

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุ

ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในการนำวัสดุไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ในงานวิจัยนี้วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยโลหะแผ่นรีดอลูมิเนียมบริสุทธิ์เกรด 1100 และโลหะแผ่นรีดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 โดยมีทฤษฎีของโลหะทั้งสองที่สำคัญดังนี้

2.1.1 อลูมิเนียม [5]

สุรรัตน์ ตรียวนพงษ์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [5] ได้นำเสนอข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับอลูมิเนียมผสมสำคัญ ดังนี้ 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 เมื่อทำการขึ้นรูปเย็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [6]

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 และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่าง ๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสีย คือในด้านของความแข็งแรง และคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็น คือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Strain Hardening)

ตารางที่ 2.2 การแบ่งเกรดของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม [6]

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 [6]

รหัส	ส่วนผสมทางเคมี (%)						การอบ	ความแข็งแรง (MPa)	%การยืดตัว
	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 โดยสามารถทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงและความสามารถในการ

เชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ คือ จะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีการย้ำหมุด

- อลูมิเนียมผสมแมงกานีส (อนุกรม 3xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเหมือนกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์ แต่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้
- อลูมิเนียมผสมซิลิกอน (อนุกรม 4xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาวะของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะแข็งตัวจะไม่เกิดความแตกร้าวทั้งในสภาวะร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอลูมิเนียมผสมและอลูมิเนียมหล่อ
- อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (อนุกรม 5xxx) บางครั้งจะมีการเติม แมงกานีสลงไปด้วย อลูมิเนียมผสมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จึงนิยมนำไปทำลวดเติมเหมือนอนุกรม 4xxx นอกจากนั้นยังนำไปทำถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)
- อลูมิเนียมแมกนีเซียม – ซิลิกอน (อนุกรม 6xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อนำอลูมิเนียมผสมชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่าง ๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน
- อลูมิเนียมสังกะสี – แมกนีเซียม (อนุกรม 7xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลัก และแมงกานีสเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อยอลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อม อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้นไป โดยจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณดังกล่าวได้ เกิดความแข็งแรงจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

นอกจากสัญลักษณ์ตัวเลข 4 ตัวแล้ว อลูมิเนียมยังมีสัญลักษณ์กรรมวิธีทางความร้อนย่อทำด้วยตัวอักษรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นการกระทำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมผสมโดยที่มีวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และได้กำหนดสัญลักษณ์อักษรตามหลังเพื่อที่จะเป็นการระบุถึงกรรมวิธีทางความร้อนมากกระทำต่ออลูมิเนียมผสมชนิดนั้นๆ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Non - Heat Treatable คือกลุ่ม 1xxx 3xxx และกลุ่ม 5xxx ส่วนอลูมิเนียมในกลุ่ม Heat Treatable เช่นกลุ่ม 6xxx 4xxx และกลุ่ม 2xxx ก็สามารถเชื่อมได้แต่ต้องอาศัยเทคนิคและความชำนาญเป็นพิเศษ และอาจจะทำให้ความเหนียวของอลูมิเนียมลดลงได้ ส่วนกลุ่ม 7xxx คือกลุ่มที่มีความแข็งแรงสูงมากเชื่อมได้ลำบากมากจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมแบบอาร์ค และรหัสของกระบวนการทางความร้อนได้ถูกกำหนดโดยสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี 1948 เป็นตัวอักษร 4 ตัว ตามด้วยตัวเลขอีกหนึ่งหรือสองตัว เพื่อบอกถึงความแตกต่างในสาระสำคัญของแต่ละกรรมวิธีได้แก่

ตารางที่ 2.4 อักษรห้อยท้ายที่แสดงรายละเอียดของการผลิต [6]

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

- F หมายถึง สภาพโลหะที่ได้จากการหล่อ โดยยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหรือทางกล
- O หมายถึง สภาพของโลหะภายหลังการอบอ่อนซึ่งโลหะจะเกิดผิวกใหม่ เป็นภาวะที่โลหะจะอ่อนและเหนียวที่สุดในบรรดาอุณหภูมิเหนียวรีดทั้งหลาย
- 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 โลหะผ่านการอบละลายทำให้แข็งตัวแบบเทียมด้วยกระบวนการทางความร้อน แล้วจึงนำไปแปรรูปเย็น
- T10 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายบางส่วนทำนองเดียวกับ T5 นำไปผ่านการแปรรูปเย็นก่อนทำให้แข็งตัวแบบเทียม

อย่างไรก็ตามการใช้งานอลูมิเนียมบริสุทธิ์ค่อนข้างจำกัด ส่วนมากมักใช้กับงานที่ต้องการความสามารถในการขึ้นรูปสูง เช่น อุปกรณ์เครื่องครัว อุปกรณ์ขนถ่ายและจัดเก็บสารเคมี เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการเติมธาตุผสมต่างๆ ลงไปในอลูมิเนียมและทำให้เกิดอลูมิเนียมเกรดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

นอกจากนั้นสัญลักษณ์ที่แสดงชนิดของอลูมิเนียมยังมีตัวอักษรย่อท้ายต่อจากตัวเลข 4 ตัวที่เป็นสิ่งสำคัญที่บ่งบอกให้ทราบถึงรายละเอียดของการผลิตดังแสดงในตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลและการใช้งานของอลูมิเนียมผสมบางเกรดแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

2.1.2 เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี [7]

ธรรมบุญ อินทรพล [7] ได้นำเสนอข้อมูลเบื้องต้น ของเหล็กกล้าเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีในประเทศไทย ตาม มอก.50-2548 แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ แผ่นม้วน คือ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีที่ทำเป็นม้วน แผ่นตัด คือ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นม้วนที่ม้วนตัดแบ่งเป็นแผ่น แผ่นลูกฟูกลอนใหญ่ คือ เหล็กแผ่นที่ได้ นำเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นตัดมาขึ้นรูปเป็นลอนขนาดใหญ่ แผ่นลูกฟูกลอนเล็ก คือ เหล็กแผ่นที่ได้ นำเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นตัดมาขึ้นรูปเป็นลอนขนาดเล็ก

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีชนิดแผ่นม้วนและแผ่นตัด สังกะสีชนิดนี้ส่วนใหญ่ ใช้ในงานอุตสาหกรรม ต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ เครื่องทำความร้อน ท่อของ เครื่องปรับอากาศ รางน้ำ ฝ้าโอง และแท็งค์น้ำ เป็นต้น

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นลอนมีลักษณะการใช้งานในการก่อสร้างขนาดเล็กสำหรับใช้กันเป็น อาณาเขตของที่ก่อสร้างและที่พักคนงาน รวมถึงนำมาสร้างเป็นสังกะสีมุงหลังคาบ้าน และฝาบาน เช่นกลุ่ม ลูกค้าในงานเกษตรกรรม

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัดสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มตามกรรมวิธีการ เคลือบสังกะสี คือ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัด โดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า และ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน และแผ่นตัด โดยกรรมวิธีจุ่มร้อน

ก. เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัด โดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า

มาตรฐาน มอก. 2223 ชั้นคุณภาพ SExxxx (โดย xxxx แทนอักษร หรือตัวเลข) เหล็กกล้ากลุ่ม นี้เป็นเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าที่ทำมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น และอาจจะนำไป ผ่านกระบวนการเคลือบทางเคมี การอาบน้ำมัน เพื่อให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากขึ้น

- การผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยวิธีทางไฟฟ้า (Electro galvanized steel, EG) ผลิตโดยการ เคลือบสังกะสีด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าภายในอ่างชุบโดยมีส่วนประกอบ คือ ขั้วบวก ขั้วลบ และสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ เช่น สารละลายสังกะสีซัลเฟต (Zinc sulfate) โดยสังกะสีจะเคลือบลงบนแผ่นเหล็กใน ลักษณะเป็นอ็อนซึ่งจะต่างไปจากวิธีจุ่มร้อนที่เป็นสารละลายของเหลวติดบนแผ่นเหล็ก ดังนั้นประสิทธิภาพ ในการเคลือบผิวของกรรมวิธีทางไฟฟ้าจึงสูงกว่า จากนั้นจะนำไปเคลือบด้วยฟอสเฟส (Phosphate treatment : P) หรือโครเมต (Chromate : C) ซึ่งการเคลือบฟอสเฟตนี้จะช่วยให้ความสามารถในการทาสี ติดได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการเคลือบด้วยโครเมตจะช่วยให้เพิ่มความในสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน และ การป้องกันคราบต่างๆ เนื่องจากการเคลือบโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า กระทำที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้น ความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเหล็กแผ่นพื้นเป็นหลัก โดยไม่ผลกระทบบ จากความร้อนเหมือนกับในกรณีของการผลิตแบบจุ่มร้อนซึ่งในขณะที่เคลือบแผ่นเหล็กจะทำให้เกิดการเย็น

ตัวอย่างรวดเร็ว เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยกรรมวิธีการทางไฟฟ้าจึงมีความสามารถในการขึ้นรูป การทาสี ตัด และการเชื่อมที่ดียเยี่ยม

ตัวอย่างการใช้งานเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน เฟอร์นิเจอร์ เครื่องปรับอากาศ ฝาครอบคอมพิวเตอร์ ตัวถังและชิ้นส่วนภายนอกรถยนต์ วัสดุก่อสร้าง เช่น เหล็กทำค้ำยันมู่ลี่ปิดหน้าร้าน

ข. เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัด โดยกรรมวิธีจุ่มร้อน

มาตรฐาน มอก.2131 ชั้นคุณภาพ CGCxxx (โดยที่ xxx แทนตัวอักษรหรือตัวเลข) เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี คือ เหล็กกล้ารีดเย็นที่นำมาเคลือบผิวด้วยสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน แล้วเคลือบสีด้วยเรซินสังเคราะห์ (Durable synthetic resin paint) ทับอีกครั้ง การชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนนี้ถูกนำออกเผยแพร่ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1742 โดยนักเคมีชาวฝรั่งเศส ชื่อ P.J.Malouin เหล็กแผ่นที่เคลือบด้วยสังกะสีจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนที่เนื้อเหล็ก ในบรรยากาศที่มีการกัดกร่อน สังกะสีจะทำหน้าที่ในการเป็นตัวถูกกัดกร่อนแทนเหล็ก เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีจะต้องปราศจากข้อบกพร่องซึ่งได้แก่ รอยแตก การเคลือบผิวไม่ทั่วถึง การเสียรูป และตำหนิอื่นๆ ที่จะเป็ผลเสียหายต่อการนำไปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จ

- การผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยวิธีจุ่มร้อน SGCC (Hot dipped galvanized: HDG) เหล็กเคลือบกาวไนซ์ หรือเรียกว่าเหล็กเคลือบสังกะสี HDG เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิตและใช้งานอย่างกว้างขวางในประเทศไทย การผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีทำได้โดยการผ่านแผ่นเหล็กอ่างสังกะสี หลอมเหลว (Zinc bath) ที่มีอุณหภูมิประมาณ 465°C เพื่อทำการเคลือบ ผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้สามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ดี และมีคุณสมบัติการทาสีดี ความสามารถในการเชื่อมและการบัดกรีที่ดี แต่เนื่องจากจุดหลอมเหลวของชั้นสังกะสีมีอุณหภูมิต่ำกว่าชั้นเหล็กกล้า ดังนั้นความสามารถในการเชื่อมแบบต่อเนื่องจึงลดลง โดยเป็นผลมาจากสังกะสีที่ติดกับอิเล็กโทรดในขณะที่ทำการเชื่อม ส่วนการบัดกรีจะทำได้โดยง่าย หากใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม ได้แก่ ทองเหลืองและตะกั่ว นอกจากนี้การเคลือบโครเมตภายหลังการเคลือบสังกะสีจะช่วยเพิ่มความสามารถในการบัดกรีได้มากยิ่งขึ้นอีกด้วย แต่ข้อจำกัดในการใช้งานของเหล็กเคลือบสังกะสีแบบนี้ คือ ไม่ควรใช้งานภายใต้สภาวะที่มีการกัดกร่อนที่รุนแรง เช่น บริเวณชายฝั่งทะเล เขตอุตสาหกรรม ตัวอย่างการใช้งาน เช่น กรอบประตู พื้นสำเร็จรูป ผืนภายในอาคารและภายนอกอาคาร อุปกรณ์ระบายความร้อน ท่อระบายอากาศ

สำหรับในประเทศไทย แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนอาจจะพบผิวเป็นแบบที่มีลวดลายแพรวพราว (Spangle) ของผลึก ซึ่งลวดลายนี้อาจยังปรากฏให้เห็นภายหลังจากการเคลือบสีทับ การผลิตแบบ Minimum spangle หรือ Normal spangle จะต้องควบคุมปริมาณตะกั่วที่ผสมในอ่างสังกะสี หลอมเหลวให้ต่ำกว่า 0.15 % และใช้เทคนิคการทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว หรือเพิ่มปริมาณนิวเคลียสที่ผิวเคลือบ (เช่นการพ่นด้วยผงสังกะสี) เพื่อยับยั้งการโตของผลึก

- เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยวิธีจุ่มร้อนและอบ SGACC (Galvanneal หรือ Iron-zinc coating, IZ) เหล็ก IZ เป็นเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเช่นเดียวกับ HDG แต่ต่างกันตรงที่ภายหลังจากการเคลือบผิวเหล็กด้วยสังกะสีแล้ว เหล็กแผ่นจะถูกส่งผ่านไปยังเตาอบ เพื่อเร่งให้เกิดชั้นของสารประกอบ Zn-Fe ผิวชั้นเคลือบที่ได้จะมีลักษณะสีเทาด้าน (Matt gray) สม่ำเสมอและไม่มีลวดลายแพรว

พราว (Spangle) ผลิตภัณฑ์ที่เคลือบโดยวิธีนี้จะมีความสามารถในการทาสีดี และมีความสามารถในการเชื่อม Spot และ Seam เหนือกว่าเหล็กกล้าเคลือบด้วยวิธี HDG เนื่องจากชั้นเคลือบสังกะสีของ HDG มีความสามารถนำไฟฟ้าต่ำกว่าแผ่นเหล็ก อีกทั้งจุดหลอมเหลวก็ยังต่ำกว่าแผ่นเหล็กด้วย ดังนั้นความสามารถในการเชื่อมแบบต่อเนื่องจึงลดลง โดยเป็นผลมาจากสังกะสีที่ติดกับอิเล็กโทรดในขณะที่ทำการเชื่อม ส่วนชั้นเคลือบโลหะเจือสังกะสีเหล็กของเหล็กแผ่น IZ มีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า และมีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับ HDG ดังนั้น ความสามารถในการเชื่อมจึงเทียบเท่าได้กับแผ่นเหล็กซึ่งเป็นโลหะพื้นฐานการใช้งานเหล็กกล้า แบบ IZ นี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยเฉพาะชิ้นส่วนตัวถังภายนอกที่ต้องการคุณสมบัติด้านการทาสีดี และการเชื่อมที่ดี รวมไปถึงการใช้ในการผลิตถังน้ำมันรถยนต์

ตารางที่ 2.5 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดเย็นทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน [7]

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

ตารางที่ 2.6 ประเภทของเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีด้วยเรซินสังเคราะห์ [7]

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

จากตาราง

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

ตารางที่ 2.7 สัญลักษณ์ของมวลสังกะสีที่เคลือบ และความหนาของสังกะสีที่เคลือบเทียบเท่า [7]

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

หมายเหตุ สัญลักษณ์มวลสังกะสีที่เคลือบมี 2 แบบ คือ (1) สังกะสีใช้สัญลักษณ์ “Z” (2) โลหะเจือสังกะสีเหล็กใช้สัญลักษณ์ “F”

ค. สมบัติของเหล็กเคลือบสังกะสี

1) ความต้านทานต่อการกัดกร่อน สังกะสีมีคุณสมบัติเด่นในการป้องกันการกัดกร่อนแบบการเสียสละ (Sacrificial) โดยการเสียสละตัวเองทำปฏิกิริยาการกัดกร่อนแทนเหล็กช่วยป้องกันการเกิดสนิมบริเวณผิวเปิด หรือขอบตัดซึ่งเป็นจุดที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย

2) การเชื่อมเหล็กเคลือบสังกะสี เหล็กเคลือบสังกะสีซึ่งผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีด้วยวิธีอบชุบความร้อนแบบต่อเนื่องทำให้เหล็กมีผิวเคลือบที่ทนทานไม่แตกกะเทาะหรือลอกในระหว่างการเชื่อม การรีดขึ้นรูป ดัดโค้งและปั๊มลึก

3) ความเรียบเหล็กเคลือบสังกะสี สามารถนำไปรีด เพื่อปรับสภาพผิว (Skin pass) เพื่อสะดวกในการทาสี และเคลือบสี

4) ความหนา ความกว้าง เหล็กเคลือบสังกะสี มีขนาดความหนาตั้งแต่ 0.23 มิลลิเมตรถึง 1.60 มิลลิเมตร ส่วนความกว้างมีให้เลือก 710 - 1,265 มิลลิเมตร และระดับมวลสารของชั้นเคลือบตั้งแต่ Z12 ถึง Z35 ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

ง. การนำเหล็กเคลือบสังกะสีไปใช้งาน

การใช้ประโยชน์ของเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี ในปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ได้มีการนำเข้ามาใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะการผลิตประตูรถยนต์ ซึ่งมีอยู่ทั้งหมดใน 3 ลักษณะด้วยกัน [c5] มีดังต่อไปนี้

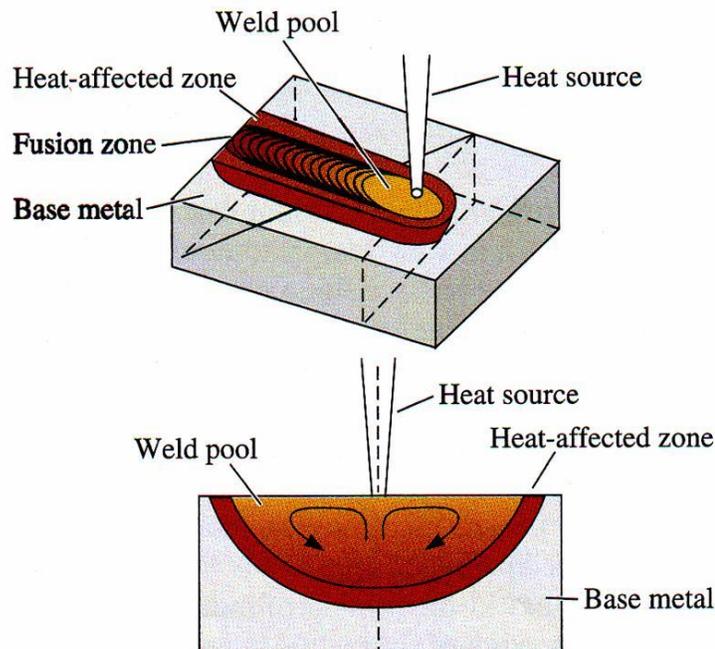
1) PNL FR DRINR LK/RH(S/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 280 มิลลิเมตร ยาว 1,660 มิลลิเมตร และขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 1,050 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นประตูรถปีกอ๊อฟ ประเภท 2 ประตู 1 ตอน

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 การเชื่อมโลหะ

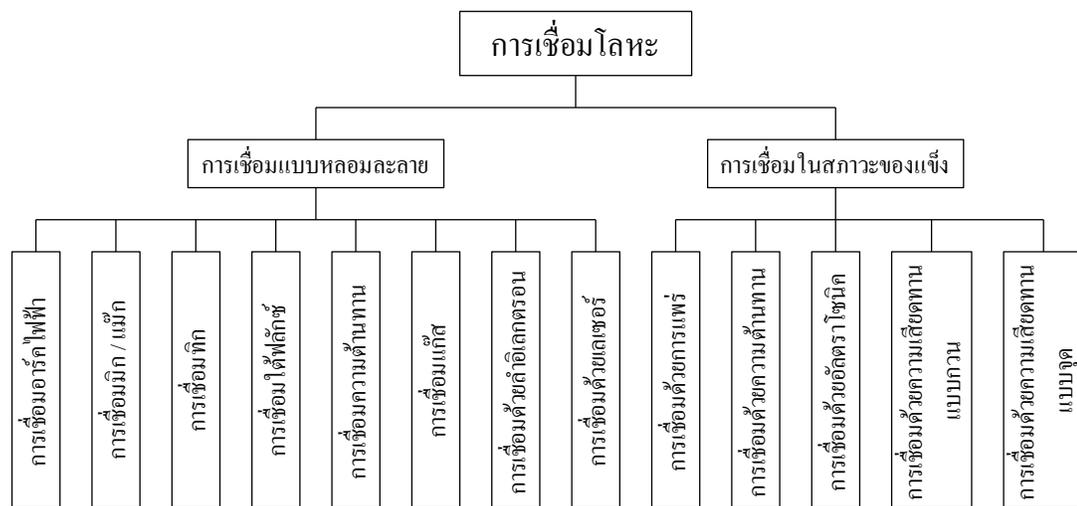
2.2.1 การเชื่อม



รูปที่ 2.1 หลักการพื้นฐานในการเชื่อมโลหะ [4]

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ [8] ได้ให้ความหมายของคำว่า “การเชื่อมโลหะ คือ การต่อชิ้นโลหะเข้าด้วยกันโดยอาศัยความร้อนในการหลอมละลายรอยต่อระหว่างโลหะสองชิ้นให้หลอมละลายเข้าด้วยกันและเปลี่ยนเป็นโลหะชิ้นเดียวกัน โดยขณะที่โลหะที่บริเวณรอยต่อเกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันนั้น อาจเติม

โลหะผสมบางตัวในลักษณะที่เรียกว่าลวดเชื่อม (Filler metal) ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติบางตัวในแนวเชื่อมให้ดีขึ้น ตัวอย่างการเชื่อมโลหะอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 2.1 ความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อน (Heat source) ถูกส่งผ่านไปที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะสองแผ่น (Base metals) ทำให้เกิดการหลอมละลายรวมกันที่บริเวณบ่อเชื่อม (Weld pool) และเมื่อเคลื่อนที่แหล่งให้ความร้อนไปตามแนวรอยต่อ จะทำให้เกิดแนวเชื่อมขึ้น โดยบริเวณบ่อเชื่อมหรือพื้นที่หลอมละลาย (Fusion zone) นี้ จะก่อให้เกิดการแข็งตัวเป็นแนวเชื่อมที่มีโครงสร้างแตกต่างจากโลหะหลัก (Base metal) ในการเชื่อมพื้นที่สำคัญอีกพื้นที่ที่มีความสำคัญคือ พื้นที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat affected zone) พื้นที่นี้อยู่ถัดออกไปจากพื้นที่การหลอมละลาย เป็นพื้นที่ๆ ไม่มีการหลอมละลาย แต่ความร้อนที่เกิดจากพื้นที่หลอมละลายทำให้โครงสร้างบริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลง และส่งผลทำให้สมบัติของโลหะเปลี่ยนแปลงไป”



รูปที่ 2.2 รูปแบบของกระบวนการเชื่อม [8]

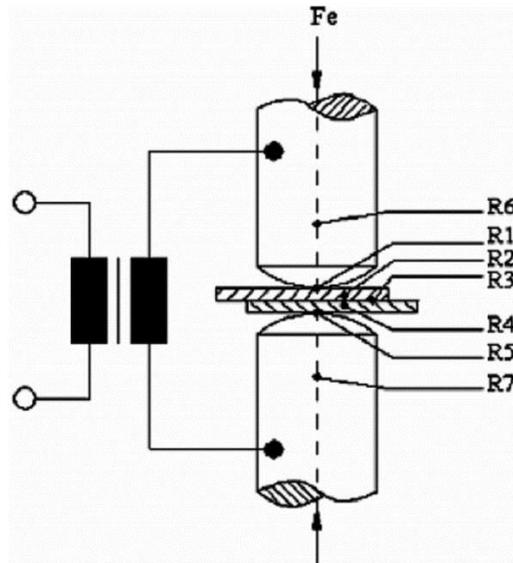
เทคโนโลยีการเชื่อมในปัจจุบันได้แบ่งการเชื่อมออกเป็น 2 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือ การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) และการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) การเชื่อมแบบหลอมละลาย หรือบางครั้งเรียกว่า การเชื่อมหลอมละลายแบบดั้งเดิม (Conventional fusion welding) ความหมายของการเชื่อมแบบหลอมละลายนี้มีลักษณะเดียวกันดังอธิบายในรูปที่ 2.1 การเชื่อมหลอมละลายสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายวิธี ขณะที่การเชื่อมในสภาวะของแข็ง คือ การเชื่อมในสภาวะที่โลหะหลักไม่เกิดการหลอมละลาย แต่อาศัยความร้อนที่เกิดจากแรงทางกล ทำให้โลหะเกิดการเชื่อมประสานกัน

2.2.2 การเชื่อมต้านทานแบบจุด

การเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยความร้อนที่เกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสผ่านพื้นที่รอยต่อในการหลอมวัสดุและกดให้ติดกันด้วยแรงดันจากอิเล็กโทรดทั้งสองข้างให้ติดกัน กระบวนการเชื่อมนี้เป็นวิธีการสำคัญที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ดังเห็นได้จากรถยนต์หนึ่งคันที่มีปริมาณการต่อยึดด้วยการเชื่อมต้านทานแบบจุดของชิ้นส่วนระหว่างวัสดุเดียวกัน วัสดุต่างชนิด หรือวัสดุที่มีความหนาแตกต่างกัน ในปริมาณ

มากกว่าหนึ่งพันจุด [1] หนึ่งในข้อดีของการเชื่อมด้านทานแบบจุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมทิก คือ รอยเชื่อมของการเชื่อมด้านทานแบบจุดนั้นเกิดขึ้นด้านในของรอยต่อ ขณะที่รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกเกิดขึ้นด้านนอก ลักษณะเช่นนี้ทำให้รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกนั้นมีความง่ายต่อการตกแต่งมากกว่า [9]

ขณะเดียวกันในมุมมองของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในปัจจุบันที่มุ่งเน้นในการผลิตรถยนต์ที่มีการใช้น้ำมันอย่างประหยัด เพื่อเป็นการอนุรักษ์พลังงาน และรักษาสิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมยานยนต์ได้พยายามคิดค้นหาวิธีการในการลดการใช้น้ำมันของรถยนต์ด้วยวิธีการต่างๆ หนึ่งในวิธีการที่มีการใช้งานในปัจจุบัน คือ การทำให้น้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ลดลง ซึ่งทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เช่น เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High strength low alloy: HSLA) วัสดุประกอบ (Composite materials) หรืออลูมิเนียมผสม เข้ามาแทนที่ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้าที่มีน้ำหนักสูงกว่า [3] วัสดุน้ำหนักเบาที่นิยมนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นในการทดแทนเหล็กกล้าในปัจจุบัน คือ อลูมิเนียม เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักสูงกว่าเหล็กประมาณ 2 เท่า [4] อย่างไรก็ตามในการเชื่อมด้านทานแบบจุดรอยต่อระหว่างเหล็กและอลูมิเนียมนั้นมีความยากลำบากในการเชื่อมเพื่อให้ได้รอยต่อที่มีประสิทธิภาพสูง และวัสดุบางตัวที่มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศไทย คือ รอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และอลูมิเนียม AA1100 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้งานมากในการผลิตตัวถังของรถยนต์นั้นไม่มีการรายงานไว้ ดังนั้นหากมีการทำการทดลองเพื่อเตรียมข้อมูลไว้ อาจทำให้เกิดประโยชน์สูงในอนาคตเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไทยต่อไป



รูปที่ 2.3 การเกิดความต้านทานในการเชื่อมด้านทานแบบจุด [10]

การเชื่อมด้านทานแบบจุด คือ กรรมวิธีการประสานวัสดุที่ผิวหน้าสัมผัสของรอยต่อด้วยความร้อนที่เกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสผ่านรอยต่อที่ถูกกดแน่นด้วยแรงกดจากอิเล็กโทรด (Fe) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ผิวสัมผัสในพื้นที่ที่กระแสเข้มข้นมีความร้อนเพิ่มขึ้นโดยความต่างศักย์ที่มีค่าต่ำและกระแสที่ค่าสูงในช่วงพัลส์ช่วงสั้นๆ เพื่อที่ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะเชื่อม เมื่อกระแสเกิดการไหล แรงกดจากอิเล็กโทร

รตจะคงกตนิ้งจนบริเวณที่หลอมละลายเย็นตัวและแข็งตัว และปล่อยแรงกดออกเมื่อแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างสั้น

ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยความต้านทานทั้งหมด 7 จุด ดังนี้

- ค่าความต้านทาน R1 คือ ความต้านทานของผิวชั้นทดสอบด้านบน (Upper specimen resistance)
 - ค่าความต้านทาน R2 คือ ความต้านทานระหว่างผิวของชิ้นทดสอบด้านบน (Upper specimen resistance) และผิวของอิเล็กโทรดด้านบน (Upper electrode contact resistance)
 - ค่าความต้านทาน R3 คือ ความต้านทานระหว่างผิวของชิ้นทดสอบด้านบน (Upper specimen resistance) และผิวของชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance)
 - ค่าความต้านทาน R4 คือ ความต้านทานของผิวชั้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance)
 - ค่าความต้านทาน R5 คือ ความต้านทานระหว่างผิวของชิ้นทดสอบด้านล่าง (Lower specimen resistance) และผิวของอิเล็กโทรดด้านล่าง (Lower electrode contact resistance)
 - ค่าความต้านทาน R6 คือ ความต้านทานของอิเล็กโทรดด้านบน (Upper electrode resistance)
 - ค่าความต้านทาน R7 คือ ความต้านทานของอิเล็กโทรดด้านล่าง (Lower electrode resistance)
- Aslanlar [10] ได้สรุปค่าความต้านทานโดยรวมของการเชื่อมต้านทานแบบจุดว่าสามารถหาค่าได้ตามสมการที่ 2.1 คือ

$$R=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6+R_7 \quad (2.1)$$

เมื่อค่าความต้านทานประกอบด้วยสองส่วน คือ ความต้านทานของวัสดุ (R_2, R_4, R_6, R_7) และความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรด (R_1, R_5) ความต้านทานของวัสดุขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน (R_2, R_4) และอิเล็กโทรด (R_6, R_7) ค่าต่างๆ เหล่านี้ไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะทำการเชื่อม ขณะเดียวกันค่าความต้านทานที่จุดสัมผัสนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับสถานะของปลายอิเล็กโทรด ค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมเกิดขึ้นจากค่าความต้านทาน R_3 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดความร้อนสูงสุดในรอยต่อเกย ค่าความร้อนที่มีค่าสูงนี้ขึ้นอยู่กับสถานะพื้นผิวของของโลหะที่ใช้เชื่อม แรงกด กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อม

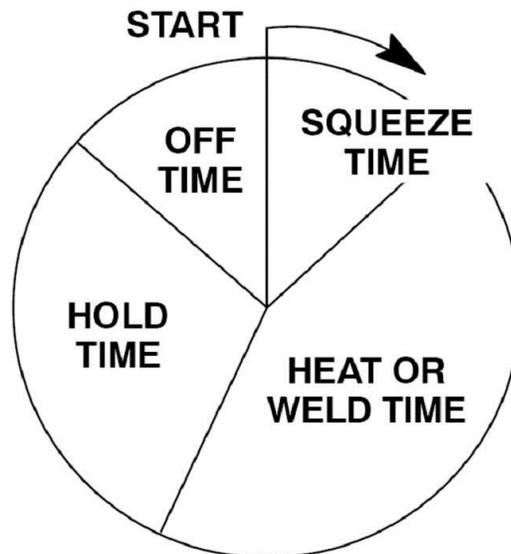
นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นแล้ว ค่าความต้านทานโดยรวมขึ้นอยู่กับความดันที่ผิวสัมผัส ค่า R_1, R_3 และ R_5 ที่อินเทอร์เฟซระหว่างชิ้นงาน การให้ความร้อนพื้นที่สัมผัส R_1 และ R_5 ที่ถูกต้องต้องมีการขจัดเศษค่าอุณหภูมิและรักษาอุณหภูมิของอิเล็กโทรดให้มีค่าต่ำ ตัวแปรสำคัญที่ทำให้ได้ค่าความร้อนที่ถูกต้อง คือ อิเล็กโทรดต้องมีสมบัติการนำความร้อนที่ดี มีผิวที่ละเอียดและสะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อน เช่น คราบน้ำมัน หรือจาระบี [10]

การเชื่อมต้านทานแบบจุดนี้ นิยมในการนำไปทำการเชื่อมประกอบโลหะแผ่นบาง เช่น โครงสร้างรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ สิ่งก่อสร้าง ชิ้นส่วนเครื่องบิน เป็นต้น ข้อดีของการเชื่อมต้านทานแบบ

จุดที่เห็นได้เด่นชัด คือ ความเร็วในการเชื่อมมีค่าสูง และมีความเหมาะสมสำหรับการผลิตแบบอัตโนมัติ สามารถนำเข้าไปร่วมในการผลิตแบบอัตโนมัติในสายการผลิตร่วมกับเครื่องจักรต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ทำให้เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการหาช่างฝีมือในการปฏิบัติการได้อย่างดีเยี่ยม [11]

การเกิดความร้อน (Heat generation) ในรอยต่อการเชื่อมด้านทานแบบจุด เกิดจากการประยุกต์ใช้ กฎของโอห์มเมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำ ความต้านทานไฟฟ้าที่ยับยั้งการไหลผ่านของกระแสจะทำให้เกิด ความร้อน (H) ที่สัมพันธ์กับกระแสเชื่อม (I) และความต้านทาน (R) โดยเป็นไปตามสูตรพื้นฐาน [9] ดังนี้

$$H=I^2.R \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.4 รอบเวลาการเชื่อมด้านทานแบบจุด [9]

การเชื่อมด้านทานแบบจุดเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้น โดยทั่วไปกระแสที่ใช้ในการเชื่อมด้านทานแบบจุดมีค่าที่ 60 ไซเคิล (Cycle) โดยที่ 60 ไซเคิล มีค่าเท่ากับ 1 วินาที เวลาในการเชื่อมด้านทานแบบจุดแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วยเวลาหลัก 4 ส่วน และนิวัฒน์ คุณาวงศ์ [12] ได้ให้คำนิยามต่างๆ ที่น่าสนใจดังนี้

- เวลากด (Squeeze time) คือ เวลาที่เริ่มต้นเข้ามาของสัญญาณเชื่อมและกระแสเชื่อมในครั้งแรก เป็นเวลาที่อิเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นงานและมีแรงกดเพียงพอก่อนที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยออกมา
- เวลาเชื่อม (Weld time) คือ เวลาที่กระแสเชื่อมถูกปล่อยเข้ามาในชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม ในช่วงลักษณะการเชื่อมหนึ่งครั้ง
- เวลากดค้าง (Hold time) คือ ช่วงเวลาที่แรงกดจากหัวอิเล็กโทรดที่ยังกระทำต่อชิ้นงานหลังจากการเชื่อมในช่วงเวลาท้ายสุดสิ้นสุดลง ช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาปล่อยให้รอยเชื่อมมีเวลาแข็งตัวที่มากเพียงพอที่จะสร้างความแข็งแรงขึ้นในรอยเชื่อมจนสามารถยอมรับได้

- เวลาเย็นตัว (Off time) คือ ช่วงเวลาระหว่างเวลาที่หัวอิเล็กโทรดเสร็จสิ้นการทำงาน ณ ตำแหน่งที่ทำการเชื่อมและการเคลื่อนที่ไปทำการเชื่อมที่ตำแหน่งที่ต้องการต่อไป เป็นลักษณะการเชื่อมซ้ำรอบการเชื่อมเดิม (กระแสเชื่อม และเวลาเชื่อมยังคงเดิม)

ด้วยเหตุนี้ เมื่อทำการพิจารณาค่าเวลาการเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องแล้ว สมการการเกิดความร้อนสมการที่ 2 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้สมการการเกิดความร้อน (H) จากการเชื่อมด้านทานแบบจุด [9] ที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) เวลาเชื่อม (t) และการสูญเสียความร้อน (K) ดังนี้

$$H = I^2 \cdot R \cdot T \cdot K \quad (2.3)$$

เวลาการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเชื่อมด้านทานแบบจุด ถ้าเวลาในการเชื่อมยาวนานเกินไปแล้วอาจทำให้โลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลายได้ และอาจส่งผลทำให้เกิดโพรงอากาศภายในได้ นอกจากนี้ อาจทำให้เกิดการดึงเอาโลหะหลอมเหลวออกจากพื้นที่การเชื่อมซึ่งทำให้เกิดการลดพื้นที่หน้าตัดลงได้ เวลาการเชื่อมที่สั้นเกินไปนั้นทำให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้อาจลำบากในโลหะเชื่อม ไม่เกิดการบิดเบี้ยว พื้นที่ผลกระทบความร้อนรอบๆ รอยนักเกตมีขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตามสมการความร้อนที่แสดงในสมการที่ 3 ไม่นิยมนำมาใช้มากนัก เนื่องจากค่าสูญเสียความร้อนนั้นมีค่าที่สามารถวัดได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการประยุกต์ใช้สมการความร้อน (Q) ที่ก่อตัวในแนวเชื่อม [10,12,13] ที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) และเวลาเชื่อม (t) ดังต่อไปนี้

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.4)$$

แรงกด (Pressure) ของอิเล็กโทรดเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการเชื่อมด้านทานแบบจุด จุดประสงค์ของการใช้แรงกดดันต่อรอยต่อการเชื่อมด้านทานแบบจุด คือ การกดยึดชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันในขั้นตอนเริ่มต้นการเชื่อมเพื่อให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าและการนำไฟฟ้าที่จุดที่ต้องการเชื่อม ไม่ได้มีหน้าที่ในการจับยึดชิ้นงานให้แน่นเข้าหากัน ด้วยเหตุนี้ในการเชื่อมด้านทานแบบจุด ชิ้นงานต้องใช้เครื่องมืออื่นๆ เช่น อุปกรณ์จับยึด ในการจับยึดชิ้นงานให้แน่นและอยู่ในตำแหน่งการเชื่อมก่อนการกดของอิเล็กโทรดเสมอ

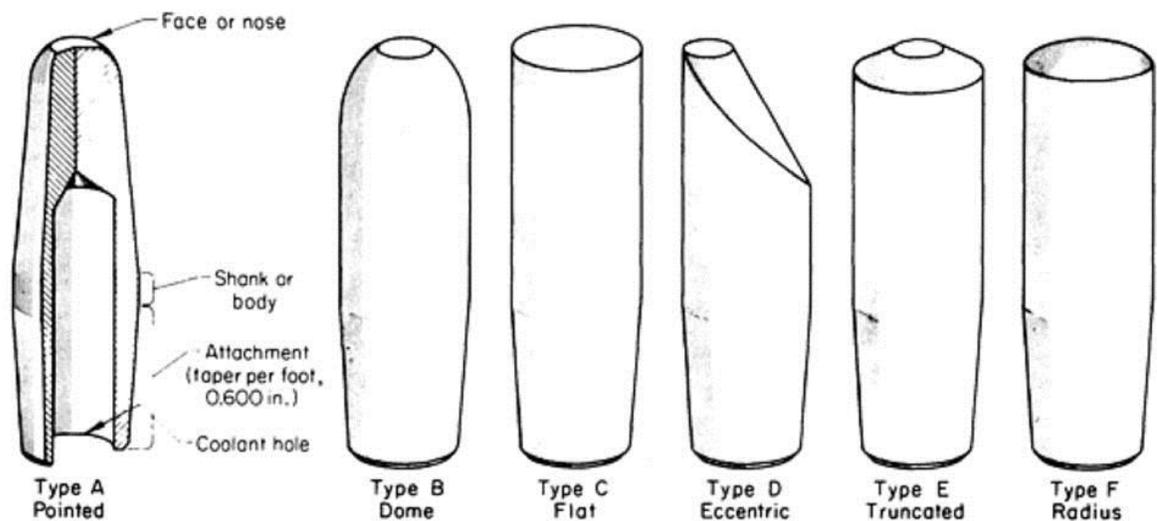
ค่าแรงกดที่มีค่ามากจะทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมนั้นมีค่าลดลงที่จุดสัมผัสระหว่างปลายอิเล็กโทรดและผิวชิ้นงาน ค่าแรงกดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการนำความร้อนจากโลหะเชื่อมค่ากระแสที่มีค่าสูงนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าแรงกดที่มีค่ามาก ขณะที่แรงกดน้อยต้องการค่ากระแสที่มีค่าน้อย ดังนั้นในการใช้งานเครื่องเชื่อมจึงควรมีการใช้งานอย่างระมัดระวัง

หัวอิเล็กโทรด (Electrode tip) เป็นส่วนของกระบวนการเชื่อมที่สัมผัสกับโลหะเชื่อม และเป็นตัวส่งผ่านกระแสเพื่อให้เกิดความต้านทาน ความร้อน การหลอมละลาย และการเชื่อมยึดของโลหะ ทองแดงคือ โลหะที่นิยมนำมาทำเป็นอิเล็กโทรดการเชื่อมด้านทานแบบจุด จุดประสงค์หลักในการใช้อิเล็กโทรด คือ เพื่อเป็นตัวนำกระแสการเชื่อมสู่ชิ้นงาน บริเวณจุดที่มีแรงกดกระทำ เพื่อนำความร้อนออกจากผิวหน้า

ชิ้นงาน และเพื่อรักษาคุณลักษณะของความร้อนและกระแสไฟฟ้าการเชื่อมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมขณะทำการเชื่อม

ปลายอิเล็กโทรดทำจากทองแดงผสมหรือวัสดุอื่นๆ โดยสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมต้านทาน (The Resistance Welders Manufacturing Association: RWMA) ได้แบ่งกลุ่มปลายอิเล็กโทรดออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- กลุ่ม A ทองแดงผสม (Copper based alloy) และมีการแบ่งกลุ่มย่อยโดยใช้เลขโรมัน I-V โดยกลุ่ม I นั้นเป็นกลุ่มที่มีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกับทองแดงบริสุทธิ์มากที่สุด เมื่อตัวเลขแบ่งกลุ่มเพิ่มขึ้น ความแข็งและอุณหภูมิการอบอ่อนจะเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าลดลง
- กลุ่ม B โลหะทนความร้อนสูง (Refractory metal) เป็นโลหะผงขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่น ของผสมระหว่างทองแดงและไททาเนียม ที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการเกิดการสึกกร่อนและความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง ในกลุ่มนี้มีการแบ่งกลุ่มย่อยออกเป็นระดับ 10 11 12 13 และ 14 ยกตัวอย่างเช่น กลุ่ม 10 หมายถึง ค่าสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับร้อยละ 40 ของทองแดง ค่าการนำไฟฟ้านี้มีค่าลดลงเมื่อจำนวนตัวเลขเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.5 รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรด [12]

รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบของอิเล็กโทรดมาตรฐานของสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมต้านทาน 6 รูปแบบ แสดงด้วยสัญลักษณ์ตัวอักษรตั้งแต่ A ถึง F อิเล็กโทรด A แบบจุด (Type A Pointed) ใช้สำหรับงานที่ต้องการค่าความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกตสูง อิเล็กโทรด D แบบรูปร่างผิดปกติ (Eccentric type) ใช้กับพื้นที่แคบๆ หรือมุมอับ เป็นต้น

พิจารณาขั้นตอนการเชื่อมต้านทานแบบจุด พบว่าขนาดของนักเกตนั้นสามารถควบคุมได้ด้วยขนาดของปลายอิเล็กโทรด [9] โดยปกติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนักเกตควรมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรดเล็กน้อย ถ้าปลายอิเล็กโทรดมีค่าน้อยจะส่งผลให้นักเกตมีขนาดเล็กและไม่

แข็งแรง แต่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดนั้นมีขนาดใหญ่เกินไป จะส่งผลทำให้นักเกิดมีขนาดใหญ่ และทำให้แนวเชื่อมเกิดรูพรุนได้

การหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรดของการเชื่อมอิเล็กโทรด [9] สามารถหาค่าได้โดยการใช้สูตรดังต่อไปนี้

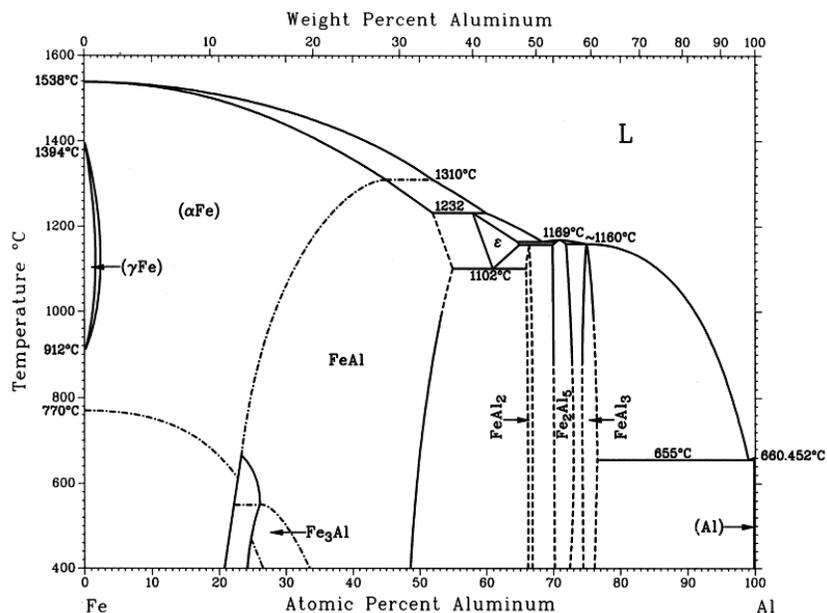
$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด} = 0.100'' + 2t \quad (2.5)$$

เมื่อ t คือ ความหนาของวัสดุมีหน่วยเป็นนิ้ว สมการนี้สามารถใช้กับการเชื่อมโลหะที่มีความหนาต่างกัน ได้ อย่างไรก็ตามสมการที่ 2.5 นี้แตกต่างจากสมการที่เสนอโดยสมาคมโลหะอเมริกา [11] ที่แสดงสมการสำหรับคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดสำหรับแผ่นโลหะที่มีความหนาไม่เกิน 3 มม. (1/8 นิ้ว) เมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบ F ที่แสดงในรูปที่ 2.5 สามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดที่มีค่าดังสมการที่ 2.6 ดังนี้

$$D_2 = \sqrt{t} \quad (2.6)$$

เมื่อ D_2 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดในหน่วย มม. และ t คือ ความหนาของแผ่นวัสดุ โดยเมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบ F แล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกิด หรืออาจมีค่าเท่ากับ

$$D = D_2 = 5\sqrt{t} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.6 แผนภาพสมดุลเฟสอลูมิเนียมและเหล็ก [13]

เมื่อทำการเชื่อมวัสดุที่มีความหนาต่างกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดและเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกตต้องมีค่าเหมาะสมอ้างอิงตามแผ่นบางกว่าเป็นหลัก หรือหากทำการเชื่อมโลหะสามแผ่นเข้าด้วยกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดและเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกตต้องมีค่าเหมาะสมอ้างอิงตามแผ่นที่สอง

หากใช้อิเล็กโทรดแบบ A หรือ B สมการที่ 2.5 อาจไม่สามารถใช้ได้ ขนาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดจะขึ้นอยู่กับความกว้างของแผ่นประกบซึ่งอาจสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 6 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการใช้งานจากสภาพการใช้งานจริงแล้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นจึงต้องมีการปรับปรุงให้มีขนาดที่ยอมรับได้เสมอ ซึ่งขนาดที่สามารถยอมรับได้ต้องมีค่าไม่เกิน 30% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดเริ่มต้น

โลหะวิทยาการรวมตัวระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาการรูปแบบการรวมตัวของอลูมิเนียมและเหล็กดังรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงแผนภาพสมดุลเฟสโลหะผสมเหล็กและอลูมิเนียมที่ใช้ในการพยากรณ์เฟสที่มักเกิดขึ้นในการรวมตัวของอลูมิเนียมและเหล็ก พบว่าเมื่อมีการรวมตัวของอลูมิเนียมและเหล็กด้วยวิธีการใดๆ ก็ตาม สารประกอบกึ่งโลหะรูปแบบต่างๆ จะเกิดขึ้น และสามารถแบ่งกลุ่มของสารประกอบกึ่งโลหะออกได้เป็น 5 ชนิด คือ เฟส Fe_3Al $FeAl$ $FeAl_2$ Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ เพื่อความเข้าใจที่ง่ายยิ่งขึ้น Kobayashi and Yakou [14] ได้แบ่งกลุ่มของสารประกอบกึ่งโลหะออกเป็น 2 กลุ่มตามปริมาณของธาตุผสมในสารประกอบกึ่งโลหะ คือ สารประกอบกึ่งโลหะที่มีปริมาณของอลูมิเนียมผสมสูง สารประกอบกึ่งโลหะกลุ่มนี้มีสมบัติ คือ แข็งและเปราะ ซึ่งหากนำไปทำการรับแรงแล้วจะทำให้เกิดการพังทลายได้ง่ายเนื่องจากมีความยืดหยุ่นต่ำ และสารประกอบกึ่งโลหะที่มีปริมาณของเหล็กผสมสูง สารประกอบกึ่งโลหะกลุ่มนี้มีสมบัติ คือ มีความต้านทานการสึกกร่อน (Wear Resistance) ดี มีความต้านทานการเกิดออกไซด์ (Oxide Resistance) สูง และมีความต้านทานการแตกหัก (Fracture Strength) ดี

ด้วยเหตุนี้ในการเชื่อมต้านทานแบบจุดรอยต่อวัสดุต่างชนิด โดยเฉพาะรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก ควรให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ เพื่อให้ได้สมบัติทางกลตามต้องการ ในเบื้องต้นหากพิจารณาสมบัติของสารประกอบกึ่งโลหะทั้งสองแบบนี้ พบว่าสารประกอบที่มีปริมาณของเหล็กสูง คาดว่าจะทำให้รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กนั้นมีความแข็งแรงเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่า

อย่างไรก็ตามปัญหาที่มักเกิดขึ้นในการเชื่อมยึดรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กที่พบในอดีต คือ การเกิดการแพร่ของอะตอมของธาตุทั้งสองเข้าหากัน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของเหล็กสู่อลูมิเนียมมีค่า $53 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่ 793-922K และมีค่ามากกว่าการแพร่ของอลูมิเนียมสู่เหล็กที่มีค่า $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่ 1003-1673K [14] ค่าต่างๆ เหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแพร่ของอลูมิเนียมเข้าสู่เหล็กได้ง่ายกว่า

การเชื่อมต้านทานแบบจุดเป็นกระบวนการเชื่อมที่มีข้อดีและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ นอกจากนั้นจากผลการทดลองในอดีต พบว่าการเชื่อมต้านทานแบบจุดนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กได้ ในเบื้องต้นคาดว่าหากมีการพิจารณาเลือกใช้ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม คาดว่าจะทำให้ได้รอยเชื่อมที่สมบัติเป็นไปตามต้องการได้ และควรมี

การพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้อย่างระมัดระวัง

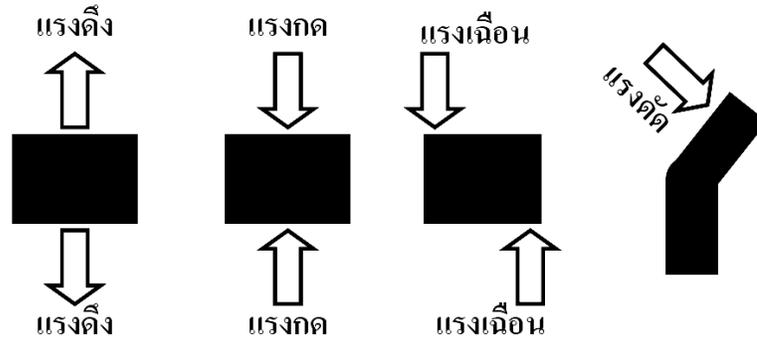
- การเลือกตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม เพื่อทำการการประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก และพิจารณาว่าตัวแปรการเชื่อมใดที่ทำให้รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด
- โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ ในการเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันนั้น รูปร่างของนักเกตของรอยเชื่อม คือ สิ่งสำคัญที่แสดงความสามารถหลอมละลายเข้ากันของวัสดุ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยต่อ อย่างไรก็ตามในกรณีของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กนั้น ในเบื้องต้นรูปร่างนักเกตอาจไม่ใช่สิ่งที่บ่งชี้ถึงความแข็งแรงของรอยต่อเนื่องจากรูปร่างของนักเกตที่ดีหมายถึงความสามารถในการรวมตัวของวัสดุรอบๆ แนวเชื่อมที่ดีและอาจบ่งบอกถึงความสามารถในการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะที่เพิ่มขึ้น ในกรณีของรอยต่อระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม โครงสร้างอินเทอร์เฟซ (Interface structure) เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงเป็นพิเศษ เนื่องจากการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะมักก่อตัวขึ้นที่บริเวณนี้ และเป็นบริเวณที่รับแรงโดยตรง เมื่อยุติการเชื่อม ด้านทานแบบจุดถูกนำไปใช้งาน การทดลองทำการเชื่อมเพื่อให้ได้ชั้นของสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความบางที่สุด หรือเป็นสารประกอบที่มีปริมาณของเหล็กผสมอยู่สูงเป็นความคาดหวังทางจินตภาพ ปัจจุบันเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่อไป
- อุณหภูมิของรอยต่อแปรผันตรงกับกระแส เวลาเชื่อม และแรงกด ดังแสดงในสมการที่ 2.4 การทำให้เกิดรอยต่อที่อุณหภูมิต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้เป็นวิธีการในการหลีกเลี่ยงชั้นสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความหนาและเปราะ [14] ดังนั้นการควบคุมความร้อนเพื่อหลีกเลี่ยงการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง
- การทดสอบสมบัติทางกลอื่นๆ ของรอยต่อแยกระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กถ้าควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการนำรอยต่อไปใช้งาน ผลการทดลองที่ผ่านมาเน้นการทดสอบสมบัติทางกลได้ทำการทดสอบหาค่าแรงเฉือนด้วยวิธีต่างๆ เช่น วิธีการดึงเฉือน (Tensile shear strength) การทดสอบแบบดึงกากบาท (Cross tension test) และการลอกผิว (Peel test) เป็นหลัก หากมีการทดสอบความล้าตัวของรอยต่อแยกจะทำให้คาดการณ์ถึงอายุการใช้งานในอนาคตได้
- เนื่องจากรอยต่อแยกระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กถ้าเป็นการต่อวัสดุแบบกัลวานิก (Galvanic couple) และเป็นการต่อแยกที่มีมุมอับเกิดขึ้น ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนของรอยต่อ ควรมีการศึกษาต่อไป

2.3 การทดสอบสมบัติโลหะเชื่อม [8]

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ [8] ได้นำเสนอวิธีการทดสอบสมบัติของแนวเชื่อมประกอบไปด้วยการทดสอบสมบัติทางกลและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อแยกมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สมบัติทางกลของวัสดุเป็นหนึ่งในคุณลักษณะสำคัญในการออกแบบโครงสร้างต่างๆ เพื่อนำไปทำการรับแรงในการใช้งานจริง สมบัติทางกลของวัสดุกล่าวได้ในภาพรวม คือ ความสามารถของวัสดุที่ต้านทานแรงกระทำกับตัวมันเองเพื่อที่จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ หากพิจารณาตามรูปแบบของแรงกระทำต่อวัสดุสามารถแบ่งรูปแบบในการกระทำได้ดังนี้ แรงดึง แรงกด แรงเฉือน แรงดัด รูปแบบของแรง

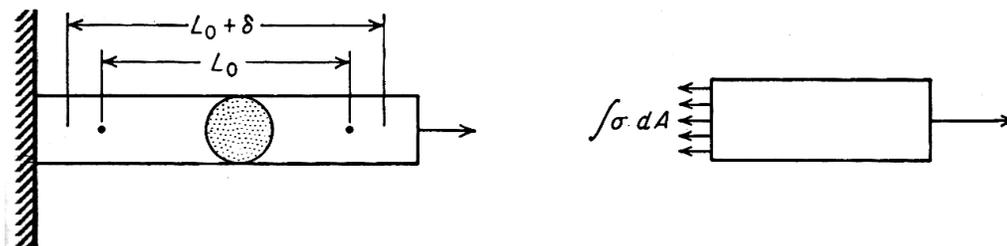
กระทำได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 จากรูปแบบของแรงที่กระทำต่อวัสดุ ลักษณะของความเค้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ มีดังนี้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างรูปแบบของแรงกระทำ [8]

2.3.1 ความเค้นและเครียดแรงดึง

เพื่อให้เข้าใจความเค้นและความเครียด ให้พิจารณารูปที่ 2.8-2.10 เมื่อชิ้นงานทรงกระบอกถูกดึงออกมาให้ยืดตัวออกไป วัสดุจะเกิดแรงต้านเล็กๆ ในเนื้อวัสดุลักษณะนี้เรียกว่าความเค้น (Stress) โดยสามารถหาค่าได้โดยหาอัตราส่วนระหว่างแรงกระทำและพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ตั้งฉากกับแนวแรงดึง สมการที่ 2.8 ขณะที่ค่าความเครียด คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่ยืดออกเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานดังสมการที่ 2.9 ค่าความสัมพันธ์และสัญลักษณ์ในสมการที่ 2.8-2.9 แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเกิดความเค้นและความเครียด [15]

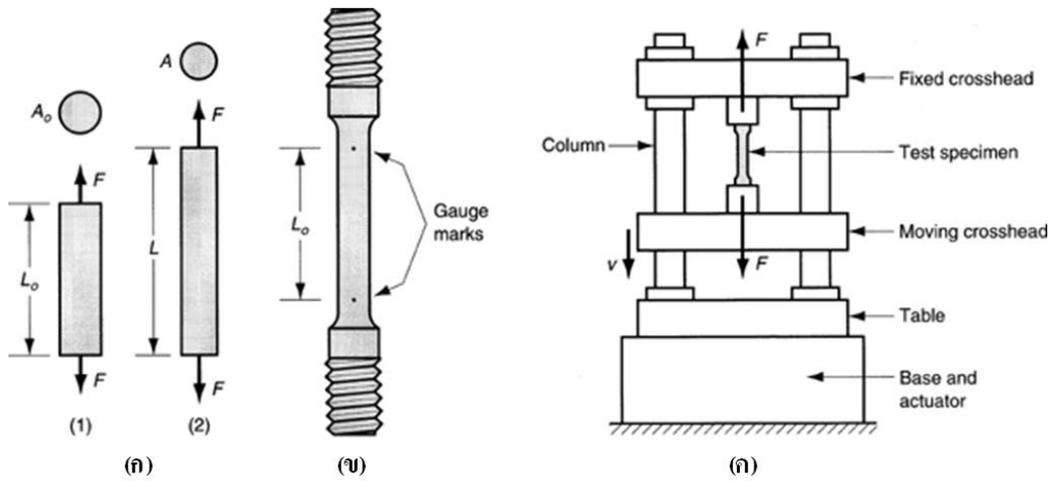
$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2.8)$$

$$e_t = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (2.9)$$

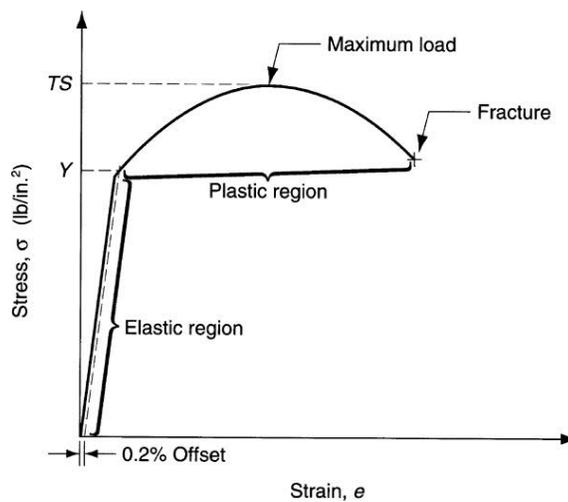
$$\% elongation = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100\% \quad (2.10)$$

$$\%R.A. = \frac{(A - A_0)}{A_0} \times 100\% \quad (2.11)$$

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



รูปที่ 2.9 การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ [15]



รูปที่ 2.10 เส้นโค้งการทดสอบแรงดึง [15]

นอกจากนั้น ในกรณีของการทดสอบแรงดึงสามารถหาค่าที่จำเป็นในการออกแบบชิ้นงาน 2 ค่า คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% elongation) และค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (% reduction of area: %R.A.) ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 2.10 และ 2.11

รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการทดสอบแรงดึงวัสดุชนิดหนึ่ง พบส่วนประกอบต่างๆ ที่มีความสำคัญดังนี้

- ช่วงยืดหยุ่น (Elastic region) เกิดเมื่อเริ่มทำการดึงวัสดุ ช่วงนี้เมื่อทำการปล่อยแรงออก วัสดุจะหดกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น ค่าความยาวสุดท้ายเท่ากับความยาวเริ่มต้น เป็นช่วงที่ความเค้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเครียดความชันของกราฟคงที่ ณ ช่วงๆนี้จะสามารถทราบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นซึ่งมีค่าดังสมการที่ 2.12 หรือสมการตามกฎของฮุก (Hook's law) หรือในโลหะบางชนิดพบได้ดังแสดงในตารางที่ 2.8

$$E = \frac{\sigma_t}{e_t} \quad (2.12)$$

ตารางที่ 2.8 โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด [15]

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 เป็นจุดที่เมื่อปล่อยแรงออก วัสดุจะไม่หดกลับไปที่มีความยาวเริ่มต้น โดยปกติจุดครากจะสังเกตค่อนข้างยาก แต่สามารถทำได้โดยวิธีการที่เรียกว่า “0.2%ความเค้นพิสูจน์ (0.2% Proof stress)” สามารถทำได้โดยการลากเส้นโดยแบ่งส่วนของด้านความเครียดออกเป็น 100 ส่วน และจากจุดเริ่มต้น ที่ระยะประมาณ 0.2 ลากเส้นขนานกับเส้นกราฟการทดสอบขึ้นไป โดยมีระยะขนานไปกับเส้นช่วงยืดหยุ่นดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 2.25 จุดที่เส้นประตัดกับเส้นการทดสอบจุดนั้น คือ จุดคราก ค่าความแข็งแรงครากของโลหะบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.8
- ช่วงเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic region) เป็นช่วงที่ต่อเนื่องมาจากช่วงยืดหยุ่น หากทำการเพิ่มแรงในการดึงวัสดุจะเปลี่ยนรูปถาวรเมื่อปล่อยแรงออกวัสดุจะไม่หดกลับที่ความยาวเริ่มต้น วัสดุจะแสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดๆหนึ่งจะได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่เรียกว่า

“ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength: TS)” ซึ่งโลหะแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.9 จากนั้นเมื่อทำการออกแรงต่อไป ค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งเกิดการแตกหักที่จุดสุดท้าย(Fracture point) ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดแตกหักเรียกว่า “ความแข็งแรงที่จุดแตกหัก (Fracture strength)”

- การเพิ่มความแข็งแรงของโลหะโดยความเครียด หรือการแปรรูปถาวร (Strain or work hardening) คือ การเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงของโลหะเนื่องจากแปรรูปอย่างถาวรที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ เช่น ในเหล็กกล้าคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C เป็นต้น

ตารางที่ 2.9 ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด [15]

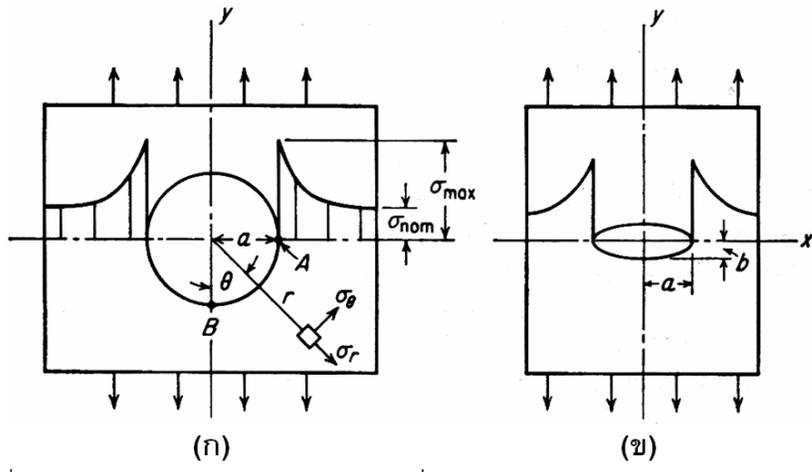
โลหะ	ความแข็งแรงคราก (MPa)	ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)
อลูมิเนียมผสม	175	350
เหล็กหล่อ	275	275
ทองแดงผสม	205	410
แมกนีเซียมทองแดง	175	275

2.3.2 ความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration)

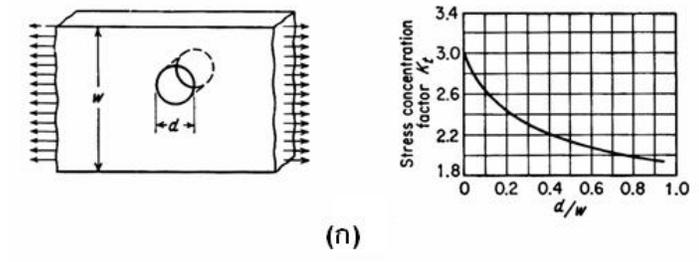
รูปร่างของชิ้นงานที่ไม่มีความต่อเนื่อง เช่น รู ร่องบาก ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณใกล้เคียงพื้นที่ไม่ต่อเนื่องนั้นจะมีค่าความเค้น (σ_{max}) ค่อนข้างสูงกว่าความเค้นเฉลี่ยที่ห่างไกลจากความไม่ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.11 บริเวณด้านข้างของรูวงกลมและรูวงรี หากไม่มีความเค้นที่กระจายตลอดทั้งแผ่น จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดของแนวแรงดึงที่กล่าวผ่านมาก่อนหน้านี้ ค่าความเข้มข้นของความเค้นหาค่าได้โดยการหาค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี (Theoretical stress-concentration factor: K_t) ดังแสดงในสมการที่ 2.13 ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายอัตราส่วนระหว่างความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นปกติที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดจริงของชิ้นงาน ลักษณะระดับความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างชิ้นงานตัวอย่างที่มีความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิว และค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีแสดงในรูปที่ 2.12

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nominal}} \quad (2.13)$$

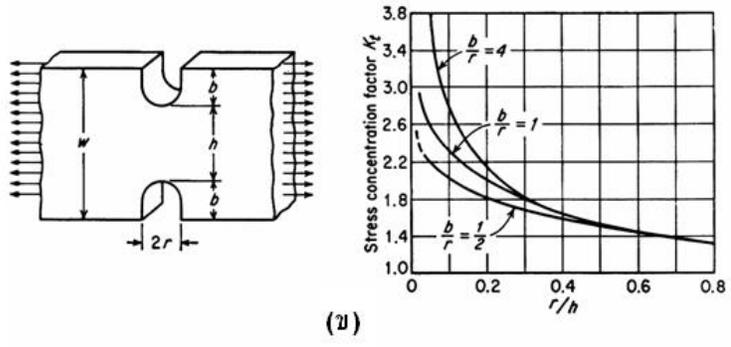
- เมื่อ
- K_t = องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี
 - σ_{max} = ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใกล้จุดที่มีความไม่ต่อเนื่อง
 - $\sigma_{nominal}$ = ความเค้นปกติในชิ้นงานที่มีความต่อเนื่อง



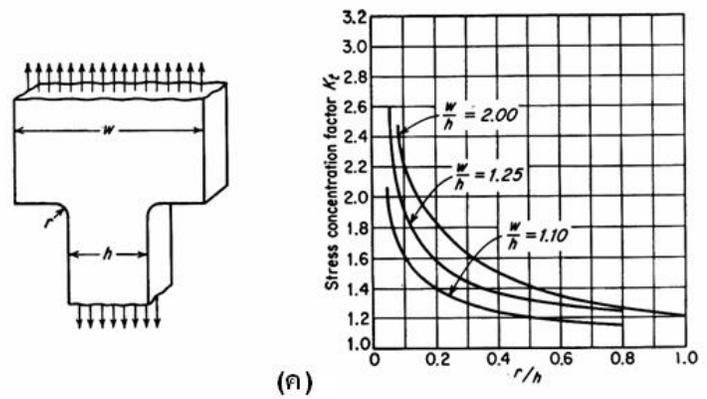
รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รูวงกลม และ (ข) รูวงรี [16]



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.12 องค์กรประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ [16]

2.3.3 พิกัดเพื่อความปลอดภัย (Safety factor)

ค่าความเค้นใช้งาน (Working stress) หรือค่าความเค้นสูงสุด คือ ค่าความเค้นที่ปลอดภัยสูงสุดในการใช้งานก่อนการพังทลาย พื้นฐานการออกแบบค่าความเค้นใช้งานกำหนดให้อยู่ในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น (Elastic region) อย่างไรก็ตามช่วงที่เรียกว่าช่วงยืดหยุ่นนั้นเป็นช่วงที่ยากต่อการหาค่า ดังนั้นจึงมักกำหนดค่าความเค้นใช้งานจากค่าความแข็งแรงที่จุดครากหรือค่าความแข็งแรงสูงสุดที่จุดใดจุดหนึ่ง ค่าทั้งสองจะนำมาหารด้วยค่าพิกัดเพื่อความปลอดภัย (Safety factor: N) ดังแสดงในสมการที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ [20]

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N} \quad (2.14)$$

$$\sigma_w = \frac{\sigma_{ult}}{N} \quad (2.15)$$

เมื่อ	σ_w	=	ความเค้นใช้งาน
	σ_y	=	ความเค้นที่จุดคราก
	σ_{ult}	=	ความเค้นสูงสุด
	N	=	ค่าพิกัดเพื่อความปลอดภัย

ค่าความแข็งแรงครากมักถูกเลือกเป็นค่าที่ใช้คำนวณหาความเค้นใช้งานสำหรับเหล็กกล้าที่ใช้ทำโครงสร้างเนื่องจากจุดดังกล่าววัสดุจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร แต่สำหรับวัสดุอื่นมักเลือกจากความแข็งแรงสูงสุด

2.3.3 การทดสอบความแข็งวิกเกอร์และนู๊ป (Vicker and Knoop hardness test) ตาม JIS Z 2244 [17]

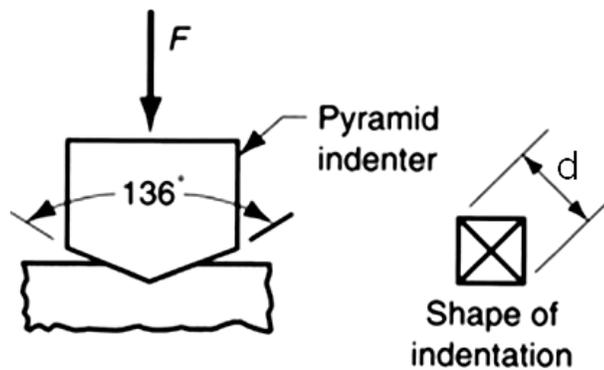
คือ การทดสอบแบบวิกเกอร์ การกดผิวชิ้นงานให้เกิดรอยด้วยแรงกดทดสอบด้วยหัวกดปิระมิดที่มุมเอียงของหัวกดรวมมีค่า 136° ความยาวของเส้นทะแยงมุมของรอยกดดังแสดงในรูปที่ 2.13 ถูกทำการวัดและนำมาทำการคำนวณตามสมการที่ 2.16 ในกรณีแรงกดมีหน่วยเป็นกรัมแรง (gf) แต่ถ้าแรงกดมีหน่วยเป็นนิวตันต้องใช้สมการที่ 2.17

$$H_v = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (2.16)$$

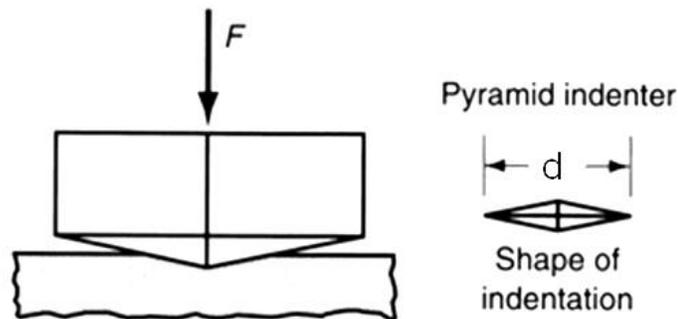
$$H_v = \frac{1.8544}{9.80665} \times \frac{F}{d^2} = 0.18909 \frac{F}{d^2} \quad (2.17)$$

- เมื่อ Hv = ความแข็ง; b d g d v i l N
 F = แรงกด (N หรือ kgf)
 S = พื้นที่ผิวของหัวกด (mm²)
 d = ความยาวเส้นทแยงมุม (mm)
 θ มุมเอียงของหัวกด (°)

การทดสอบความแข็งแบบนูน การกดผิวชิ้นงานให้เกิดรอยด้วยแรงกดทดสอบด้วยหัวกดปิระมิดที่มุมเอียงของหัวกดรวมมีค่า 172° 30' และ 130° ความยาวของรอยกดคดงแสดงในรูปที่ 2.14 ถูกทำการวัดและนำมาทำการคำนวณตามสมการที่ 2.21 ในกรณีแรงกดมีหน่วยเป็นกรัมแรง (gf) แต่ถ้าแรงกดมีหน่วยเป็นนิวตันต้องใช้สมการที่ 2.22



รูปที่ 2.13 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส์ [17]



รูปที่ 2.14 การทดสอบความแข็งแบบนูน [17]

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

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

- เมื่อ Hk = ความแข็งนูน

- 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) ในการทดสอบแบบนูน ตัวอย่างการแสดงค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส์และนูนแสดงในตารางที่ 2.10 และตัวอย่างของความแข็งวิกเกอร์ส์ของวัสดุและโลหะบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างการแสดงค่าความแข็ง [17]

แรงกด	เวลากด	ความแข็ง	การแสดงผล
0.3 kgf	15s	ความแข็งวิกเกอร์ส์ Hv:250	Hv (0.3) 250
0.3 kgf	30s	ความแข็งวิกเกอร์ส์ 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 2.11 ตัวอย่างค่าความแข็งของโลหะและเซรามิกส์บางชนิด [17]

วัสดุ	ความแข็งวิกเกอร์ส์ (Hv)	ความแข็งนูน (HK)
เหล็กกล้าชุบแข็ง	800	850
ซีเมนต์คาร์ไบด์	2000	1400
อลูมินา	2200	1500
ทังสเตนคาร์ไบด์	2600	1900
ซิลิกอนคาร์ไบด์	2600	1900
ไททาเนียมไนไตรด์	3000	2300
คิวบิกโบรอนไนไตรด์	6000	4000
เพชร, ผลึกซินเตอร์	7000	5000
เพชร, ธรรมชาติ	10000	8000

2.3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค [8]

การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) ในขั้นตอนนี้ชิ้นงานตรวจสอบจะถูกเตรียม เพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 2.15 กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค [8]

ชิ้นตรวจสอบที่ถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว ไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) ดังแสดงในรูปที่ 2.30 โดยวางชิ้นตรวจสอบให้อยู่ตรงกลางบริเวณที่แสงผ่าน และให้ลำกล้องเลื่อนมาอยู่ใกล้ชิ้นตรวจสอบมากที่สุด ลำแสงไฟที่ส่องผ่านตกกระทบกับผิวชิ้นทดสอบจะสะท้อนผ่านเลนส์วัตถุ และเลนส์ตาของกล้อง ที่บริเวณขอบเกรนจะเห็นเป็นสีดำ (มืด) ขณะที่เนื้อเกรนเป็นสีเหลือง (สว่าง) แล้วทำการบันทึกผลเพื่อใช้ประกอบในการวิเคราะห์เปรียบเทียบพื้นที่ที่เกิดการเชื่อมต่อ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 Vural *et al.* [1] ศึกษาผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกตที่มีผลต่อความล้มเหลวของรอยเชื่อมด้านทานแบบจุดแผ่นเหล็กกล้าต่างชนิดระหว่างแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีและเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนเนติก 304 โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ การรวมตัวของวัสดุและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนักเกต ชิ้นงานที่ได้ถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบความล้าที่วัฏจักรสูง (High cycle fatigue test) ผลการทดลองพบว่าการรวมตัวของวัสดุที่ดีที่สุดแสดงขีดจำกัดความล้าสูงสุด ค่าขีดจำกัดความล้าต่ำสุดพบได้เมื่อทำการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีเข้ากับเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนเนติก 304 นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดการแตกร้าวของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีเข้ากับเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนเนติก 304 นั้นมีค่าต่ำกว่ารอยต่อที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน

2.4.2 Qiu *et al.* [18-19] ทำการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด A5052 เข้ากับแผ่นเหล็กกรีดเย็น SPCC และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ด้วยการเชื่อมด้านทานแบบจุด และทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อแยกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด ความแข็งแรงของรอยต่อทำการศึกษาด้วยการทดสอบแรงดึงแบบกากบาท และทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อแยกและค่าความแข็งแรงของรอยต่อ ผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับชั้นสารประกอบกึ่งโลหะที่เกิดการก่อตัวขึ้นบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อ ส่วนชั้นสารประกอบกึ่งโลหะที่ไม่ต่อเนื่องส่วนมากพบที่บริเวณขอบของรอยต่อและหากส่วนที่ไม่ต่อเนื่องนี้มีค่ามากจะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น

- 2.4.3 Aslanlar *et al.* [10] ทำการศึกษาอิทธิพลของกระแสการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่มีผลต่อสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีและโครไมด์ ความหนาของแผ่นเหล็กมีค่า 1.2 มม. เครื่องเชื่อมด้านทานแบบจุดเป็นเครื่องเชื่อมที่สามารถควบคุมเวลาและกระแสได้ขนาด 120 kVA ช่วงเวลาการเชื่อมมีค่า 5-15 ไซเคิล กระแสเชื่อม 4-12 kA แรงกดอิลิกโทรดมีค่าคงที่ 6 kN และนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบแรงดึงเฉือนและลอกผิว เพื่อหาค่าสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม ผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดหาค่าได้เมื่อเชื่อมด้วยกระแส 10 kA 15 ไซเคิล ความลึกของการซึมลึกมีค่า 15% ของความหนาวัสดุ แต่ไม่เกิน 20% เพื่อให้ได้ผิวหน้าแนวเชื่อมที่มีคุณภาพ ค่าผิวหน้าแนวเชื่อมที่ดีที่สุดพบได้เมื่อทำการเชื่อมด้วยกระแส 10 kA 10 ไซเคิล และกระแส 9 kA 12 ไซเคิล ซึ่งทำให้เกิดการซึมลึกประมาณ 8% ของความหนา ขณะที่ค่าความแข็งแรงของการลอกผิวพบได้ที่แนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแส 11 kA 10 ไซเคิล ความแข็งแรงที่ได้มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่าความแข็งแรงดึงเฉือน ค่าสภาวะการเชื่อมที่แนะนำให้ใช้เพื่อให้ได้การซึมลึกประมาณ 8% ของความหนาวัสดุ คือ กระแส 11 kA 10 ไซเคิล
- 2.4.4 Aslanlar [20] ศึกษาผลกระทบของขนาดนิวเคลียสต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมด้าน ทานแบบจุด ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ตัวแปรการเชื่อมที่ทำการศึกษประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าและเวลา การเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงลอกผิว และความแข็งแรงดึงเฉือนของเหล็กกล้าโครไมด์ขนาดความหนา 0.8 มม. และเหล็กกล้าเคลือบโครไมด์สังกะสีความหนา 1.0 มม. โดยมีตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วย กระแสเชื่อม 5-25 kA แรงกด 6 kN ผลการทดลองพบว่าตัวแปรที่ทำให้ได้ผิวหน้าที่ดีมีคุณภาพสูง คือรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 6-7 kA 15 ไซเคิล ซึ่งทำให้เกิดการซึมลึกไม่เกิน 20% ของความหนาวัสดุ หากเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 7-8.5 kA 15 ไซเคิล จะทำให้เกิดการซึมลึกมากกว่า 20% ของความหนาวัสดุ และทำให้รอยต่อเกิดการเปลี่ยนรูป เปลี่ยนสี และเกิดการหลอมละลายมากเกินไป เนื่องจากค่าความร้อนที่ได้นั้นมีค่าสูงเกินไป ผิวของแนวเชื่อมมีคุณภาพสูงเมื่อเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 6 kA 10 ไซเคิล ซึ่งค่าเหล่านี้ทำให้เกิดการซึมลึก 6-14% ตามลำดับ
- 2.4.5 Sun *et al.* [21] ศึกษาการเชื่อมด้านทานแบบจุดอลูมิเนียมผสม AA5182-O เข้าสู่เหล็กกล้า SAE 1006 โดยมีแผ่นสอดระหว่างแผ่นทั้งสอง คือ แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี SAE 1006 และแผ่นอลูมิเนียมผสม AA1050 โดยมีจุดมุ่งหมายในการหาค่าตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุด ผลการทดลองพบว่า ที่บริเวณนิกเกต (Nugget zone) พบพื้นที่การหลอมละลายแบ่งออกเป็นสองส่วน นิกเกตด้านของแผ่นเหล็กมีรูปร่างปกติเหมือนดังการเชื่อมทั่วไป คือ มีรูปร่างวงรีคล้ายไข่ครึ่งใบที่ประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรท์ภายในนิกเกต ขณะที่ด้านอลูมิเนียมมีรูปร่างวงรีครึ่งใบที่ประกอบด้วยโครงสร้างแถบบางตามอินเทอร์เฟซของรอยต่อ ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าที่สามารถเทียบเคียงได้กับระดับความแข็งแรงของรอยที่ยึดด้วยริเวท