

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุการทดลอง

2.1.1 อลูมิเนียม [11]

อลูมิเนียมเป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับสองในโลก และเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมในปัจจุบัน สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอลูมิเนียมแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 อลูมิเนียมมีความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือประมาณหนึ่งในสามส่วนของเหล็กกล้า (7.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมในบรรยากาศน้ำทะเล ปิโตรเคมี และระบบเคมีอื่นๆ ผิวของอลูมิเนียมมีความสะท้อนแสงสูง อลูมิเนียมมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักมีค่าสูงกว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel) อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความแข็งแรงดึงสูงถึง 90 MPa และความแข็งแรงดึงสามารถเพิ่มขึ้นถึง 680 MPa เมื่อทำการขึ้นรูปเย็น อลูมิเนียมบริสุทธิ์

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [11]

สัญลักษณ์	Al
หมายเลขอะตอม	13
ความถ่วงจำเพาะ	2.7
โครงสร้างผลึก	FCC
จุดหลอมเหลว	660°C
โมดูลัสยืดหยุ่น	69,000 MPa
สินแร่	บอกไซต์ (สารมลทินผสมระหว่าง Al ₂ O ₃ และ Al(OH) ₃)
ธาตุผสม:	Cu, Mg, Mn, Si, Zn
การใช้งาน:	บรรจุภัณฑ์ อลูมิเนียมแผ่นบาง ตัวนำไฟฟ้า หม้อ กระจก ชิ้นส่วนโครงสร้าง ยานอวกาศ รถยนต์ หรือชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา

การแบ่งชนิดของอลูมิเนียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.2 คือ กลุ่มของอลูมิเนียมที่ผ่านการรีด และกลุ่มของอลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อ ในที่นี้ขอกล่าวถึงอลูมิเนียมกลุ่มที่ผ่านการรีดเท่านั้น โดยที่อลูมิเนียมที่ผ่านการรีดนั้นสามารถแบ่งแยกได้โดยใช้ตัวเลข 4 ตัว ดังรายละเอียดด้านล่าง และตัวอย่างของอลูมิเนียมบางกลุ่มแสดงในตารางที่ 2.3

- อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (อนุกรม 1xxx) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์ ของอลูมิเนียมที่ 99.0 % ถึง 99.9 % อลูมิเนียมในกลุ่มนี้ยังจะมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการแผ่สะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่าง ๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสีย คือในด้านของความแข็งแรง และคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็น คือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Strain Hardening)

ตารางที่ 2.2 การแบ่งเกรดของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม [11]

กลุ่ม	บริสุทธิ์	Cu	Mn	Si	Zn	Sn
ผ่านการรีด	1XXX	2XXX	3XXX	4XXX	7XXX	8XXX
ผ่านการหล่อ	1XXX	2XX.X		4XX.X	7XX.X	2XX.X

ตารางที่ 2.3 สมบัติของอลูมิเนียมผสม [11]

รหัส	ส่วนผสมทางเคมี (%)						การอบ	ความแข็งแรง (MPa)	%การยึดตัว
	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si			
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	93.6	0.3	0.8	-	-	5.2	O	130	25
							H18	285	1
5050	96.9	0.2	0.7	1.4	0.1	0.4	O	125	18
							H38	200	3
6063	98.5	-	0.3	0.7	-	0.4	O	90	25
							T4	172	20

- อลูมิเนียมผสมทองแดง (อนุกรม 2xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยการวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังจากการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงและความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้ต่ำกว่าชนิดอื่นๆ คือ จะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีการย้ำหมุด
- อลูมิเนียมผสมแมงกานีส (อนุกรม 3xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเหมือนกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการวิธีทางความร้อนได้
- อลูมิเนียมผสมซิลิกอน (อนุกรม 4xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาวะของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะแข็งตัวจะไม่เกิดความแตกร้าวทั้งในสภาวะร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอลูมิเนียมผสมและอลูมิเนียมหล่อ
- อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (อนุกรม 5xxx) บางครั้งจะมีการเติม แมงกานีสลงไปด้วย อลูมิเนียมผสมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยการวิธีทางความร้อน จึงนิยม

นำไปทำลวดเติมเหมือนอนุกรม 4xxx นอกจากนั้นยังนำไปทำถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)

- อลูมิเนียมแมกนีเซียม – ซิลิกอน (อนุกรม 6xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อนำอลูมิเนียมผสมชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่าง ๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน
- อลูมิเนียมสังกะสี – แมกนีเซียม (อนุกรม 7xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมกนีเซียเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อยอลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อม อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้นไป โดยจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณดังกล่าวได้ เกิดความแข็งแรงตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

นอกจากสัญลักษณ์ตัวเลข 4 ตัวแล้ว อลูมิเนียมยังมีสัญลักษณ์กรรมวิธีทางความร้อนย่อท้ายด้วยตัวอักษรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นการการกระทำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมผสม โดยที่วิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และได้กำหนดสัญลักษณ์อักษรตามหลัง เพื่อที่จะเป็นการระบุถึงกรรมวิธีทางความร้อนมากกระทำต่ออลูมิเนียมผสมชนิดนั้นๆ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Non – Heat Treatable คือกลุ่ม 1xxx 3xxx และกลุ่ม 5xxx ส่วนอลูมิเนียมในกลุ่ม Heat Treatable เช่นกลุ่ม 6xxx 4xxx และกลุ่ม 2xxx ก็สามารถเชื่อมได้แต่ต้องอาศัยเทคนิคและความชำนาญเป็นพิเศษ และอาจจะทำให้ความเหนียวของอลูมิเนียมลดลงได้ ส่วนกลุ่ม 7xxx คือกลุ่มที่มีความแข็งแรงสูงมากเชื่อมได้ลำบากมากจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมแบบอาร์ค และรหัสของกระบวนการทางความร้อน ได้ถูกกำหนดโดยสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐฯ ตั้งแต่ปี 1948 เป็นตัวอักษร 4 ตัว ตามด้วยตัวเลขอีกหนึ่งหรือสองตัว เพื่อบอกถึงความแตกต่างในสาระสำคัญของแต่ละกรรมวิธีได้แก่

ตารางที่ 2.4 อักษรย่อท้ายที่แสดงรายละเอียดของการผลิต [11]

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
F	จากการผลิตโดยตรงไม่ผ่านการอบชุบ
H	การแปรรูปเพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Strain hardening)
O	การอบอ่อน (Annealing) เพื่อลดความแข็งแรงจากการแปรรูป และเพิ่มความเหนียวเนื่องจากแรงดึง
T	การอบคืนไฟ (Tempering)
W	การอบบ่ม (Age hardening)

- F หมายถึง สภาพโลหะที่ได้จากการหล่อ โดยยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหรือทางกล
- O หมายถึง สภาพของโลหะภายหลังการอบอ่อนซึ่งโลหะจะเกิดผืนึกใหม่ เป็นภาวะที่โลหะจะอ่อนและเหนียวที่สุดในบรรดาอุณหภูมิเย็นมรีดทั้งหลาย
- H1 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นอย่างเดียว
- H2 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นและอบอ่อนให้เหนียวขึ้นเล็กน้อย
- H3 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นแล้วนำไปอบด้วยอุณหภูมิที่ไม่สูงนัก
- T1 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายบางส่วนแล้วปล่อยให้แข็งตัวตามธรรมชาติ
- T2 หมายถึง โลหะผ่านการอบอ่อนมาแล้ว แล้วใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปมาเท่านั้น
- T3 หมายถึง สภาพโลหะที่ผ่านการอบละลาย (Solution Heat Treatment) แล้วแปรรูปเย็นทันทีเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล
- T4 หมายถึง สภาพโลหะที่ผ่านการอบละลาย และปล่อยให้แข็งตัวตามธรรมชาติจนอยู่ในสภาพคงรูป
- T5 หมายถึง โลหะที่ผ่านการอบละลายบางส่วนและทำให้แข็งตัวแบบเทียม (Artificial aging)
- T6 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายมาก่อนแล้ว นำไปทำให้เย็นตัวด้วยกรรมวิธีทางความร้อน
- T7 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายแล้วปรับให้คงสภาพโดยการควบคุมอุณหภูมิและเวลา เพื่อให้ได้ขนาดเม็ดเกรนให้มีขนาดที่ทำให้โครงสร้างภายในมีเสถียรภาพ
- T8 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลาย ผ่านการแปรรูปเย็นและทำให้แข็งตัวแบบเทียม
- T9 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายทำให้แข็งตัวแบบเทียมด้วยกระบวนการทางความร้อนแล้วจึงนำไปแปรรูปเย็น
- T10 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายบางส่วนทำนองเดียวกับ T5 นำไปผ่านการแปรรูปเย็นก่อนทำให้แข็งตัวแบบเทียม

อย่างไรก็ตามการใช้งานอลูมิเนียมบริสุทธิ์ค่อนข้างจำกัด ส่วนมากมักใช้กับงานที่ต้องการความสามารถในการขึ้นรูปสูง เช่น อุปกรณ์เครื่องครัว อุปกรณ์ขนถ่ายและจัดเก็บสารเคมี เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการเติมธาตุผสมต่างๆ ลงไปในอลูมิเนียมและทำให้เกิดอลูมิเนียมเกรดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 นอกจากนี้สัญลักษณ์ที่แสดงชนิดของอลูมิเนียมยังมีตัวอักษรห้อยท้ายต่อจากตัวเลข 4 ตัวที่เป็นสิ่งสำคัญที่บ่งบอกให้ทราบถึงรายละเอียดของการผลิตดังแสดงในตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลและการใช้งานของอลูมิเนียมผสมบางเกรดแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

2.1.2 เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี [12]

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีในประเทศไทย ตาม มอก.50-2548 แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ แผ่นม้วน คือ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีที่ทำเป็นม้วน แผ่นตัด คือ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นม้วนที่มาตัดแบ่งเป็นแผ่น แผ่นลูกฟูกลอนใหญ่ คือ เหล็กแผ่นที่ได้นำเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นตัดมาขึ้นรูปเป็นลอนขนาดใหญ่ แผ่นลูกฟูกลอนเล็ก คือ เหล็กแผ่นที่ได้นำเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นตัดมาขึ้นรูปเป็นลอนขนาดเล็ก

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีชนิดแผ่นม้วนและแผ่นตัด สังกะสีชนิดนี้ส่วนใหญ่ ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ เครื่องทำความร้อน ท่อของเครื่องปรับอากาศ รางน้ำ ฝาท่อ และ แท็งก์น้ำ เป็นต้น

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นลอน มีลักษณะการใช้งานในการก่อสร้างขนาดเล็ก สำหรับใช้กันเป็นอาณาเขตของที่ก่อสร้างและที่พักคนงาน รวมถึงนำมาสร้างเป็นสังกะสีมุงหลังคาบ้าน และฝาบ้าน เช่นกลุ่มลูกค้าในงานเกษตรกรรม

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัด สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มตามกรรมวิธีการเคลือบสังกะสี คือ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัด โดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า และ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน และแผ่นตัด โดยกรรมวิธีจุ่มร้อน

ก. เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัด โดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า

มาตรฐาน มอก. 2223 ชั้นคุณภาพ SExxxx (โดย xxxx แทนอักษร หรือตัวเลข) เหล็กกล้ากลุ่มนี้เป็นเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า ที่ทำมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น และอาจนำไปผ่านกระบวนการเคลือบทางเคมี การอบน้ำมัน เพื่อให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากขึ้น

- การผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยวิธีทางไฟฟ้า (Electro Galvanized Steel, EG) ผลิตโดยการเคลือบสังกะสีด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าภายในอ่างชุบ โดยมีส่วนประกอบ คือ ขั้วบวก ขั้วลบ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น สารละลายสังกะสีซัลเฟต (Zinc Sulfate) โดยสังกะสี จะเคลือบลงบนแผ่นเหล็กในลักษณะเป็นอ็อกไซด์ ซึ่งจะต่างไปจากวิธีจุ่มร้อนที่เป็นสารละลายของเหลวติดบนแผ่นเหล็ก ดังนั้นประสิทธิภาพในการเคลือบผิวของกรรมวิธีการทางไฟฟ้าจึงสูงกว่า จากนั้นจะนำไปเคลือบด้วยฟอสเฟต (Phosphate Treatment : P) หรือ โครเมต (Chromate : C) ซึ่งการเคลือบฟอสเฟตนี้จะช่วยให้ความสามารถในการทาสีติดได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการเคลือบด้วยโครเมตจะช่วยให้เพิ่มความทนทานในการต้านทานการกัดกร่อน และการป้องกันคราบต่าง ๆ เนื่องจากการเคลือบโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า กระทำที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเหล็กแผ่นพื้นเป็นหลัก โดยไม่ผลกระทบ จากความร้อนเหมือนกับในกรณีของการผลิตแบบจุ่มร้อนซึ่งในขณะที่เคลือบแผ่นเหล็กจะถูกทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยกรรมวิธีการทางไฟฟ้าจึงมีความสามารถในการขึ้นรูป การทาสีติด และการเชื่อมที่ดียิ่งขึ้น

ตัวอย่างการใช้งาน เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน เฟอร์นิเจอร์ เครื่องปรับอากาศ ฝาท่อคอมพิวเตอร์ ตัวถังและชิ้นส่วนภายนอกรถยนต์ วัสดุก่อสร้าง เช่น เหล็กทำค้ำยันมู่ลี่ปิดหน้าร้าน

ข. เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัด โดยกรรมวิธีจุ่มร้อน

มาตรฐาน มอก.2131 ชั้นคุณภาพ CGCxxx (โดยที่ xxx แทนตัวอักษร หรือตัวเลข)เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี คือ เหล็กกล้ารีดเย็นที่นำมาเคลือบผิวด้วยสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน แล้วเคลือบสีด้วยเรซินสังเคราะห์ (Durable Synthetic Resin Paint) ทับอีกครั้ง การชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนนี้ถูกนำออกเผยแพร่ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1742 โดยนักเคมีชาวฝรั่งเศส ชื่อ P.J. Malouin {144} เหล็กแผ่นที่เคลือบด้วยสังกะสี จะช่วยป้องกันการกัดกร่อนที่เนื้อเหล็ก ในบรรยากาศที่มีการกัดกร่อน สังกะสีจะทำหน้าที่ในการเป็นตัวถูกกัดกร่อนแทนเหล็ก เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีจะต้องปราศจากข้อบกพร่อง

ซึ่งได้แก่ รอยแตก การเคลือบผิวไม่ทั่วถึง การเสียรูป และตำหนิอื่น ๆ ที่จะเป็ผลเสียหายต่อการนำไปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จ

- การผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยวิธีจุ่มร้อน SGCC (Hot Dipcoed Galvanied : HDG) เหล็กเคลือบกาวาโนซ์ หรือเรียกว่า เหล็กเคลือบสังกะสี HDG เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิตและใช้งานอย่างกว้างขวางในประเทศไทย การผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีทำได้โดยการผ่านแผ่นเหล็กอ่างสังกะสีหลอมเหลว (Zinc Bath) ที่มีอุณหภูมิประมาณ 465 °C เพื่อทำการเคลือบ ผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้สามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ดี และมีคุณสมบัติการทาสีดี ความสามารถในการเชื่อมและการบัดกรีที่ดี แต่เนื่องจากจุดหลอมเหลวของชั้นสังกะสีมีอุณหภูมิต่ำกว่าชั้นเหล็กกล้า ดังนั้นความสามารถในการเชื่อมแบบต่อเนื่องจึงลดลง โดยเป็นผลมาจากสังกะสีที่ติดกับอิเล็กโทรดในขณะที่ทำการเชื่อม ส่วนการบัดกรีจะทำได้โดยง่าย หากใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม ได้แก่ ทองเหลืองและตะกั่ว นอกจากนี้ การเคลือบโครเมตภายหลังการเคลือบสังกะสีจะช่วยเพิ่มความสามารถในการบัดกรีได้มากยิ่งขึ้นอีกด้วย แต่ข้อจำกัดในการใช้งานของเหล็กเคลือบสังกะสีแบบนี้ คือ ไม่ควรใช้งานภายใต้สภาวะที่มีการกัดกร่อนที่รุนแรง เช่น บริเวณชายฝั่งทะเล เขตอุตสาหกรรม ตัวอย่างการใช้งาน เช่น กรอบประตูพื้นสำเร็จรูป ผั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร อุปกรณ์ระบายความร้อน ท่อระบายอากาศ

สำหรับในประเทศไทย แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน อาจเจพบผิวเป็นแบบที่มีลวดลายแพรวพราว (Spangle) ของผลึก ซึ่งลวดลายนี้อาจยังปรากฏให้เห็นภายหลังจากการเคลือบสีทับ การผลิตแบบ Minimum Spangle หรือ Normal Spangle จะต้องควบคุมปริมาณตะกั่วที่ผสมในอ่างสังกะสีหลอมเหลวให้ต่ำกว่า 0.15 % และใช้เทคนิคการทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว หรือเพิ่มปริมาณนิวเคลียสที่ผิวเคลือบ (เช่นการพ่นด้วยผงสังกะสี) เพื่อยับยั้งการโตของผลึก



รูปที่ 2.1 แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีแบบ Normal Spangle (HDG) [12]

- เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยวิธีจุ่มร้อนและอบ SGACC (Galvanneal หรือ Iron-Zinc coating, IZ) เหล็ก IZ เป็นเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเช่นเดียวกับ HDG แต่ต่างกันตรงที่ ภายหลังจากการเคลือบผิวเหล็กด้วยสังกะสีแล้ว เหล็กแผ่นจะถูกส่งผ่านไปยังเตาอบเพื่อเร่งให้เกิดชั้นของสารประกอบ Zn-Fe ผิวชั้นเคลือบที่ได้จะมีลักษณะสีเทาด้าน (Matt Gray) สม่่าเสมอและไม่มีลวดลายแพรวพราว (Spangle) ผลิตภัณฑ์ที่เคลือบโดยวิธีนี้จะมีความสามารถในการทาสีดี และมีความสามารถในการเชื่อม Spot และ Seam เหนือกว่าเหล็กกล้าเคลือบด้วยวิธี HDG เนื่องจากชั้นเคลือบสังกะสีของ HDG มีความสามารถนำไฟฟ้าต่ำกว่าแผ่นเหล็ก อีกทั้งจุด

หลอมเหลวก็ยังต่ำกว่าแผ่นเหล็กด้วย ดังนั้น ความสามารถในการเชื่อมแบบต่อเนื่องจึงลดลง โดยเป็นผลมาจากสังกะสีที่ติดกับอิเล็กโทรดในขณะที่ทำการเชื่อม ส่วนชั้นเคลือบโลหะเจือสังกะสีเหล็กของเหล็กแผ่น IZ มีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า และมีความแข็งมากกว่าเมื่อเทียบกับ HDG ดังนั้น ความสามารถในการเชื่อมจึงเทียบเท่าได้กับแผ่นเหล็กซึ่งเป็นโลหะพื้น การใช้งานเหล็กกล้า แบบ IZ นี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยเฉพาะชิ้นส่วนตัวถังภายนอกที่ต้องการคุณสมบัติด้านการทาสีติด และการเชื่อมที่ดี รวมไปถึงการใช้ในการผลิตถังน้ำมันรถยนต์



รูปที่ 2.2 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แบบ Galvanneal (IZ) [12]

ตารางที่ 2.5 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดเย็นทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน [12]

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสีด้วยเรซินสังเคราะห์	การใช้งาน	เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีก่อนเคลือบสี
CGCC	ใช้กับงานทั่วไป	SGCC
CGCH	ใช้กับงานทั่วไปหรืองานที่ต้องการความแข็ง	SGCH
CGCD1	ใช้กับงานขึ้นรูป	CGCD1
CGC340	ใช้กับงานโครงสร้าง	SGC340
CGC400		SGC400
CGC440		SGC440
CGC490		SCG490
CGC570		SCG570

ตารางที่ 2.6 ประเภทของเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีด้วยเรซินสังเคราะห์

สัญลักษณ์ของการเคลือบสี	จำนวนชั้นของการเคลือบสี
0	ไม่เคลือบสี
1	เคลือบสีชั้นเดียว
2	เคลือบสี 2 ชั้น
3	เคลือบสีตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไป

จากตาราง

- เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบดี ประเภท 00 คือเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีที่ไม่เคลือบสีทั้งสองด้าน
- เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบดี ประเภท 12 คือ เหล็กเคลือบสังกะสีที่เคลือบสีด้านหน้าเคลือบชั้นเดียว และเคลือบด้านหลัง 2 ชั้น

ตารางที่ 2.7 สัญลักษณ์ของมวลสังกะสีที่เคลือบ และความหนาของสังกะสีที่เคลือบเทียบเท่า [12]

สัญลักษณ์มวลสังกะสีที่เคลือบ	ความหนาของสังกะสีที่เคลือบที่เทียบเท่า (มม.)
Z06	0.013
Z08	0.017
Z10	0.021
Z12	0.026
Z18	0.034
Z20	0.040
Z22	0.043
Z25	0.049
Z27	0.054
Z35	0.064
Z45	0.080
Z60	0.102
F04	0.008
F06	0.013
F08	0.017
F10	0.021
F12	0.026
F18	0.034

สัญลักษณ์มวลสังกะสีที่เคลือบมี 2 แบบ คือ

1. สังกะสี ใช้ สัญลักษณ์ “ Z ”
2. โลหะเจือสังกะสีเหล็ก ใช้สัญลักษณ์ “ F ”

ค. สมบัติของเหล็กเคลือบสังกะสี

1) ความต้านทานต่อการกัดกร่อน สังกะสี มีคุณสมบัติเด่นในการป้องกันการกัดกร่อนแบบการเสียสละ (Sacrificial) โดยการเสียสละตัวเองทำปฏิกิริยาการกัดกร่อนแทนเหล็ก ช่วยป้องกันการเกิดสนิมบริเวณผิวเปิด หรือขอบตัดซึ่งเป็นจุดที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย

2) การเชื่อมเหล็กเคลือบสังกะสี เหล็กเคลือบสังกะสี ซึ่งผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีด้วยวิธีอบชุบความร้อนแบบต่อเนื่องทำให้เหล็กมีผิวเคลือบที่ทนทานไม่แตกกระเทาะหรือลอกในระหว่าง การเชื่อม การรีดขึ้นรูป ตัดโค้ง และ บี้ม้วน

3) ความเรียบเหล็กเคลือบสังกะสี สามารถนำไปรีด เพื่อปรับสภาพผิว (Skin pass) เพื่อสะดวกในการทาสี และเคลือบสี

4) ความหนา ความกว้าง เหล็กเคลือบสังกะสี มีขนาดความหนาตั้งแต่ 0.23 มิลลิเมตร ถึง 1.60 มิลลิเมตร ส่วนความกว้างมีให้เลือก 710 - 1,265 มิลลิเมตร และระดับมวลสารของชั้นเคลือบ ตั้งแต่ Z 12 ถึง Z 35 ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

ง. การนำเหล็กเคลือบสังกะสีไปใช้งาน

การใช้ประโยชน์ของเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ได้มีการนำเข้ามาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการผลิตประตูดรถยนต์ ซึ่งมีอยู่ทั้งหมดใน 3 ลักษณะด้วยกัน [c5] มีดังต่อไปนี้

1) PNL FR DRINR LK/RH(S/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 280 มิลลิเมตร ยาว 1,660 มิลลิเมตร และขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 1,050 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นประตูรถปีกอ๊อฟ ประเภท 2 ประตู 1 ตอน

2) PNL FR DRINR LK/RH(C/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 255 มิลลิเมตร ยาว 1,670 มิลลิเมตร และขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 1,140 มิลลิเมตร ยาว 1,690 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นประตูรถปีกอ๊อฟ ประเภท 2 ประตู 2 ตอน

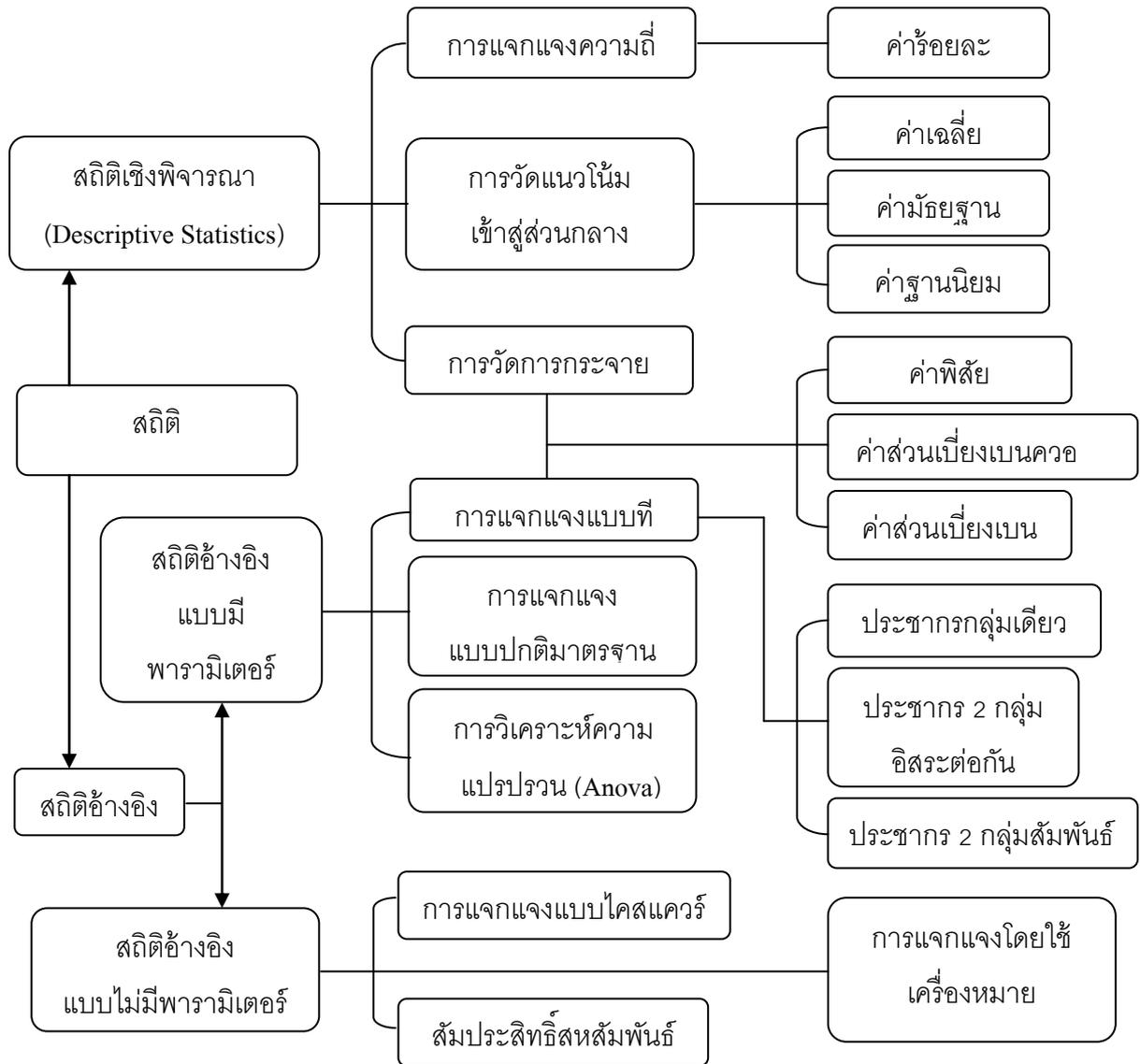
3) PNL RR RH (D/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 255 มิลลิเมตร ยาว 905 มิลลิเมตร และขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 925 มิลลิเมตร ยาว 1,285 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นประตูรถปีกอ๊อฟ ประเภท 4 ประตู

2.2 การออกแบบการทดลอง [12]

สถิติ (Statistics) คือ วิธีการจัดการข้อมูลโดยเริ่มตั้งแต่ การเก็บรวบรวมข้อมูล ไปจนถึงการวิเคราะห์และแปลผลข้อมูล เพื่อช่วยในการตัดสินใจ ในภาวะไม่แน่นอน (Uncertain) โดยอาศัยรากฐานของหลักความน่าจะเป็น (Probability) เป็นพื้นฐานสำคัญ และสถิติที่นิยมใช้ในงานวิจัยโดยสรุปเป็นโครงสร้างสถิติดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.2.1 พารามิเตอร์ (Parameter)

เป็นค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลประชากร(Population data) และจากข้อมูลกลุ่มตัวอย่างของประชากร (Sample data) ซึ่งเป็นค่าที่บรรยายหรือแสดงลักษณะของประชากรและกลุ่มตัวอย่างของประชากร เช่น ค่าเฉลี่ยของประชากร μ ดังแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางสถิติที่นิยมใช้ในปัจจุบัน [12]

ตารางที่ 2.3 แบบพารามิเตอร์ [12]

ค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปร	ประชากร	กลุ่มตัวอย่างของประชากร
ค่าเฉลี่ย	μ	\bar{y}
ค่าความแปรปรวน	σ^2	s^2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	σ	s

2.2.2 การทดสอบสมมติฐาน (Test of Hypothesis)

สมมติฐาน (Hypothesis) หมายถึง ข้อสมมติหรือข้อความที่เกี่ยวกับสิ่งที่ทำการศึกษา ซึ่งเป็นข้อสันนิษฐานอาจจะเป็นจริงหรือไม่เป็นจริงก็ได้ [11] สมมติฐานที่กำหนด จะมี 2 อย่างคือ

สมมติฐานหลัก (Null hypothesis: H_0) เป็นสมมติฐานที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อจุดมุ่งหมายที่ต้องการและสมมติฐานรอง (Alternative hypothesis: H_1) เป็นสมมติฐานที่ถูกกำหนดให้ตรงกันข้ามกับสมมติฐานหลักและการทดสอบสมมติฐาน จะมี 2 ลักษณะคือ

(ก) การทดสอบแบบมีทิศทางหรือแบบหางเดียว (One tailed test) จะเป็นการทดสอบเพื่อบอกว่ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ตัวอย่างเช่น

$$H_0; \mu = 150 \quad H_0; \mu = 150$$

$$H_1; \mu > 150 \quad H_1; \mu < 150$$

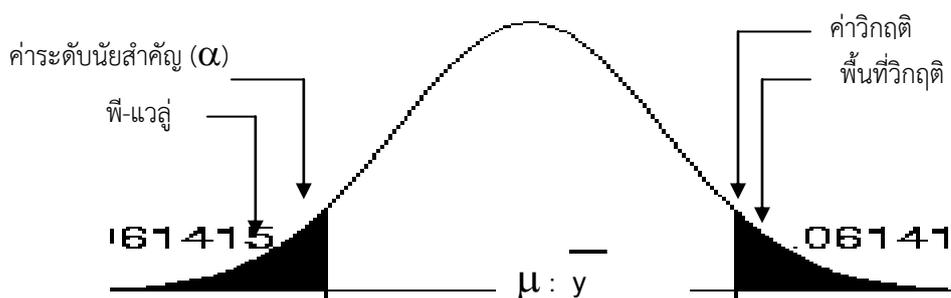
(ข) การทดสอบแบบไม่มีทิศทางหรือแบบสองหาง (Two tailed test) จะเป็นการทดสอบเพื่อบอกว่ามีค่าเท่ากันหรือไม่ ตัวอย่างเช่น

$$H_0; \mu = 150$$

$$H_1; \mu \neq 150$$

2.2.3 ค่าวิกฤต พื้นที่วิกฤต และระดับนัยสำคัญ

ค่าวิกฤต หมายถึง ค่าที่เป็นจุดแบ่งของการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก พื้นที่วิกฤต หมายถึง พื้นที่ของการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ค่าระดับนัยสำคัญ หมายถึง ระดับการผิดพลาดสูงสุดที่ผู้ศึกษายอมรับให้เกิดขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ค่าวิกฤต พื้นที่วิกฤต ระดับนัยสำคัญ และค่าพี-แวลู [12]

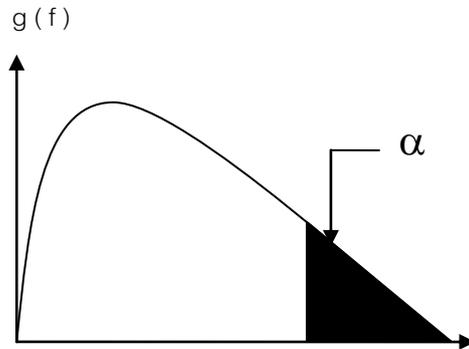
2.2.4 การทดสอบโดยการแจกแจงแบบ เอฟ-เทส

เป็นการแจกแจงของตัวแปรสุ่มที่สร้างจากการแจกแจงแบบโคสแควร์ตั้งนิยาม ต่อไปนี้ ให้ U และ V เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบโคสแควร์พร้อมด้วยองศาความเป็นอิสระเท่ากับ V_1 และ V_2 ตามลำดับ ถ้า U และ V เป็นตัวแปรสุ่มที่เป็นอิสระต่อกันแล้วตัวแปรสุ่ม F เท่ากับ U / V_1 หรือด้วย V / V_2 จะมีการแจกแจงแบบเอฟ พร้อมด้วยองศาความเป็นอิสระเท่ากับ V_1 และ V_2 ตามลำดับ

คุณสมบัติการแจกแจงแบบ เอฟ-เทส

- ตัวแปร F มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ∞ นั่นคือ $0 < F < \infty$
- เส้นโค้งการแจกแจงมีลักษณะเบ้ขวา โดยขึ้นอยู่กับองศาความเป็นอิสระ V_1 และ V_2
- เส้นโค้งการแจกแจงแบบเอฟมีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งการแจกแจงแบบโคสแควร์ และมีจุดศูนย์กลางที่ 1

แล้วตัวแปร F จะมีการแจกแจงแบบเอฟ (F distribution) โดยมีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ $v_1 = n_1 - 1$ และ $v_2 = n_2 - 1$ ค่าของเอฟที่มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ V_1 และ V_2 และทำให้พื้นที่ใต้โค้งด้านขวาของโค้งการแจกแจงเท่ากับ α เขียนแทนด้วย $f_{\alpha; v_1, v_2}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.5 พื้นที่ใต้โค้งด้านขวาการแจกแจงเอฟ [12]

2.2.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main effect) และในการทดลองบางอย่าง อาจพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่นซึ่งหมายถึงผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่น ๆ นั้นเอง และเรียกเหตุการณ์นี้ว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องและการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัยนี้ คือ A B และ C ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับและปัจจัย C จะประกอบด้วย c ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือ ในแต่ละการทดสอบของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $a \times b \times c$ การทดลอง โดยปกติจะมีจำนวนการทดสอบทั้งหมด n ครั้ง กำหนดให้ γ_{ijkl} คือผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) ปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) และปัจจัย C อยู่ที่ระดับ k ($k = 1, 2, \dots, c$) สำหรับการทดสอบที่ l ($l = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง $a \times b \times c \times n$ ครั้ง ถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ซึ่งเป็นการออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely randomized design)

ในกรณีที่ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเช่นนี้เรื่อย ๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ $abc \dots n$ และจะต้องมีเรพลิเคตอย่างน้อย 2 การทดสอบ ($n \geq 2$) เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกนำเข้าไปพิจารณาในแบบจำลอง

ถ้าปัจจัยในการทดลองทั้งหมดเป็นแบบค่าตายตัวเราสามารถที่จะคิดสูตร และทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลหลักและอันตรกิริยาได้โดยง่าย สำหรับแบบจำลองแบบผลตายตัว ตัวทดสอบเชิงสถิติสำหรับผลหลักและอันตรกิริยาสามารถหาได้โดยสร้างค่ากำลังสองเฉลี่ยของสิ่งนั้นขึ้น แล้วหารด้วยค่ากำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด (เหมือนกับกรณีของ 2 ปัจจัย) และการทดสอบสมมติฐานจะใช้ F-Test แบบทดสอบปลายด้านบนหนึ่งด้าน (Upper-Tail, One-Tail Test) จำนวนระดับขึ้นความเสรีสำหรับผลหลักของปัจจัยใด ๆ มีค่าเท่ากับจำนวนระดับของปัจจัยนั้นลบด้วย 1 และจำนวนระดับขึ้นความเสรีของอันตรกิริยามีค่าเท่ากับผลคูณของระดับขึ้นความเสรีของส่วนประกอบของอันตรกิริยานั้น ๆ

ตัวอย่างเช่น พิจารณาแบบจำลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 3 ปัจจัย ตามสมการ 2.1 [10]

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2.1)$$

สมมติว่า A, B และ C มีค่าตายตัว ตารางสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 ค่าของเอฟ-เทส ของผลหลักและอันตรกิริยาหาได้โดยตรงจากค่ากำลังสองเฉลี่ยคาดหวังที่ได้

ตารางที่ 2.4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบผลตายตัว [12]

สาเหตุของความแตกต่าง	ผลบวกกำลังสอง	ระดับขึ้นความเสรี	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	ผลค่าเฉลี่ยกำลังสอง	ตัวสถิติ F_0
A	SS_A	$a-1$	MS_A	$\sigma^2 + \frac{bnc \sum \tau_i^2}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b-1$	MS_B	$\sigma^2 + \frac{acn \sum \beta_j^2}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	$c-1$	MS_C	$\sigma^2 + \frac{abn \sum \gamma_k^2}{c-1}$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	MS_{AB}	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	$(a-1)(c-1)$	MS_{AC}	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	$(b-1)(c-1)$	MS_{BC}	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1)$	MS_{ABC}	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	$abc(c-1)$	MS_E	σ^2	
Total	SS_T	$abcn-1$			

การคำนวณด้วยมือสำหรับค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองในตารางที่ 2.4 มีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n \gamma_{ijkl}^2 - \frac{\gamma_{\dots}^2}{abcn} \quad (2.2)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของผลหลักหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a \gamma_{i\dots}^2 - \frac{\gamma_{\dots}^2}{abcn} \quad (2.3)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b \gamma_{j\dots}^2 - \frac{\gamma_{\dots}^2}{abcn} \quad (2.4)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c \gamma_{k\dots}^2 - \frac{\gamma_{\dots}^2}{abcn} \quad (2.5)$$

เพื่อที่จะคำนวณค่าผลรวมของกำลังสองแบบ 3 ปัจจัยของอันตรกิริยา จะต้องสร้างตามผลรวมซึ่งประกอบด้วยเซลล์จำนวน $A \times B$, $A \times C$ และ $B \times C$ เซลล์ขึ้นมา ซึ่งเกิดจากการยุบตารางข้อมูลเบื้องต้นให้อยู่ในรูปของตารางแบบ 2 ทาง จำนวน 3 ตาราง เพื่อคำนวณค่าต่างๆ เหล่านี้ ค่าผลรวมของกำลังสองหาได้จาก

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \gamma_{ij}^2 - \frac{\gamma_{\dots}^2}{abcn} - SS_A - SS_B = SS_{Subtotal(AB)} - SS_A - SS_B \quad (2.6)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \gamma_{ik}^2 - \frac{\gamma_{\dots}^2}{abcn} - SS_A - SS_C = SS_{Subtotal(AC)} - SS_A - SS_C \quad (2.7)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \gamma_{jk}^2 - \frac{\gamma_{\dots}^2}{abcn} - SS_B - SS_C = SS_{Subtotal(BC)} - SS_B - SS_C \quad (2.8)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของอันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัย หาได้จากสูตร

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \gamma_{ijk}^2 - \frac{\gamma_{\dots}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2.9)$$

$$SS_{ABC} = SS_{Subtotal(ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2.10)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดหาได้จากการลบผลรวมของกำลังสองทั้งหมดที่เกิดจากผลหลักและอันตรกิริยาจากผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง

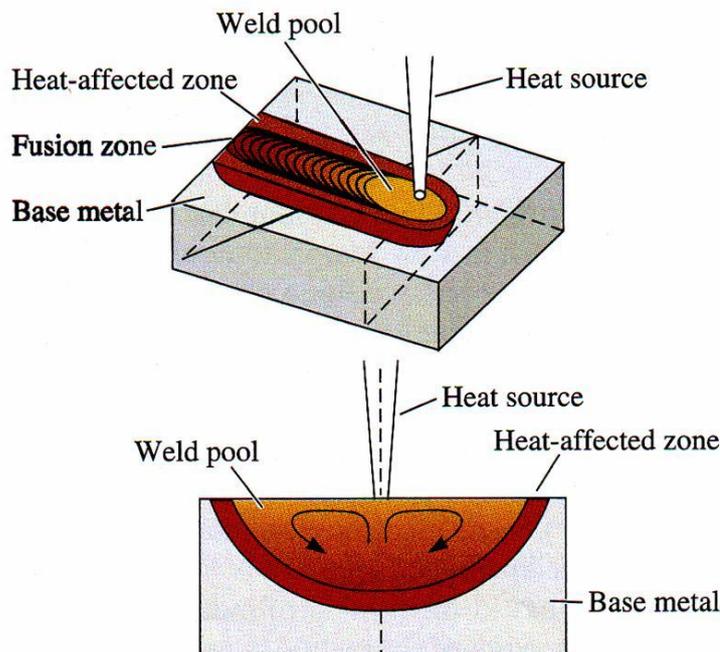
$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotal(ABC)} \quad (2.10)$$

2.2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

เป็นการนำวิธีการทางสถิติใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลและความน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าการยึดตัว ของชิ้นทดสอบบันทึกผลการทดลอง สถิติที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์ ค่าทดสอบของชิ้นทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย คือ สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเก็บรวบรวมข้อมูล การนำเสนอข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การแปลความหมายของข้อมูล ตลอดจนทฤษฎีและการวิวัฒนาการทางสถิติ เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และ สถิติเชิงอนุมาน (Inferential statistic) เป็นผลมาจากการรวบรวมทฤษฎีความน่าจะเป็นกับการใช้ข้อมูลทางสถิติเข้าด้วยกัน และค่าทางสถิติที่หาได้ไปใช้เป็นเครื่องมือในการประมาณ การทดสอบสมมติฐาน การทำนาย การตัดสินใจเกี่ยวกับปัญหาบางอย่างที่ต้องการ เพื่อหาค่าความแปรปรวน และอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

2.3 การเชื่อม

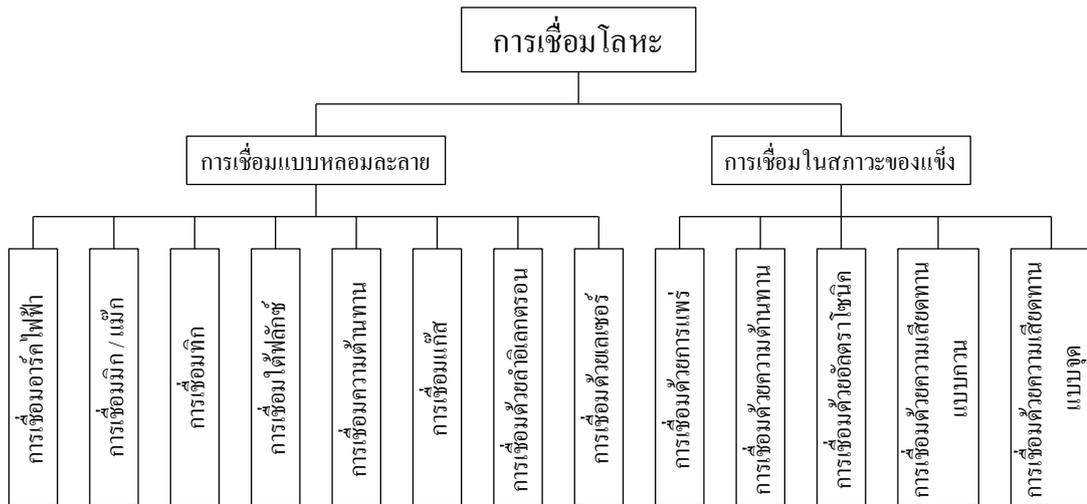
2.3.1 นียามการเชื่อม



รูปที่ 2.6 หลักการพื้นฐานในการเชื่อมโลหะ [13]

การเชื่อมโลหะ คือ การต่อชิ้นโลหะเข้าด้วยกันโดยอาศัยความร้อนในการหลอมละลายรอยต่อระหว่างโลหะสองชิ้นให้หลอมละลายเข้าด้วยกันและเปลี่ยนเป็นโลหะชิ้นเดียวกัน โดยขณะที่โลหะที่บริเวณรอยต่อเกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันนั้น อาจเติมโลหะผสมบางตัวในลักษณะที่เรียกว่าลวดเชื่อม (Filler metal) ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติบางตัวในแนวเชื่อมให้ดีขึ้น ตัวอย่างการเชื่อมโลหะอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 2.6 ความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อน (Heat source) ถูกส่งผ่านไปที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะสองแผ่น (Base metals) ทำให้เกิดการหลอมละลายรวมกันที่บริเวณบ่อเชื่อม (Weld

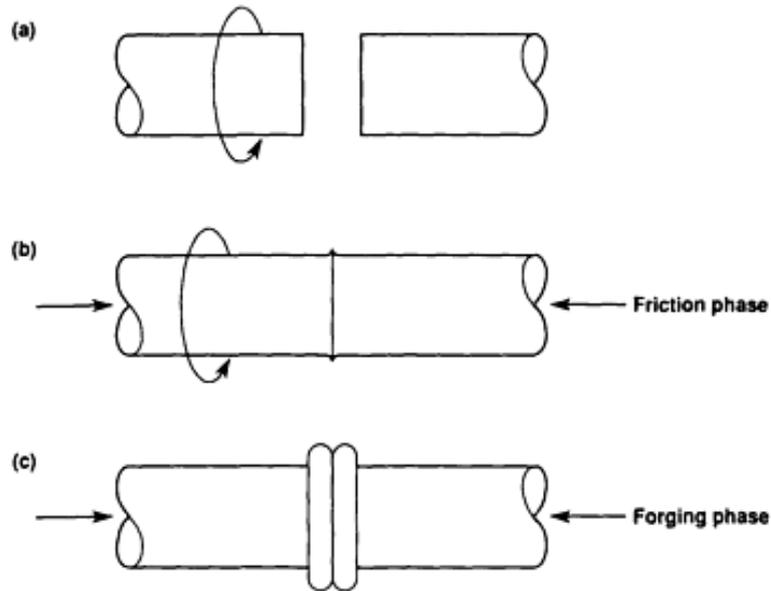
pool) และเมื่อเคลื่อนที่แหล่งให้ความร้อนไปตามแนวรอยต่อ จะทำให้เกิดแนวเชื่อมขึ้น โดยบริเวณบ่อเชื่อมหรือพื้นที่หลอมละลาย (Fusion zone) นี้ จะก่อให้เกิดการแข็งตัวเป็นแนวเชื่อมที่มีโครงสร้างแตกต่างจากโลหะหลัก (Base metal) ในการเชื่อมพื้นที่สำคัญอีกพื้นที่ที่มีความสำคัญ คือ พื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat affected zone) พื้นที่นี้อยู่ถัดออกไปจากพื้นที่การหลอมละลาย เป็นพื้นที่ๆ ไม่มีการหลอมละลาย แต่ความร้อนที่เกิดจากพื้นที่หลอมละลายทำให้โครงสร้างบริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลง และส่งผลทำให้สมบัติของโลหะเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.7 รูปแบบของกระบวนการเชื่อม [13]

เทคโนโลยีการเชื่อมในปัจจุบันได้แบ่งการเชื่อมออกเป็น 2 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.7 คือ การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) และการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) การเชื่อมแบบหลอมละลาย หรือบางครั้งเรียกว่า การเชื่อมหลอมละลายแบบดั้งเดิม (Conventional fusion welding) ความหมายของการเชื่อมแบบหลอมละลายนี้มีลักษณะเดียวกันดังอธิบายในรูปที่ 2.6 การเชื่อมหลอมละลายสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายวิธี ขณะที่การเชื่อมในสภาวะของแข็ง คือ การเชื่อมในสภาวะที่โลหะหลักไม่เกิดการหลอมละลาย แต่อาศัยความร้อนที่เกิดจากแรงทางกล ทำให้โลหะเกิดการเชื่อมประสานกัน

การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid Solution Welding) คือ การเชื่อมต่อวัสดุสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยโลหะบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชิ้นไม่เกิดการหลอมละลาย หรืออุณหภูมิของรอยต่อมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุที่ทำการเชื่อม ส่วนมากรอยต่อของวัสดุเกิดการเชื่อมยึดกันได้ด้วยแรงทางกลหรือความเสียดทาน ตัวอย่างของการเชื่อมในสภาวะของแข็งแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยกระบวนการเชื่อมที่แสดงเรียกว่า การเชื่อมด้วยการเสียดทาน (Friction Welding) มีขั้นตอนการเชื่อม คือ วัสดุทรงกระบอกตัวที่หนึ่งหมุนด้วยความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 2.8 (a) กดเข้าหาวัสดุทรงกระบอกตัวที่สองที่ถูกยึดแน่นอยู่กับที่ ไม่มีการหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (b) ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานทำให้วัสดุบริเวณรอยต่อเกิดการอ่อนตัว ขณะเดียวกันแรงกดในแนวแกนยาวของแท่งทรงกระบอก จะอัดชิ้นงานเข้าด้วยกันทำให้เกิดการเชื่อมยึดเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.8 การเชื่อมด้วยการเสียดทาน [14]

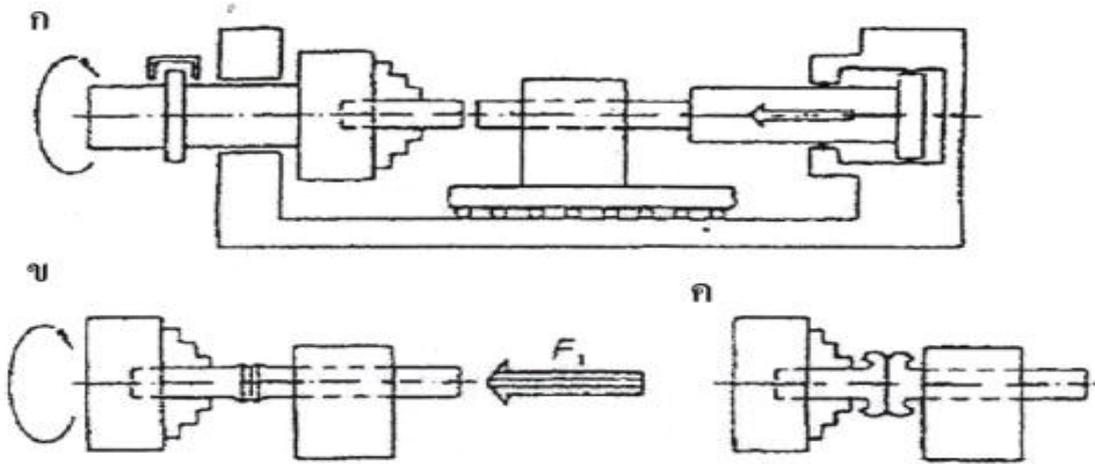
รูปแบบของการเชื่อมในสถานะของแข็งประกอบไปด้วยการเชื่อมต่างๆ เช่น การเชื่อมด้วยการแพร่ (Diffusion welding) การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding) การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding) การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด (Friction spot joining) หรือการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นต้น เดิมทีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมีวิธีการเชื่อมอยู่ 3 วิธีด้วยกัน แต่เนื่องจากได้มีการวิจัยและพัฒนาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน จึงสามารถแบ่งการเชื่อมด้วยการเสียดทานออกเป็น 4 วิธี คือ

- การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบธรรมดา (Conventional Friction Welding) เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อน โดยให้โลหะชิ้นงานชิ้นหนึ่ง และอีกชิ้นหนึ่งยึดอยู่กับที่ หลังจากเวลาผ่านไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง แล้วให้แรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งชิ้นงานหลอมติดกัน และจะหยุดหมุนทันที

- การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบแรงเฉื่อย (Inertia Welding) ชิ้นงานมีสองส่วน คือ ส่วนที่หมุนและส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนที่หมุนจะถูกยึดอยู่ในอุปกรณ์ของเครื่องเชื่อม ซึ่งมีคอลเลค-ชัค (Collect-chuck) และล้อช่วยแรง (Flywheel) ซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่ ที่ความเร็วหนึ่งจากนั้นจึงหยุดให้พลังงานที่ไปหมุนล้อช่วยแรง แต่ล้อช่วยแรงยังหมุนด้วยตัวเองอยู่เนื่องจากแรงเฉื่อยในช่วงเวลาที่ล้อช่วยแรงหมุนด้วยตัวเองนี้ เมื่อนำชิ้นงานที่จับยึดอยู่กับที่มาสัมผัสกับชิ้นงานส่วนที่หมุนภายใต้แรงกดคงที่ พลังงานที่เกิดจากล้อช่วยแรงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานจะเกิดการหลอมเชื่อมติดกัน

- การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบล้อช่วยแรง (Flywheel Friction Welding) เป็นการรวมการเชื่อมแบบธรรมดาและแบบแรงเฉื่อยเข้าด้วยกัน โดยล้อช่วยแรงจะต่ออยู่กับมอเตอร์ขับเคลื่อนเพื่อใช้ถ่ายกำลังไปยังเพลลาหมุน (Spindle) และตัวคัปเปิล (Couple) ซึ่งต่อรวมอยู่กับคลัทช์ (Clutch) ระบบของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อช่วยแรงจะหมุนอยู่ตลอดเวลา ชิ้นงานส่วนที่หมุนจะต่ออยู่กับคัปเปิลและอีกชิ้นหนึ่งอยู่กับที่หลังจากได้ความเร็วรอบของชิ้นส่วนที่หมุนตามที่ต้องการแล้วจึงให้แรงอัดชิ้นงานส่วนที่อยู่กับที่กับส่วนที่หมุน โดยเพิ่มแรงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อชิ้นงานติดกันก็จะหยุดหมุนทันที

- กระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ดีในสถานะของแข็ง คิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมประเทศอังกฤษ (The welding institute : TWI) เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเชื่อมแบบทั่วไป (ก) ชิ้นงานด้านซ้ายหมุนด้วยความเร็วรอบ (n) และชิ้นงานด้านขวาถูกเลื่อนเข้าด้วยแรงจากไฮดรอลิก ; (ข) ชิ้นงานด้านขวาถูกอัดด้วยแรง (F_1) จนชิ้นงานหลอมละลาย ; (ค) ชิ้นงานด้านขวาถูกอัดจนติดกันอย่างสมบูรณ์กับชิ้นงานด้านซ้าย ชิ้นงานเชื่อมจะหยุดหมุนทันที [14]

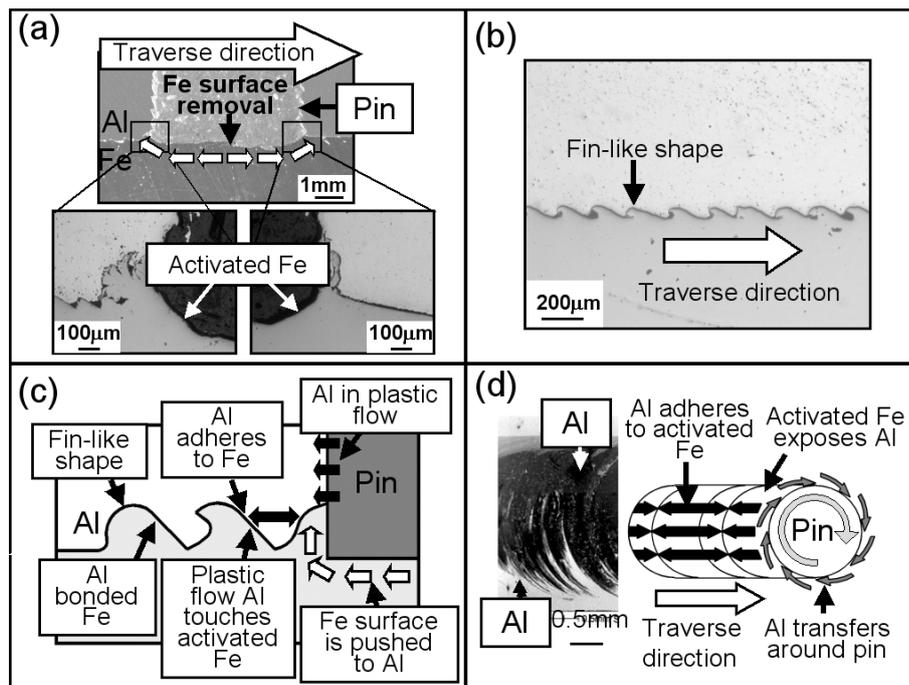
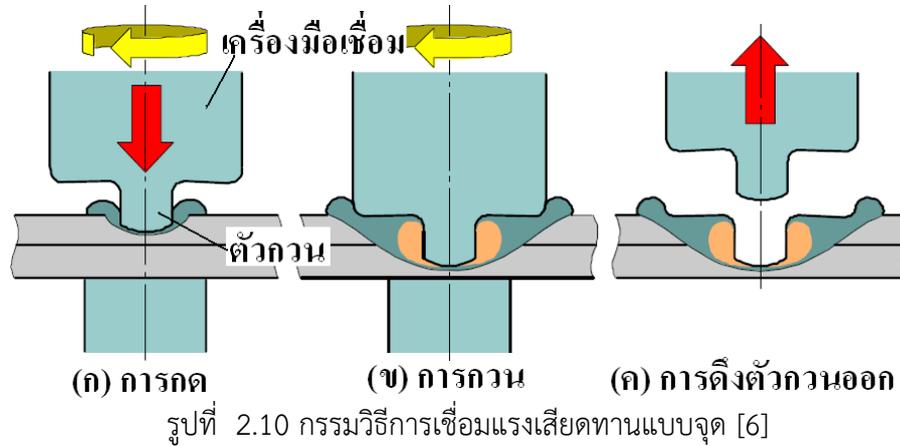
2.3.2 การเชื่อมเสียดทานแบบจุด

ก. นิยามการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Spot Joining : FSJ) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ถูกคิดค้นมาเพื่อทดแทนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding : RSW) ซึ่งจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการเชื่อมที่สูง โรงงานผลิตรถยนต์ในประเทศญี่ปุ่น ได้แก่ กลุ่มบริษัทมาสด้า และบริษัทอุตสาหกรรมหนักคาวาซากิ ได้พัฒนากรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Spot Joining : FSJ) นี้ขึ้นมา เช่น ในโครงสร้างของรถยนต์มาสด้า รุ่น RX-8 หรือ รุ่น Loadstar เป็นต้น [6] ซึ่ง FSJ นี้เป็นการเชื่อมวัสดุในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ซึ่งมีกระบวนการเชื่อมพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.10 เครื่องมือเชื่อมที่ประกอบไปด้วยตัวกวนที่หมุนถูกกดลงไปบนรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) จนกระทั่งปลายของตัวกวนถูกสอดเข้าไปในระยะที่กำหนด ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวเครื่องมือ เชื่อมทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนหรือการกวนเนื่องจากตัวกวนดังรูปที่ 1 (ข) ทำให้เกิดการรวมตัวของวัสดุบริเวณรอยต่อ ตัวกวนนี้จะถูกสอดอยู่ตามระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นตัวกวนจะถูกยกขึ้นดังรูปที่ 2.10 (ค) และทำให้เกิดรอยต่อขึ้น [7]

ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กด้วยการเสียดทานแบบจุดนั้นพบการศึกษาและรายงานไว้ค่อนข้างน้อย แต่มีทฤษฎีที่กล่าวถึงกระบวนการเชื่อมยึดระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก แต่เป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ต้องเดินแนว เพื่อให้เกิดแนวเชื่อมที่มีความน่า

สนใจ คือ ทฤษฎีการกระตุ้นผิวเพื่อให้เกิดการเกาะยึด [15-17] ในการเชื่อมรอยต่อเกยระหว่าง อลูมิเนียม A5083 และเหล็กกล้า SS400 ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กลไกการเชื่อมยึดของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก [12]

ขั้นตอนที่ 1 ตัวกวนที่หมุนสอดลงไปในงานจนกระทั่งปลายของตัวกวนอยู่ในตำแหน่งความลึกที่กำหนด ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างวัสดุและตัวกวนทำให้วัสดุรอบๆตัวกวนอ่อนตัวเข้าสู่ภาวะพลาสติกไหลเหมือนเหลวคล้ายของไหล (Fluid-like Plastic State) อลูมิเนียมจะเกิดการเคลื่อนที่รอบๆตัวกวน

ขั้นตอนที่ 2 ผิวของเหล็กภายใต้ปลายตัวกวนจะถูกขัดและกำจัดชั้นบางๆบนผิวหน้าของเหล็กด้วยตัวกวนที่กำลังหมุนดังแสดงในรูปที่ 2.11 (a) ส่วนของผิวหน้าเหล็กจะถูกดันขึ้นไปบนด้านอลูมิเนียมและมีลักษณะคล้ายกับครีบของปลา (Fin-like Shape) ดังแสดงในรูปที่ 2 (b) ผิวของเหล็กที่ติดกับตัว

กวนที่หมุนจะเปลี่ยนสถานะเป็น “ผิวกระตุ้น (Activated Steel Surface)” ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (a) และ (c)

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อตัวกวนเริ่มเคลื่อนที่ตามทิศทางการเดินแนวเชื่อมอลูมิเนียมจะถูกส่งผ่านรอบๆตัวกวนจากด้านหน้าของบ่าเครื่องมือสู่ด้านหลังของบ่าเครื่องมือ และเข้าสู่ช่องว่างระหว่างตัวกวนและครีบของเหล็กที่สร้างขึ้นและมีภาวะเป็นผิวกระตุ้นในขั้นตอนที่ 2 ดังแสดงในรูป 2.11 (c) ทิศทางการเติมอลูมิเนียมแสดงไว้ในรูป 2.11 (d) จากนั้นผิวกระตุ้นของเหล็กดึงดูดอลูมิเนียมที่เคลื่อนที่ใกล้เคียงและเกิดการยึดเหนี่ยวกันระหว่างโลหะสองชนิดด้วยพันธะโลหะ (Metallic Bond)

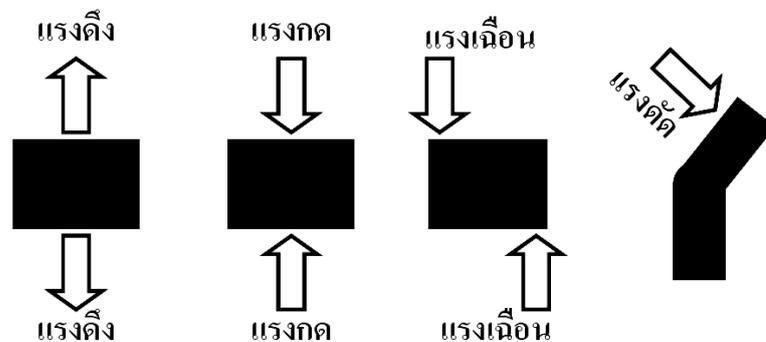
ขั้นตอนที่ 4 ตัวกวนที่หมุนและเคลื่อนที่ตามทิศทางการเดินแนวเชื่อมสร้างครีบของเหล็กขึ้นมาและเปลี่ยนภาวะเป็นผิวกระตุ้นดังแสดงในรูป 2.11 (ค) และ (ง) เมื่อครีบอันอื่นๆถูกสร้างขึ้นและดันเข้าหาอลูมิเนียมและทำให้เกิดการเชื่อมยึดระหว่างโลหะทั้งสองขึ้น

ข. ตัวแปรการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

รอยต่อของวัสดุที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานแบบจุด จะเกิดจากการไหลตัวของวัสดุที่อ่อนตัวจากความร้อนเสียดทานและเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุ ตัวแปรการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่บ่งชี้การเกิดขึ้นของการไหลอย่างมีประสิทธิภาพของวัสดุ และค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน ตัวแปรการเชื่อมที่สำคัญประกอบไปด้วย

- ความหนาของวัสดุ
- ชนิดของรอยต่อ
- ชนิดของวัสดุ
- รูปร่างของตัวกวน
- ความเร็วรอบของตัวกวน
- ความเร็วในกตตัวกวนลงสู่รอยต่อ
- แรงกดตัวกวน
- เวลากดแช่ตัวกวนที่ความลึกที่กำหนด

2.4 การทดสอบวัสดุ [13]

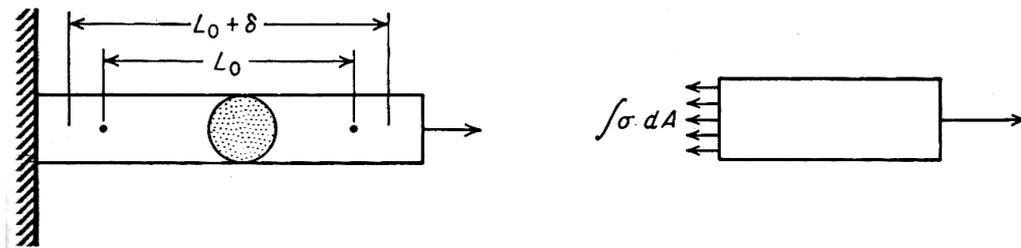


รูปที่ 2.22 ตัวอย่างรูปแบบของแรงกระทำ [13]

สมบัติทางกลของวัสดุเป็นหนึ่งในคุณลักษณะสำคัญในการออกแบบโครงสร้างต่างๆ เพื่อนำไปทำการรับแรงในการใช้งานจริง สมบัติทางกลของวัสดุกล่าวได้ในภาพรวม คือ ความสามารถของวัสดุที่ต้านทานแรงกระทำกับตัวมันเองเพื่อที่จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ หากพิจารณาตามรูปแบบของแรงกระทำต่อวัสดุสามารถแบ่งรูปแบบในการกระทำได้ดังนี้ แรง ดึง แรงกด แรงเฉือน แรงดัด รูปแบบของแรงกระทำได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 จากรูปแบบของแรงที่กระทำต่อวัสดุ ลักษณะของความเค้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ มีดังนี้

2.5.1 ความเค้นและเครียดแรงดึง

เพื่อให้เข้าใจความเค้นและความเครียด ให้พิจารณารูปที่ 1.15-1.17 เมื่อชิ้นงานทรงกระบอกถูกดึงออกมาให้ยืดตัวออกไป วัสดุจะเกิดแรงต้านเล็กๆ ในเนื้อวัสดุลักษณะนี้เรียกว่าความเค้น (Stress) โดยสามารถหาค่าได้โดยหาอัตราส่วนระหว่างแรงกระทำและพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ตั้งฉากกับแนวแรงดึง สมการที่ 2.11 ขณะที่ค่าความเครียด คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่ยืดออกเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานดังสมการที่ 2.12 ค่าความสัมพันธ์และสัญลักษณ์ในสมการที่ 2.11-2.12 แสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ลักษณะการเกิดความเค้นและความเครียด [18]

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2.11)$$

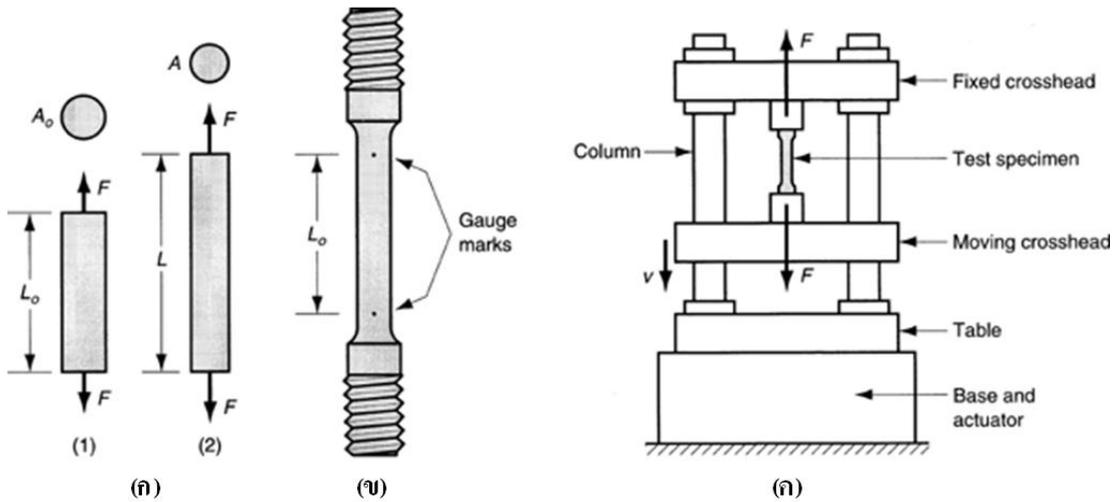
$$e_t = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (2.12)$$

$$\% \text{elongation} = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100\% \quad (2.13)$$

$$\% R.A. = \frac{(A - A_0)}{A_0} \times 100\% \quad (2.14)$$

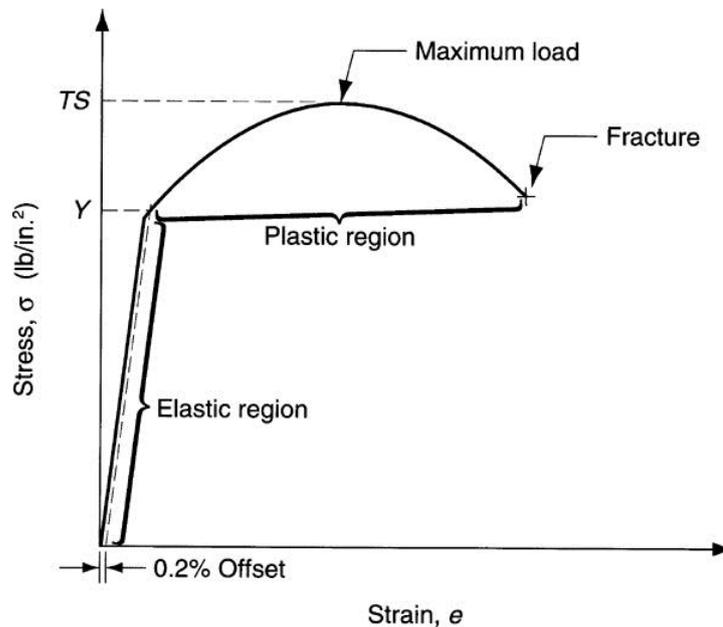
เมื่อ σ_t = ความเค้น
 F_t = แรงกระทำ
 e_t = ความเครียด

- L = ความยาวสุดท้าย
- L_0 = ความยาวเริ่มต้น
- A = พื้นที่หน้าตัดสุดท้าย
- A_0 = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น



รูปที่ 2.24 การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ [18]

นอกจากนั้น ในกรณีของการทดสอบแรงดึงสามารถหาค่าที่จำเป็นในการออกแบบชิ้นงาน 2 ค่า คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% elongation) และค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (% reduction of area: %R.A.) ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 2.13 และ 2.14



รูปที่ 2.25 เส้นโค้งการทดสอบแรงดึง [18]

รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการทดสอบแรงดึงวัสดุชนิดหนึ่ง พบส่วนประกอบต่างๆ ที่มีความสำคัญดังนี้

- ช่วงยืดหยุ่น (Elastic region) เกิดเมื่อเริ่มทำการดึงวัสดุ ช่วงนี้เมื่อทำการปล่อยแรงออก วัสดุจะหดกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น ค่าความยาวสุดท้ายเท่ากับความยาวเริ่มต้น เป็นช่วงที่ความเค้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเครียดความชันของกราฟคงที่ E ช่วงๆนี้จะสามารถทราบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นซึ่งมีค่าดังสมการที่ 2.15 หรือสมการตามกฎของฮุก (Hook's law) หรือในโลหะบางชนิดพบได้ดังแสดงในตารางที่ 2.5

$$E = \frac{\sigma_t}{e_t} \quad (2.15)$$

ตารางที่ 2.5 โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด [18]

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

- จุดคราก (Yield point: Y) คือ จุดที่วัสดุเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร เป็นจุดที่เมื่อปล่อยแรงออกวัสดุจะไม่หดกลับไปที่ความยาวเริ่มต้น โดยปกติจุดครากจะสังเกตค่อนข้างยาก แต่สามารถทำได้โดยวิธีการที่เรียกว่า “0.2% ความเค้นพิสูจน์ (0.2% Proof stress)” สามารถทำได้โดยการลากเส้นโดยแบ่งส่วนของด้านความเครียดออกเป็น 100 ส่วน และจากจุดเริ่มต้น ที่ระยะประมาณ 0.2 ลากเส้นขนานกับเส้นกราฟการทดสอบขึ้นไป โดยมีระยะขนานไปกับเส้นช่วงยืดหยุ่นดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 2.25 จุดที่เส้นประตัดกับเส้นการทดสอบจุดนั้น คือ จุดคราก ค่าความแข็งแรงครากของโลหะบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.6
- ช่วงเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic region) เป็นช่วงที่ต่อเนื่องมาจากช่วงยืดหยุ่น หากทำการเพิ่มแรงในการดึงวัสดุจะเปลี่ยนรูปถาวรเมื่อปล่อยแรงออกวัสดุจะไม่หดกลับที่ความยาวเริ่มต้น วัสดุจะแสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดๆหนึ่งจะได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูง สุดที่เรียกว่า “ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength: TS)” ซึ่งโลหะแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.6 จากนั้นเมื่อทำการออกแรงต่อไป ค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งเกิดการแตกหักที่จุดสุดท้าย (Fracture point) ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดแตกหักเรียกว่า “ความแข็งแรงที่จุดแตกหัก (Fracture strength)”
- การเพิ่มความแข็งแรงของโลหะโดยความเครียด หรือการแปรรูปถาวร (Strain or work hardening) คือ การเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงของโลหะเนื่องจากแปรรูปอย่างถาวรที่

อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ เช่น ในเหล็กกล้าคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C เป็นต้น

ตารางที่ 2.6 ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด [18]

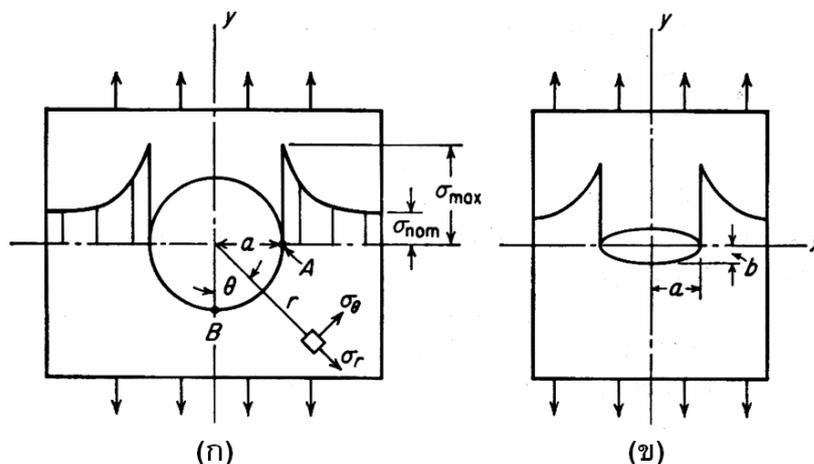
โลหะ	ความแข็งแรงคราก (MPa)	ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)
อลูมิเนียมผสม	175	350
เหล็กหล่อ	275	275
ทองแดงผสม	205	410
แมกนีเซียมทองแดง	175	275

2.5.2 ความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration)

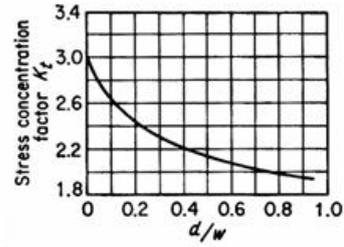
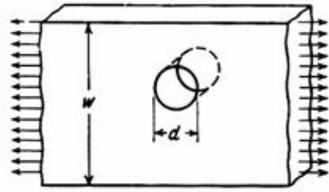
รูปร่างของชิ้นงานที่ไม่มีความต่อเนื่อง เช่น รู ร่องบาก ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณใกล้เค้นที่ต่อเนื่องนั้นจะมีค่าความเค้น (σ_{max}) ค่อนข้างสูงกว่าความเค้นเฉลี่ยที่ห่างไกลจากความไม่ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.26 บริเวณด้านข้างของรูวงกลมและรูวงรี หากไม่มีความเค้นที่กระจายตลอดทั้งแผ่น จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดของแนวแรงดึงที่กล่าวผ่านมาก่อนหน้านี้ ค่าความเข้มข้นของความเค้นหาได้โดยการหาค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี (Theoretical stress-concentration factor: K_t) ดังแสดงในสมการที่ 2.16 ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายอัตราส่วนระหว่างความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นปกติที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดจริงของชิ้นงาน ลักษณะระดับความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างชิ้นงานตัวอย่างที่มีความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิวและค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีแสดงในรูปที่ 2.27

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nominal}} \quad (2.16)$$

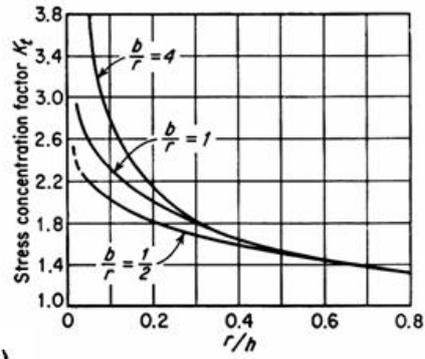
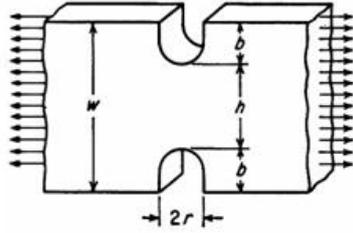
- เมื่อ
- K_t = องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี
 - σ_{max} = ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใกล้จุดที่มีความไม่ต่อเนื่อง
 - $\sigma_{nominal}$ = ความเค้นปกติในชิ้นงานที่มีความต่อเนื่อง



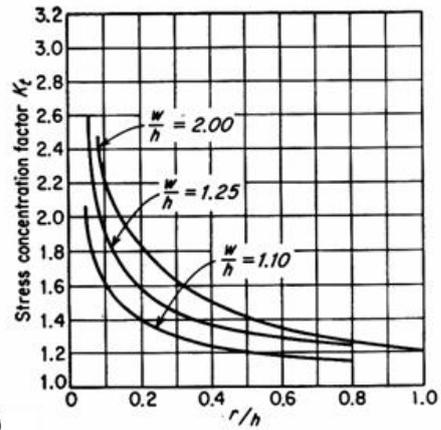
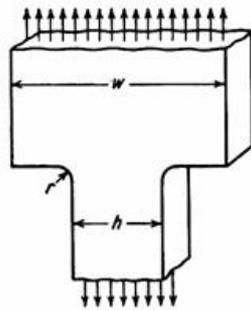
รูปที่ 2.26 การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รูวงกลม และ (ข) รูวงรี [19]



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.27 องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ [19]

2.5.3 พิกัดเพื่อความปลอดภัย (Safety factor)

ค่าความเค้นใช้งาน (Working stress) หรือค่าความเค้นสูงสุด คือ ค่าความเค้นที่ปลอดภัยสูงสุดในการใช้งานก่อนการพังทลาย พื้นฐานการออกแบบค่าความเค้นใช้งานกำหนดให้อยู่ในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น (Elastic region) อย่างไรก็ตามช่วงที่เรียกว่าช่วงยืดหยุ่นนั้นเป็นช่วงที่ยากต่อการหาค่า ดังนั้นจึงมักกำหนดค่าความเค้นใช้งานจากค่าความแข็งแรงที่จุดครากหรือค่าความแข็งแรงสูงสุดที่จุดใดจุดหนึ่ง ค่าทั้งสองจะนำมาหารด้วยค่าพิกัดเพื่อความปลอดภัย (Safety factor: N) ดังแสดงในสมการที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ [20]

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N} \quad (2.17)$$

$$\sigma_w = \frac{\sigma_{ult}}{N} \quad (2.18)$$

เมื่อ	σ_w	= ความเค้นใช้งาน
	σ_y	= ความเค้นที่จุดคราก
	σ_{utl}	= ความเค้นสูงสุด
	N	= ค่าพิชิตเมื่อความปลอดภัย

ค่าความแข็งแรงครากมักถูกเลือกเป็นค่าที่ใช้คำนวณหาความเค้นใช้งานสำหรับเหล็กกล้าที่ใช้ทำโครงสร้างเนื่องจากจุดดังกล่าววัสดุจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร แต่สำหรับวัสดุอื่นมักเลือกจากความแข็งแรงสูงสุด

2.5.4 การทดสอบความแข็งวิกเกอร์และนู๊ป (Vicker and Knoop hardness test) ตาม JIS Z 2244 [20]

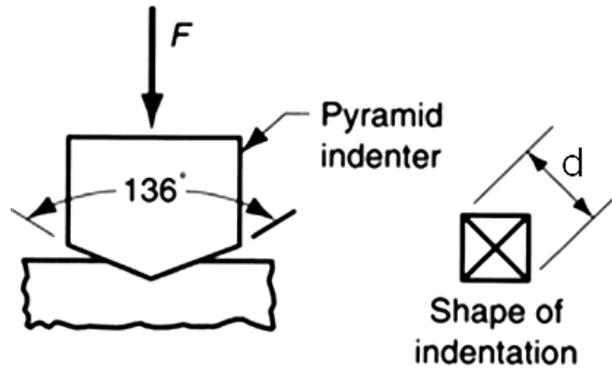
คือ การทดสอบแบบวิกเกอร์ การกดผิวชิ้นงานให้เกิดรอยด้วยแรงกดทดสอบด้วยหัวกดปิระมิดที่มุมเอียงของหัวกดรวมมีค่า 136° ความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยกดดังแสดงในรูปที่ 2.28 ถูกทำการวัดและนำมาทำการคำนวณตามสมการที่ 2.19 ในกรณีแรงกดมีหน่วยเป็นกรัมแรง (gf) แต่ถ้าแรงกดมีหน่วยเป็นนิวตันต้องใช้สมการที่ 2.20

$$Hv = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (2.19)$$

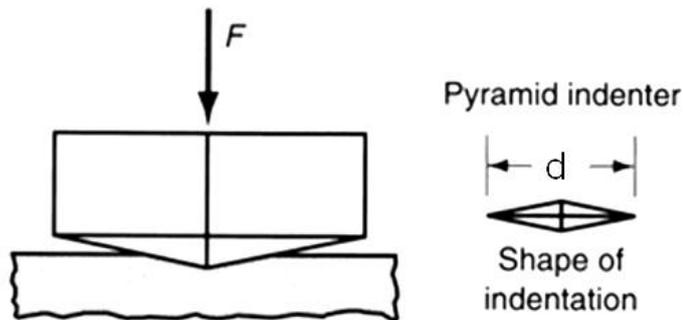
$$Hv = \frac{1.8544}{9.80665} \times \frac{F}{d^2} = 0.18909 \frac{F}{d^2} \quad (2.20)$$

เมื่อ	Hv	= ความแข็ง;bdgdvilN
	F	= แรงกด (N หรือ kgf)
	S	= พื้นที่ผิวของหัวกด (mm^2)
	d	= ความยาวเส้นทแยงมุม (mm)
	θ	= มุมเอียงของหัวกด ($^\circ$)

การทดสอบความแข็งแบบนู๊ป การกดผิวชิ้นงานให้เกิดรอยด้วยแรงกดทดสอบด้วยหัวกดปิระมิดที่มุมเอียงของหัวกดรวมมีค่า $172^\circ 30'$ และ 130° ความยาวของรอยกดดังแสดงในรูปที่ 2.29 ถูกทำการวัดและนำมาทำการคำนวณตามสมการที่ 2.21 ในกรณีแรงกดมีหน่วยเป็นกรัมแรง (gf) แต่ถ้าแรงกดมีหน่วยเป็นนิวตันต้องใช้สมการที่ 2.22



รูปที่ 2.28 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส์ [25]



รูปที่ 2.29 การทดสอบความแข็งแบบบู๊ป [25]

$$Hk = \frac{F}{A} = \frac{F}{cd^2} = \frac{F}{0.07058d^2} = 14.229 \frac{F}{d^2} \quad (2.21)$$

$$Hk = \frac{14.229}{9.80665} \times \frac{F}{d^2} = 1.4509 \frac{F}{d^2} \quad (2.22)$$

- เมื่อ
- Hk = ความแข็งบู๊ป
 - F = แรงกด (N หรือ kgf)
 - A = พื้นที่กด (mm²)
 - c = ค่าคงที่ของหัวกดคำนวณจาก A และ d
 - d = ความยาวด้านยาวของรอยกด (mm)

ผิวทดสอบต้องราบเรียบ และการขัดมันผิวเพื่อให้ง่ายต่อการทดสอบ การวัดค่าชิ้นงานที่มีการเคลือบผิว ต้องทำการกำจัดผิวเคลือบออกก่อนการทดสอบ ผิวชิ้นงานต้องสะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อน ความหนาของชิ้นงานต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 1.5 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุม (d) ในการทดสอบแบบวิกเกอร์ส์ และความหนาของชิ้นงานต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 3.0 เท่าของความยาวรอยกด (d) ในการทดสอบ

แบบนูน ตัวอย่างการแสดงความแข็งแบบวิกเกอร์และนูนแสดงในตารางที่ 2.7 และตัวอย่างของความแข็งวิกเกอร์ของวัสดุและโลหะบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างการแสดงความแข็ง [21]

แรงกด	เวลา	ความแข็ง	การแสดงความแข็ง
0.3 kgf	15s	ความแข็งวิกเกอร์ Hv:250	Hv (0.3) 250
0.3 kgf	30s	ความแข็งวิกเกอร์ Hv:250	Hv (0.3/30) 250
0.1 kgf	15s	ความแข็งนูน Hk:250	Hk (0.1) 250
0.3 kgf	15s	ความแข็งนูน Hk:250	Hv (0.1/30) 250

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างค่าความแข็งของโลหะและเซรามิกส์บางชนิด [21]

วัสดุ	ความแข็งวิกเกอร์ (Hv)	ความแข็งนูน (Hk)
เหล็กกล้าชุบแข็ง	800	850
ซีเมนต์คาร์ไบด์	2000	1400
อลูมิน่า	2200	1500
ทังสเตนคาร์ไบด์	2600	1900
ซิลิกอนคาร์ไบด์	2600	1900
ไททานเนียมไนไตรด์	3000	2300
คิวบิกโบรอนไนไตรด์	6000	4000
เพชร, ผลึกซินเตอร์	7000	5000
เพชร, ธรรมชาติ	10000	8000

2.5.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค [13]

การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) ในขั้นตอนนี้ชิ้นงานตรวจสอบจะถูกเตรียม เพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้



รูปที่ 2.30 กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค [13]

ขึ้นตรวจสอบที่ถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว ไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) ดังแสดงในรูปที่ 2.30 โดยวางชิ้นตรวจสอบให้อยู่ตรงกลางบริเวณที่แสงผ่านและให้ลากล่องเลื่อนมาอยู่ใกล้ชิ้นตรวจสอบมากที่สุด ลำแสงไฟที่ส่องผ่านตกกระทบกับผิวชิ้นทดสอบจะสะท้อนผ่านเลนส์วัตถุ และเลนส์ตาของกล้อง ที่บริเวณขอบเกรนจะเห็นเป็นสีดำ (มืด) ขณะที่เนื้อเกรนเป็นสีเหลือง (สว่าง) แล้วทำการบันทึกผลเพื่อใช้ประกอบในการวิเคราะห์เปรียบเทียบพื้นที่ที่เกิดการเชื่อมต่อไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตได้มีนักวิจัยทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการเชื่อม เพื่อทำการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเข้ากับเหล็กแต่มีข้อจำกัดบางประการที่ทำให้ได้รอยต่อมีประสิทธิรูปไม่เป็นไปตามต้องการ เช่น การเชื่อมด้วยความต้านทาน (Friction Welding: FW) ที่มีข้อจำกัดที่ชิ้นงานอย่างน้อยหนึ่งข้างจะต้องมีภาคตัดเป็นทรงกลม [22] การเชื่อมด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Welding: UW) ที่เริ่มมีการใช้งานเพิ่มขึ้นในงานอุตสาหกรรม แต่วิธีการนี้มีการประยุกต์ใช้งานกับงานที่มีความหนาของแผ่นวัสดุน้อยเท่านั้น [23] การเชื่อมด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Welding: LW) เป็นอีกวิธี ที่มีการใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็ก แต่กรรมวิธีนี้ยากต่อการควบคุมความร้อนที่ให้แก่แนวเชื่อม (Heat Input) ก่อให้เกิดสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะ นอกจากนั้นอุปกรณ์ในการเชื่อมมีราคาค่อนข้างสูง [24] การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งชนิดหนึ่งที่มีการเชื่อมรอยต่อชน [15] และต่อเกลย [16-17] ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่กรรมวิธีนี้ต้องมีการเชื่อมต่อเป็นแนวยาวและไม่เหมาะสมกับการเชื่อมเฉพาะจุด

ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ หนึ่งในกระบวนการเชื่อมที่มีความนิยมในการต่อวัสดุเข้าด้วยกัน คือ การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) และมีงานวิจัยที่ประยุกต์ RSW ในการเชื่อมอลูมิเนียมและเหล็กเข้าด้วยกัน เช่น Watanabe and Doi [3] เชื่อมความต้านทานแบบจุดบนรอยต่อเกลยระหว่างอลูมิเนียมผสม A1050, A5052 และ A5086 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ พบว่าค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าลดลงเมื่อปริมาณโลหะผสมแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารประกอบกึ่งโลหะที่เปราะมีค่าความหนาเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นได้รายงานผลการใช้แผ่นอลูมิเนียม A1050 เป็นแผ่นสอดระหว่างรอยต่อเกลยของ A5052-SS400 และ A5086-SS400 พบว่าค่าความแข็งแรงของรอยต่อเกลยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นสอดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาของสารประกอบกึ่งโลหะและปริมาณแมกนีเซียมในสารประกอบกึ่งโลหะมีค่าลดลง Sun *et al.* [4-5] ทำการเชื่อมความต้านทานแบบจุดบนรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสม AA5052 และเหล็กกล้า SAE1008 โดยใช้แผ่นเหล็กเคลือบอลูมิเนียมเป็นแผ่นสอดพบว่าความแข็งแรงของรอยต่อเกลยมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเฟสสารประกอบกึ่งโลหะที่รอยต่อด้านอลูมิเนียมและเหล็กก็เกิดขึ้นด้วย นอกจากนั้นการเปรียบเทียบความแข็งแรงของรอยต่อที่ได้มีค่าสูงกว่ารอยต่อที่ต่อเข้าด้วยกันด้วยวิธีเวท (Self-rivet Piercing)

ถึงแม้ว่า RSW สามารถทำให้เกิดความแข็งแรงสูงแต่ปัญหาของการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะที่เปราะยังคงเหลือ และนอกจากนั้น RSW ยังเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานค่อนข้างมากในการเชื่อมแผ่นวัสดุซึ่งเป็นข้อบกพร่องในอุตสาหกรรมปัจจุบันที่ต้องการประหยัดพลังงานในการผลิต ด้วยเหตุนี้จึงมีการคิดค้นกระบวนการ FSJ ขึ้นมาและประยุกต์ในการเชื่อมวัสดุเข้าด้วยกัน เช่น Fujimoto *et al.* [6] เชื่อมแรงเสียดทานแบบจุดรอยต่อเกลยระหว่างอลูมิเนียมผสม 6061 กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของรอยต่ออลูมิเนียม 6061 มีค่าความแข็งแรงสูงสุดใกล้เคียงกับ

การเชื่อมความต้านทานแบบจุด อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของรอยต่อไม่ได้แสดงไว้ นอกจากนี้ Tanaka and Kumagai [7] ใช้ FSJ เชื่อมรอยต่อเกยอลูมิเนียม 6061 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของปลายของตัวกวน ที่สอดเข้าไปในรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าและอลูมิเนียมกับความเร็วยรอบของตัวกวน พบว่าที่รอยต่อที่ให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อสูงสุดพบสารประกอบกึ่งโลหะก่อตัวขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเนื่องจากรอยฉีกขาด (Fracture Path) ของรอยต่อไม่ได้เกิดขึ้นผ่านแนวนี้ นอกจากนี้มีการเชื่อมรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม 1100 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่แสดงความแข็งแรงของรอยต่อในระดับที่สูงกว่าอลูมิเนียมที่ใช้ในการเชื่อม [8] อย่างไรก็ตามการประยุกต์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแสดงประสิทธิภาพในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม 5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 ที่แสดงความแข็งแรงประมาณ 40% ของค่าความแข็งแรงของอลูมิเนียมหลัก [9]