 มิลลิลิตร ผสมกับกรดอะ เซติก	นิกเกิลผสม	ควรถุ่มหรือแช่น้ำยา ในทันทีที่ผสมน้ำยา เสร็จ

การทดสอบโครงสร้างมหภาคของเนื้อโลหะนั้น ในแต่ละชนิดจะต้องมีความแตกต่างกันในการใช้กรด เนื่องด้วยโลหะมีความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาต่อกรดจึงมีความแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้กรดให้เหมาะสมกับโลหะงานนั้นๆ สำหรับที่ทำการทดสอบโครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมผสม การใช้กรดก็จะต้องมีผลของ น้ำกลั่น และกรดชนิดต่างๆที่ประกอบด้วยชนิด กรดไฮโดรฟลูอริก (HF) กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และเมื่อทำการกัดกรดจนมองเห็นโครงสร้างตามต้องการในเวลาที่กำหนดนำชิ้นงานล้างกรดออกด้วยน้ำที่สะอาดและเช็ดด้วยเอทานอล และเป่าให้แห้งด้วยลมร้อนดังรูปที่ 2.8 [4]

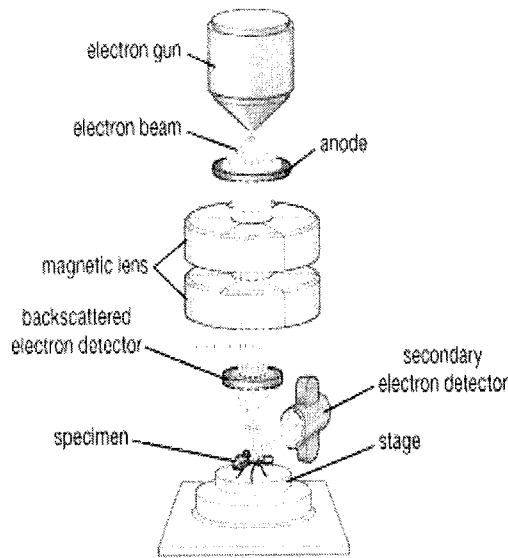
ตัวอย่างของน้ำยากัดผิวตรวจสอบของโลหะบางชนิด น้ำยาเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของโลหะชนิดต่างๆแยกออกเป็น 2 ประเภทคือ น้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็ก และน้ำยาที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก [8] ดังตารางที่ 2.7 นี้จะประกอบด้วยรายละเอียดของชื่อน้ำยาชนิดต่างๆ ตลอดจนส่วนผสมของน้ำยาเหล่านั้น นอกจากนี้ยังได้บอกเวลาในการกัดด้วยน้ำยาเหล่านั้นอีกด้วย

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [9]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติบางประการของสสาร ที่มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แสง ทั้งนี้เป็นเพราะ SEM จะใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ทำให้ภาพมีความชัดลึกสูงแสดงดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์การกระจายตัวรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometry, EDS) และเวฟเล็งธิดิสเพอร์ซีฟสเปกโทรเมตรี (Wavelength Dispersive Spectrometry, WDS) เพื่อให้ข้อมูลในเชิงเคมีด้วย



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงอำนาจแยกแยะของ SEM [10]



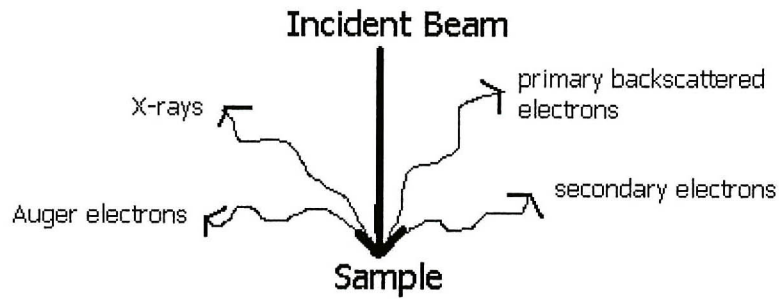
© 2008 Encyclopædia Britannica, Inc.

รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [10]

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง SEM ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source) หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งนับได้ว่าเป็นหัวใจของ SEM อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งภายในมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0-30 kV (บางครั้งเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดย แอพเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (First condenser lens) อาจนับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทรานส์มิสชันของอิเล็กตรอน (Electron optics) เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง (Demagnification) ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นทำหน้าที่โฟกัสอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมายโดยคอยกราดภาพ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม คล้ายกับการกราดภาพบนจอโทรทัศน์ดังรูปที่ 2.11

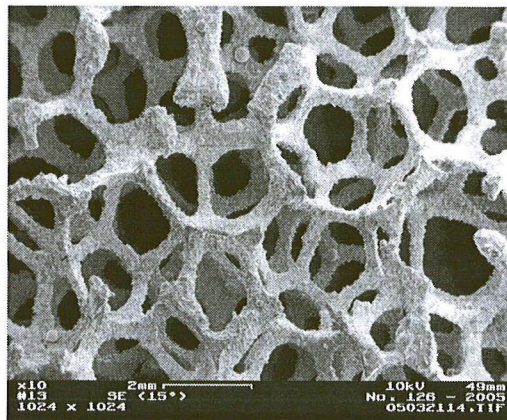
2.6.1 สัญญาณต่าง ๆ (Various types of signal)

สัญญาณแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสาร และอันตรกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นตามมา แสดงดังรูปที่ 2.12



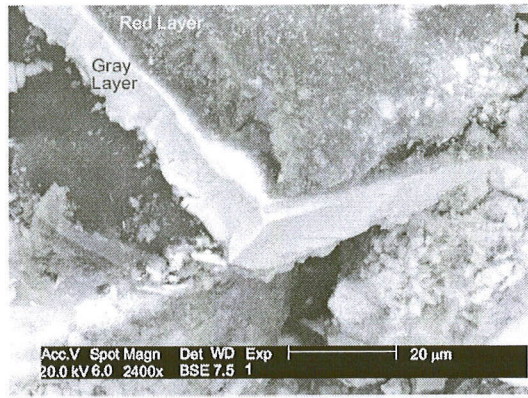
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงสัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสาร [10]

1) สัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron, SE) ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่เรานำมาสร้างภาพมากที่สุด อิเล็กตรอนทุติยภูมิยังมีแบบย่อยๆ อีกหลายแบบตามกลไกและแหล่งกำเนิด

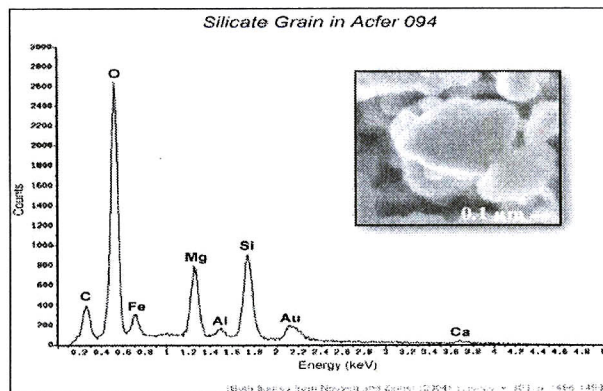


รูปที่ 2.13 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ [10]

2) สัญญาณแบบอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมี และลักษณะโทโพกราฟฟีของพื้นผิว ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ [10]



รูปที่ 2.15 สเปกตรัมของเทคนิคเอเนอร์จิสเพอร์ซิฟสเปกโทรเมตรี (EDS) [11]

3) สัญญาณแบบเอ็กซ์เรย์ (X-ray) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบ เป็นสัญญาณที่ใช้เทคนิค EDS และ WDS แสดงดังรูปที่ 2.15

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, อนินท์ มีมนต์ และบุญส่ง จงกลณี [1] ศึกษาการเชื่อมด้วยการเลียดทานแบบกวนรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 และทำการศึกษากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมต่างๆ ที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนของรอยต่อ ตัวแปรการเชื่อมที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมมีความแข็งแรงสูงสุด คือ ความเร็วรอบ 250 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 50 mm/min ความลึกของตัวกวน 3.1 มม. และความเอียงของตัวกวน 2° ที่แสดงควมแข็งแรงดึงเฉือนที่มีค่าประมาณ 11,871 N และมีค่าสูงกว่าอลูมิเนียมหลัก ความเร็วรอบที่ต่ำทำให้ความแข็งแรงดึงเฉือนของรอยต่อเพิ่มขึ้น

- 2.8.2 จุฑามาส สุทธินนท์, จรรย์ญา แก้วประสิทธิ์ และอนุชา แก้วสมนึก [2] ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลของรอยต่อเกลียวอลูมิเนียม AA6063 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนตัวกวนหลายรูปแบบ คือการนำเอาวัสดุต่างชนิดกันมาทำการเชื่อมประสานให้ติดกัน โดยใช้เครื่องกัดอัด โนมติแวนดิงเชื่อมด้วยความเร็วรอบและความเร็วเดินที่แตกต่างกัน ด้วยตัวกวนหลายรูปแบบ และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 13.596 kN ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที ความเร็วเดินที่ 750 มม./นาที ด้วยตัวกวนรูปทรงกระบอกเป็นเกลียวทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา
- 2.8.3 ปราโมทย์ พูนนายม, ประกช สิริวัฒน์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [5] ศึกษาปรับปรุงคุณภาพรอยต่อเชื่อมการเสียดทานแบบกวนรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 ในโครงสร้างรถยนต์ด้วยตัวกวนหลายรูปแบบ และตัวกวนที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 192 MPa คือตัวกวนทรงกระบอกผิวเกลียวขวา ที่มีความเร็วรอบตัวกวน 2000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min และความเอียงของตัวกวน 2 องศา ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมมีค่าสูงกว่าโลหะอลูมิเนียมที่มีค่าประมาณ 1-5 %