



โครงการวิจัย เรื่อง

การศึกษาสมบัติรอยเชื่อมต้านทานแบบจุด
ระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD
A Study of Resistant Spot Welds Properties between
AA1100 Aluminum Alloy and SGACD Zinc Coated Steel

โดย

พ.อ.อ. ศักดิ์ชัย จันทศรี
ผศ.ไพบุลย์ แยมเพื่อน
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri
งบประมาณประจำปี 2555

การศึกษาสมบัตินรอยเชื่อมต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD

งบประมาณประจำปี 2555





โครงการวิจัย เรื่อง

การศึกษาสมบัติรอยเชื่อมต้านทานแบบจุด
ระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD
A Study of Resistant Spot Welds Properties between AA1100
Aluminum Alloy and SGACD Zinc Coated Steel

โดย

พ.อ.อ.ศักดิ์ชัย จันทศรี
ผศ.ไพบุลย์ แย้มเผื่อน
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
งบประมาณประจำปี 2555

ผู้วิจัย : พ.อ.อ. ศักดิ์ชัย จันทศรี
ผศ.ไพบุลย์ แยมเนียน
ผศ.ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ชื่องานวิจัย : การศึกษาสมบัติรอยเชื่อมต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และ
เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้ามีความยากลำบากในการเชื่อมหลอมละลาย เนื่องจากความแตกต่างของสมบัติวัสดุ อย่างไรก็ตามการใช้งานรอยต่อนี้มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเพราะรอยต่อชนิดนี้สามารถร่นน้ำหนักรวมของรถยนต์และส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานได้ ดังนั้นหากมีการเชื่อมรอยต่อชนิดนี้ให้มีความสมบูรณ์แล้วอาจทำให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ได้ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมต้านทาน แลลดจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้า และทำการศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD ที่มีขนาดหนา 1 มิลลิเมตร กว้าง 25 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร ในการทดลองใช้การเชื่อมต้านทานแบบจุดในการเชื่อมรอยต่อโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยกระแสไฟเชื่อม เวลากดแช่ และแรงกดปลายอิเล็กโทรด รอยต่อที่ได้จากการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดถูกนำไปทำการตรวจสอบสมบัติของรอยต่อต่อไป

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ ตัวแปรการเชื่อมที่ทำให้ได้ความแข็งแรงเฉือนถึง 2200 N คือ กระแสไฟเชื่อม 95 kA เวลากดแช่ 10 cycle และแรงกดปลายอิเล็กโทรด 0.10 MPa กระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนของรอยต่อเพิ่มขึ้น และทำให้เพิ่มการกระจายตัวของอลูมิเนียมบริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อ เวลากดแช่อิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้นทำให้ส่งผลทำให้การเกาะยึดของโลหะเพิ่มขึ้นและทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น เวลากดแช่และแรงกดอิเล็กโทรดที่สูงทำให้โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยต่อเปลี่ยนแปลงและทำให้การเกาะยึดของวัสดุที่ผิวสัมผัสลดลง รอยเชื่อมตอเกยที่กำหนดให้เหล็กอยู่ด้านบนอลูมิเนียมมีความแข็งแรงเฉือนสูงกว่ารอยเชื่อมตอเกยที่กำหนดให้อลูมิเนียมอยู่ด้านบนเหล็ก โครงสร้างมหภาคของรอยต่อเกยอยู่ในระดับ C ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS Z31339 สามารถนำไปใช้ในงานการผลิตรถยนต์ได้

คำสำคัญ : อลูมิเนียม, เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี, การเชื่อมต้านทานแบบจุด, ความแข็งแรง

Name : FS1.Sakchai Chantasri
Assist. Prof. Paiboon Yampuern
Assist. Prof. Kittipong Kimapong, Ph.D.
Research : A Study of Resistant Spot Welds Properties between AA1100
Title Aluminum Alloy and SGACD Zinc Coated Steel
หน่วยงาน : Department of Industrial Engineering Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Abstract

A joint of aluminum alloy and carbon steel is difficult to fusion weld because of the difference in the materials properties. However, this joint application was continuously increased in an automobile industry because this joint could reduce the gross automobile weight and directly affect to reserve the energy. Therefore, if the joint could perfectly produce, a joint application could be affect to develop the automobile industry. This research work aims to effect study of resistance spot welding parameters on the aluminum and steel joint strength and to comparative study of joint strength and joint microstructure.

The materials in this experimental were AA1100 aluminum alloys and SGACD zinc coated steel with the dimension of 1 mm. thick, 25 mm. wide and 100 mm. wide. The resistance spot welding was performed to produce the lap joint using various welding process parameters such as a welding current, a holding time, and a electrode tip pressure. The lap joint that was produced by a given welding process parameter was investigated for the joint properties.

The summarized experimental results are as follows. An optimum welding parameters that produced maximum tensile shear strength of 2200 N was a welding current of 95 kA, a holding time of 10 cycles, and a welding pressure of 0.10 MPa. Increasing of welding current affected to increase tensile shear strength of the joint and increase the amount of aluminum dispersion at the joint interface. Increasing of a holding time affected to increase the bonging between the materials and joint tensile shear strength. A holding time and an electrode pressure that was high deteriorated the joint macrostructure and microstructure and also decreased the bonging between the materials. A lap joint that was set the steel over the aluminum showed the higher joint tensile shear strength than a lap joint that was set the aluminum over the steel. Macrostructure profile showed that the joints was within the class C of JIS Z31339 and also could apply in automobile industry.

Keywords : aluminum , zinc coated steel, resistance spot welding, strength,

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปี 2555 ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถดำเนินการ และบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการทดลอง ทำให้การทดลองสามารถดำเนินการไปได้อย่างราบรื่น

สุดท้าย คณะผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอน จนทำให้คณะผู้วิจัยมีโอกาสนำงานวิจัยนี้ นอกจากนั้นขอกราบขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่มีความเกี่ยวข้องกับการวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งคณะผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามถึง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบแต่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศักดิ์ชัย จันทศรี
ไพบูลย์ แยมเพื่อน
กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

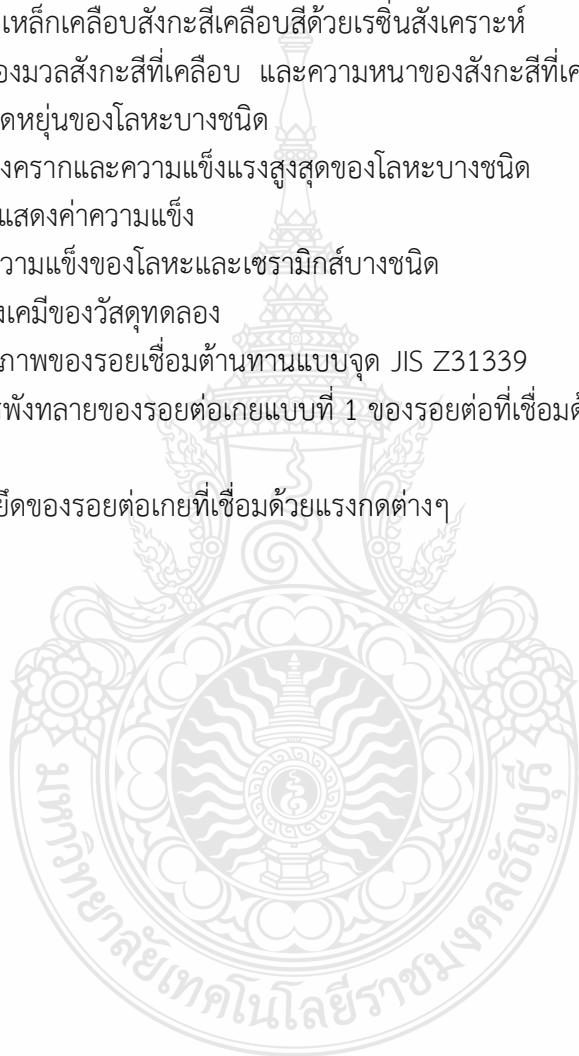


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	
สารบัญรูป	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วัสดุ	3
2.2 การเชื่อมโลหะ	11
2.3 การทดสอบสมบัติโลหะเชื่อม	20
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	24
3.1 วัสดุทดลอง	29
3.2 การเชื่อม	31
3.3 การทดสอบสมบัติรอยต่อ	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง	39
4.1 อิทธิพลกระแสไฟเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงเหนือนดึงของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นเหล็กไว้ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านล่าง	44
4.2 อิทธิพลกระแสไฟเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงเหนือนดึงของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบนและแผ่นเหล็กไว้ด้านล่าง	50
4.3 อิทธิพลของเวลากัดแซ่ต่อความแข็งแรงเหนือนดึงของรอยต่อ	57
4.4 อิทธิพลของแรงกดอิมัลโทรตต่อความแข็งแรงเหนือนดึงของรอยต่อ	67
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์	79

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมบริสุทธิ์	3
2.2	การแบ่งเกรดของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม	4
2.3	สมบัติของอลูมิเนียมผสม	4
2.4	อักษรย่อที่แสดงรายละเอียดของการผลิต	6
2.5	เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดเย็นทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน	9
2.6	ประเภทของเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีด้วยเรซินสังเคราะห์	9
2.7	สัญลักษณ์ของมวลสังกะสีที่เคลือบ และความหนาของสังกะสีที่เคลือบเทียบเท่า	10
2.8	โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด	23
2.9	ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด	24
2.10	ตัวอย่างการแสดงค่าความแข็ง	28
2.11	ตัวอย่างค่าความแข็งของโลหะและเซรามิกส์บางชนิด	28
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง	32
4.1	ค่าระดับคุณภาพของรอยเชื่อมต้านทานแบบจุด JIS Z31339	47
4.2	ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลาทดแช่ ต่างๆ	60
4.3	ผลการเกาะยึดของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยแรงกดต่างๆ	67



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการพื้นฐานในการเชื่อมโลหะ	11
2.2	รูปแบบของกระบวนการเชื่อม	12
2.3	การเกิดความต้านทานในการเชื่อมต้านทานแบบจุด	13
2.4	รอบเวลาการเชื่อมต้านทานแบบจุด	15
2.5	รูปร่างมาตรฐานของอิเล็กโทรด	17
2.6	แผนภาพสมดุลเฟสอลูมิเนียมและเหล็ก	18
2.7	ตัวอย่างรูปแบบของแรงกระทำ	19
2.8	ลักษณะการเกิดความเค้นและความเครียด	21
2.9	การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ	21
2.10	เส้นโค้งการทดสอบแรงดึง	22
2.11	การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รวงกลม และ (ข) รวงรี	25
2.12	องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ	25
2.13	การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส์	27
2.14	การทดสอบความแข็งแบบนูนูป	27
2.15	กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	29
3.1	มิติชิ้นงานเชื่อม (หน่วย: มิลลิเมตร)	31
3.2	เครื่องเชื่อมต้านทานแบบจุด	32
3.3	ลักษณะของอิเล็กโทรดทูป	32
3.4	อุปกรณ์การจับยึดชิ้นงาน	33
3.5	การยึดอุปกรณ์การจับยึดในเครื่องเชื่อมต้านทานแบบจุด	33
3.6	การวางตำแหน่งชิ้นงาน	34
3.7	การกำหนดระยะของอุปกรณ์จับยึด	34
3.8	การล็อกชิ้นงาน	34
3.9	การลบคมของชิ้นงานขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 250	35
3.10	การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด (jig) กับเครื่องเชื่อมต้านทานแบบจุด	36
3.11	การวางแผ่นวัสดุลงบนอุปกรณ์จับยึด	36
3.12	การตั้งค่าตัวแปรการเชื่อม	37
3.17	การเชื่อม	37
3.18	เครื่องทดสอบแรงดึงเดือน GOTECH รุ่น GT-7001-LA-C50	38
3.19	เครื่องตัดชิ้นงานแบบละเอียด	39
3.20	เครื่องขัดผิวโครงสร้างงานขัดหุ้มด้วยผ้าสักหลาด	40
3.21	กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope)	40
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความแข็งแรงเหนือนดึง และการยึดตัวของรอยต่อ เกยที่วางแผ่นเหล็กไว้ด้านบน	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.2	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 85 kA: (ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม	43
4.3	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 90 kA: (ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม	44
4.4	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 95 kA: (ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม	45
4.5	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 100 kA: (ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม	46
4.6	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 105 kA: (ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม	47
4.7	ตำแหน่งและระยะการวัดรอยกด	47
4.8	ความลึกของรอยกดอิลเลกโทรดของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน	48
4.9	อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวรอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่กระแสไฟต่างๆ	49
4.10	รอยต่อเกยแบบที่ 2 ที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนแผ่นเหล็ก	50
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความแข็งแรงเฉือนดึง และการยึดตัวของรอยต่อเกยที่วางแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบน	51
4.12	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 85 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน: (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก	51
4.13	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 90 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน: (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก	52
4.14	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 95 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน: (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก	52
4.15	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 100 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน: (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก	53
4.16	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 105 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน: (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก	54
4.17	ความลึกของรอยกดอิลเลกโทรดของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนที่กระแสต่างๆ	55
4.18	อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวรอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่กระแสไฟต่างๆ	56
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเฉือนดึง การยึดตัวของรอยต่อเกยที่วางแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบน และเวลากดแช่	57
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดตัว รูปแบบรอยต่อ และเวลากดแช่ต่างๆ	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.22	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงของรอยต่อเกย 2 แบบ ที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 1 cycle	59
4.23	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงของรอยต่อเกย 2 แบบ ที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 5 cycle	60
4.24	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงของรอยต่อเกย 2 แบบ ที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 15 cycle	61
4.25	ความลึกของรอยกดอิเล็กทรอนิกส์ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ที่เวลากดแช่ต่างๆ	64
4.26	อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวรอยต่อเกยแบบที่ 1 ต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่เวลากดแช่ต่างๆ	65
4.27	ความลึกของรอยกดอิเล็กทรอนิกส์ของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ที่เวลากดแช่ต่างๆ	65
4.28	อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวรอยต่อเกยแบบที่ 2 ต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่เวลากดแช่ต่างๆ	66
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเฉือนดึง การยึดตัวของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และแรงกด	68
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเฉือนดึง การยึดตัวของรอยต่อเกยแบบที่ 2 และแรงกด	68
4.31	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยแรงกด 0.15 MPa	69
4.32	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยแรงกด 0.20 MPa	70
4.33	รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยแรงกด 0.25 MPa	72
4.34	ความลึกของรอยกดอิเล็กทรอนิกส์ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ที่แรงกดต่างๆ	73
4.35	ผิวสัมผัสของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กทรอนิกส์ 0.25 MPa ถูกกดลงด้านล่าง	73
4.36	อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวรอยต่อเกยแบบที่ 1 ต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่แรงกดต่างๆ	74
4.37	ความลึกของรอยกดอิเล็กทรอนิกส์ของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ที่แรงกดต่างๆ	75
4.38	อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวรอยต่อเกยแบบที่ 2 ต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่แรงกดต่างๆ	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยความร้อนที่เกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสผ่านพื้นที่รอยต่อในการหลอมวัสดุและกดให้ติดกันด้วยแรงดันจากอิเล็กโทรดทั้งสองข้างให้ติดกัน กระบวนการเชื่อมนี้เป็นวิธีการสำคัญที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ดังเห็นได้จากรถยนต์หนึ่งคันที่มีปริมาณการต่อยึดด้วยการเชื่อมต้านทานแบบจุดของชิ้นส่วนระหว่างวัสดุเดียวกัน วัสดุต่างชนิด หรือวัสดุที่มีความหนาแตกต่างกัน ในปริมาณมากกว่าหนึ่งพันจุด [1] หนึ่งในข้อดีของการเชื่อมต้านทานแบบจุดเมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมทิก คือ รอยเชื่อมของการเชื่อมต้านทานแบบจุดนั้นเกิดขึ้นด้านในของรอยต่อ ขณะที่รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกเกิดขึ้นด้านนอก ลักษณะเช่นนี้ทำให้รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกนั้นมีความง่ายต่อการตกแตงมากกว่า [2]

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

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมต้านทานแบบจุดต่อสมบัติของรอยต่อเกยอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD
- 1.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่ตัวแปรการเชื่อมต่างๆ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 อลูมิเนียม AA1100 หนา 1.0 มิลลิเมตร และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD หนา 1.0 มิลลิเมตร เชื่อมต่อด้วยรอยต่อเกย

1.3.2 ศึกษาตัวแปรการเชื่อมด้านทานแบบกวนที่ประกอบไปด้วย กระแสการเชื่อม 85-105 kA เวลาการเชื่อม 5-20 cycles แรงกดอิลีกโทรด 0.00-0.25 MPa

1.3.3 ทดสอบสมบัติทางกลของรอยต่อเกย

1.3.4 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อเกย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย โดยการเพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนา เกี่ยวกับการเชื่อมด้านทานแบบจุด ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1.4.2 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป โดยการพัฒนางานองค์ความรู้พื้นฐานของการเชื่อมวัสดุแผ่นบางต่าง ชนิดในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์

1.4.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจเพื่อนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยการเตรียมข้อมูล วิธีการ และผลการทดลองเบื้องต้น ที่สามารถนำเสนอให้แก่ภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อทำการผลิตได้ทันที

1.4.4 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต โดยคาดว่าผลการทดลองที่ได้จะเป็นหนึ่งทางเลือกในการใช้เป็นข้อมูล พิจารณาการใช้กรรมวิธีการเชื่อมด้านทานแบบจุดในการเชื่อมแผ่นอลูมิเนียมเข้ากับเหล็ก ลดเวลา การทำการทดลอง เพื่อให้ได้ตัวแปรการเชื่อมที่มีความเหมาะสมต่อไป และทำให้ได้แนวเชื่อมที่มี ประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.4.5 เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย กล่าวคือ กลุ่มผู้วิจัย พัฒนางานองค์ความรู้เกี่ยวกับการเชื่อมด้านทานแบบจุด เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนา งานวิจัยต่อไป

กลุ่มบุคคลที่เกี่ยวข้องทางการศึกษา ได้เรียนรู้กระบวนการการเชื่อมด้านทานแบบจุดสำหรับการ เชื่อมวัสดุแผ่นบางต่างชนิด และมีโอกาสในการประยุกต์ใช้ในอนาคตต่อไป

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 ปีโตรเคมี และระบบเคมีอื่นๆ ผิวของอลูมิเนียมมีความสะท้อนแสงสูง อลูมิเนียมมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักมีค่าสูงกว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel) อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความแข็งแรงดึงสูงถึง 90 MPa และความแข็งแรงดึงสามารถเพิ่มขึ้นถึง 680 MPa เมื่อทำการขึ้นรูปเป็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์

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 ซึ่งเป็นการการกระทำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมผสมโดยที่มีวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และได้กำหนดสัญลักษณ์อักษรตามหลังเพื่อที่จะเป็นการระบุถึงกรรมวิธีทางความร้อนมากกระทำต่ออลูมิเนียมผสมชนิดนั้นๆ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Non - Heat Treatable คือกลุ่ม 1xxx 3xxx และกลุ่ม 5xxx ส่วนอลูมิเนียมในกลุ่ม Heat Treatable เช่นกลุ่ม 6xxx 4xxx และกลุ่ม 2xxx ก็สามารถเชื่อมได้แต่ต้องอาศัยเทคนิคและความชำนาญเป็นพิเศษ และอาจจะทำให้ความเหนียวของอลูมิเนียมลดลงได้ ส่วนกลุ่ม 7xxx คือกลุ่มที่มีความแข็งแรงสูงมากเชื่อมได้ลำบากมากจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมแบบอาร์ค และรหัสของกระบวนการทางความร้อนได้ถูกกำหนดโดยสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐฯตั้งแต่ปี 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

นอกจากนั้นสัญลักษณ์ที่แสดงชนิดของอลูมิเนียมยังมีตัวอักษรห้อยท้ายต่อจากตัวเลข 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 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีที่ทำเป็นม้วนแผ่นตัด คือ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นม้วนที่ม้วนตัดแบ่งเป็นแผ่น แผ่นลูกฟูกลอนใหญ่ คือ เหล็กแผ่นที่ได้นำเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นตัดมาขึ้นรูปเป็นลอนขนาดใหญ่ แผ่นลูกฟูกลอนเล็ก คือ เหล็กแผ่นที่ได้นำเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นตัดมาขึ้นรูปเป็นลอนขนาดเล็ก

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีชนิดแผ่นม้วนและแผ่นตัด สังกะสีชนิดนี้ส่วนใหญ่ ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ เครื่องทำความร้อน ท่อของเครื่องปรับอากาศ รางน้ำ ฝ้าโอง และแท่งค้ำน้ำ เป็นต้น

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นลอนมีลักษณะการใช้งานในการก่อสร้างขนาดเล็กสำหรับใช้กันเป็นอาณาเขตของที่ก่อสร้างและที่พักคนงาน รวมถึงนำมาสร้างเป็นสังกะสีมุงหลังคาบ้าน และฝาบาน เช่นกลุ่มลูกค้ำในงานเกษตรกรรม

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัดสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มตามกรรมวิธีการเคลือบสังกะสี คือ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัด โดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า และเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน และแผ่นตัด โดยกรรมวิธีจุ่มร้อน

ก. เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี แผ่นม้วน แผ่นแถบและแผ่นตัด โดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า

มาตรฐาน มอก. 2223 ชั้นคุณภาพ SExxxxx (โดย xxxxx แทนอักษร หรือตัวเลข) เหล็กกล้ากลุ่มนี้เป็นเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าที่ทำมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น และอาจจะนำไปผ่านกระบวนการเคลือบทางเคมี การอาบน้ำมัน เพื่อให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากขึ้น

- การผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยวิธีทางไฟฟ้า (Electro galvanized steel, EG) ผลิตโดยการเคลือบสังกะสีด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าภายในอ่างชุบโดยมีส่วนประกอบ คือ ขั้วบวก ขั้วลบ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น สารละลายสังกะสีซัลเฟต (Zinc sulfate) โดยสังกะสีจะเคลือบลงบนแผ่นเหล็กในลักษณะเป็นอ็อนซึ่งจะต่างไปจากวิธีจุ่มร้อนที่เป็นสารละลายของเหลวติดบนแผ่นเหล็ก ดังนั้นประสิทธิภาพในการเคลือบผิวของกรรมวิธีทางไฟฟ้าจึงสูงกว่า จากนั้นจะนำไปเคลือบด้วยฟอสเฟส (Phosphate treatment : P) หรือโครเมต (Chromate : C) ซึ่งการเคลือบฟอสเฟตนี้จะช่วยให้ความสามารถในการทาสีติดได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการเคลือบด้วยโครเมตจะช่วยให้เพิ่มความในสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและการป้องกันคราบต่างๆ เนื่องจากการเคลือบโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า กระทำที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเหล็กแผ่นพื้นเป็นหลัก โดยไม่ผลกระทบจากความร้อนเหมือนกับในกรณีของการผลิตแบบจุ่มร้อนซึ่งในขณะที่เคลือบแผ่นเหล็กจะทำให้เกิดการเย็น

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 และมีคุณสมบัติการทาสีที่ดี 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) ผลิตภัณฑ์ที่เคลือบโดยวิธีนี้จะมีความสามารถในการทาสีติด และมีความสามารถในการเชื่อม Spot และ Seam เหนือกว่าเหล็กกล้าเคลือบด้วยวิธี HDG เนื่องจากชั้นเคลือบสังกะสีของ HDG มีความสามารถนำไฟฟ้าต่ำกว่าแผ่นเหล็ก อีกทั้งจุดหลอมเหลวก็ยังต่ำกว่าแผ่นเหล็กด้วย ดังนั้นความสามารถในการเชื่อมแบบต่อเนื่องจึงลดลง โดยเป็นผลมาจากสังกะสีที่ติดกับอิเล็กโทรดในขณะที่ทำการเชื่อม ส่วนชั้นเคลือบโลหะเจือสังกะสีเหล็กของเหล็กแผ่น IZ มีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า และมีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับ HDG ดังนั้น ความสามารถในการเชื่อมจึงเทียบเท่าได้กับแผ่นเหล็กซึ่งเป็นโลหะพื้นฐานการใช้งานเหล็กกล้า แบบ IZ นี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยเฉพาะชิ้นส่วนตัวถังภายนอกที่ต้องการคุณสมบัติด้านการทาสีติด 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

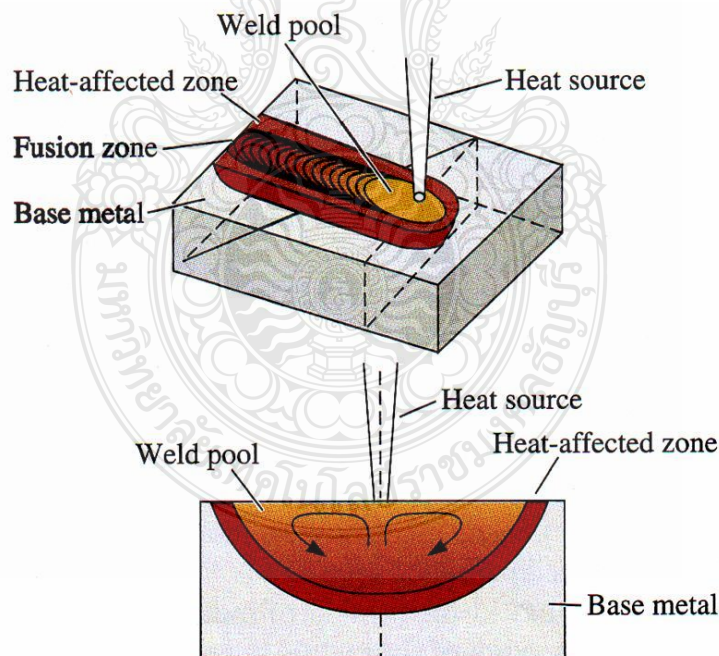
1) PNL FR DRINR LK/RH(S/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 280 มิลลิเมตร ยาว 1,660 มิลลิเมตร และขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 1,050 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นประตูรถปีกอ๊อฟ ประเภท 2 ประตู 1 ตอน

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

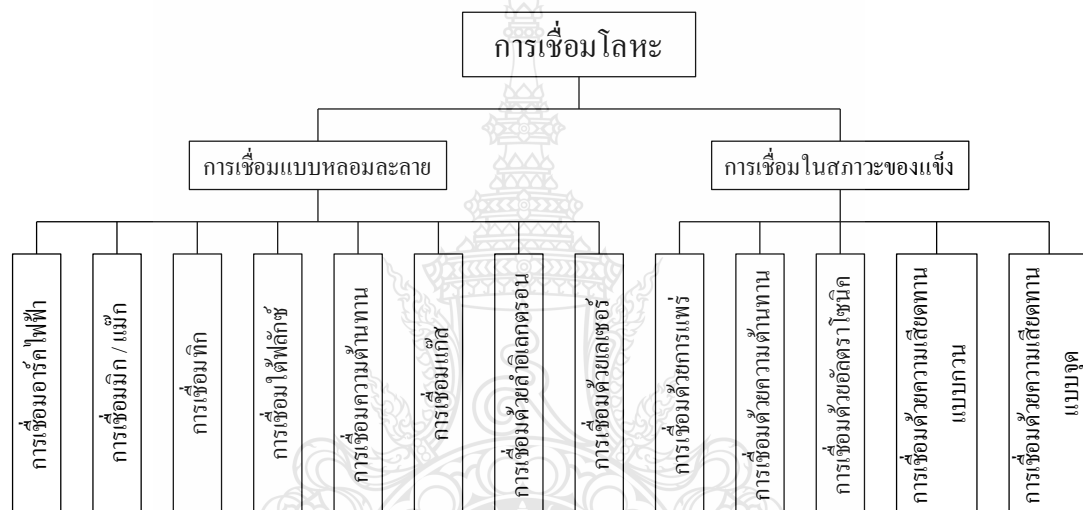
2.2.1 การเชื่อม



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]

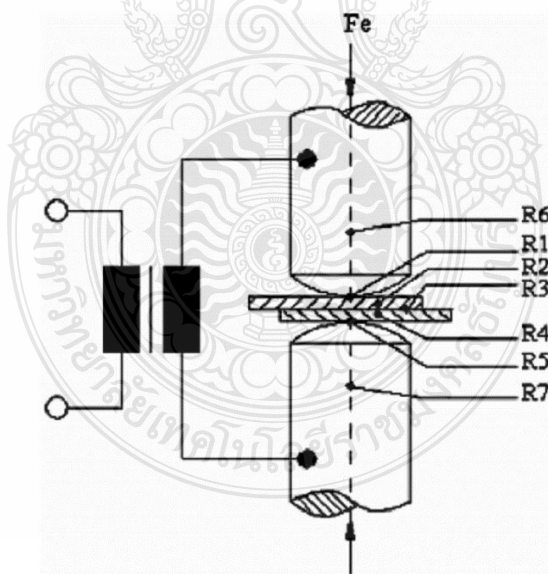
เทคโนโลยีการเชื่อมในปัจจุบันได้แบ่งการเชื่อมออกเป็น 2 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือ การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) และการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) การเชื่อมแบบหลอมละลาย หรือบางครั้งเรียกว่า การเชื่อมหลอมละลายแบบดั้งเดิม (Conventional fusion welding) ความหมายของการเชื่อมแบบหลอมละลายนี้มีลักษณะเดียวกันดังอธิบายในรูปที่ 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

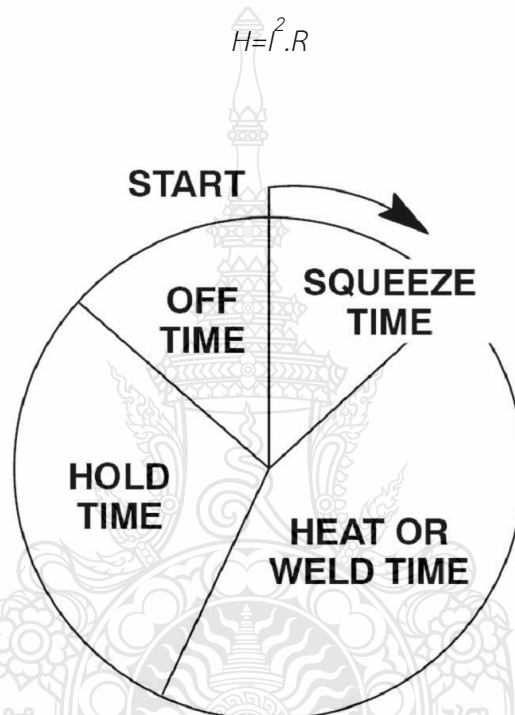
นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นแล้ว ค่าความต้านทานโดยรวมขึ้นอยู่กับความดันที่ผิวสัมผัส ค่า R_1, R_3 และ R_5 ที่อินเทอร์เฟซระหว่างชิ้นงาน การให้ความร้อนพื้นที่สัมผัส R_1 และ R_5 ที่ถูกต้องต้องมีการชดเชยค่าอุณหภูมิและรักษาอุณหภูมิของอิเล็กโทรดให้มีค่าต่ำ ตัวแปรสำคัญที่ทำให้ได้ค่าความร้อนที่ถูกต้อง 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

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



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 ช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาที่ปล่อยให้รอยเชื่อมมีเวลาแข็งตัวที่มากเพียงพอที่จะสร้างความแข็งแรงขึ้นในรอยเชื่อมจนสามารถยอมรับได้

- 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 เวลาการเชื่อมที่สั้นเกินไปนั้นทำให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไป得太ลำบากในโลหะเชื่อม ไม่เกิดการบิดเบี้ยว พื้นที่ผลกระทบความร้อนรอบๆ รอยนักเกิดมีขนาดเล็ก

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

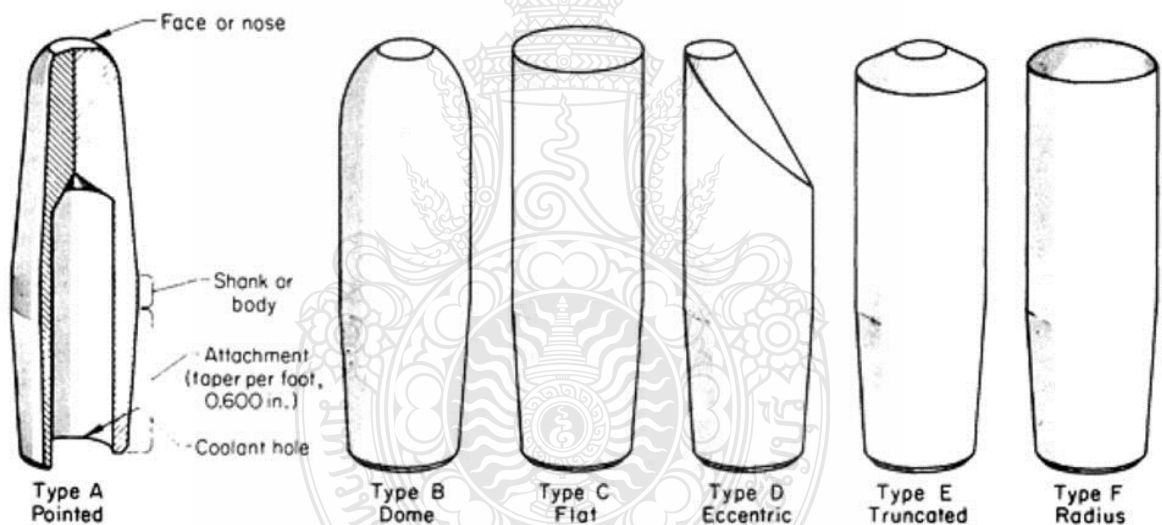
ค่าแรงกดที่มีค่ามากจะทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเชื่อมนั้นมีค่าลดลงที่จุดสัมผัสระหว่างปลายอิเล็กโทรดและผิวชิ้นงาน ค่าแรงกดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการนำความร้อนจากโลหะเชื่อมค่ากระแสที่มีค่าสูงนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าแรงกดที่มีค่ามาก ขณะที่แรงกดน้อยต้องการค่ากระแสที่มีค่าน้อย ดังนั้นในการใช้งานเครื่องเชื่อมจึงควรมีการใช้งานอย่างระมัดระวัง

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

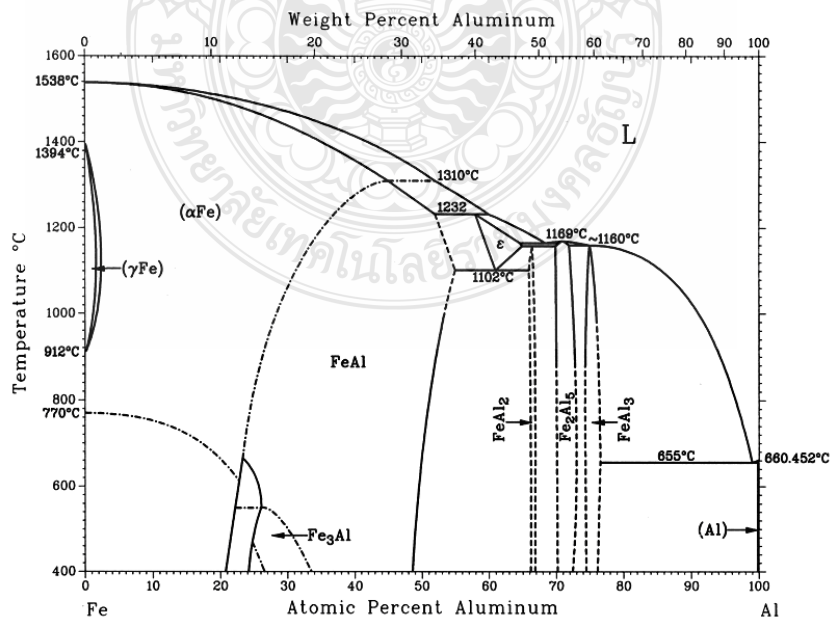
$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด} = 0.100'' + 2t \quad (2.5)$$

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 เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาการรวมตัวของอลูมิเนียมและเหล็กดังรูปที่ 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

ด้วยเหตุนี้ในการเชื่อมต้านทานแบบจูดรอยต่อวัสดุต่างชนิด 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

การเชื่อมต้านทานแบบจูดเป็นกระบวนการเชื่อมที่มีข้อดีและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ นอกจากนั้นจากผลการทดลองในอดีต พบว่าการเชื่อมต้านทานแบบจูดนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กได้ ในเบื้องต้นคาดว่าหากมีการพิจารณาเลือกใช้ตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม คาดว่าจะทำให้ได้รอยเชื่อมที่สมบัติเป็นไปตามต้องการได้ และควรมี

การพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้อย่างระมัดระวัง

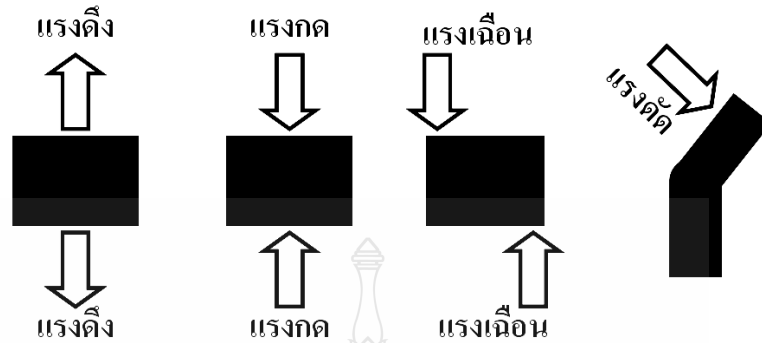
- การเลือกตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสม เพื่อทำการการประยุกต์ใช้ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก และพิจารณาว่าตัวแปรการเชื่อมใดที่ทำให้รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด
- โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อ ในการเชื่อมวัสดุชนิดเดียวกันนั้น รูปร่างของนักเกตของรอยเชื่อม คือ สิ่งสำคัญที่แสดงความสามารถหลอมละลายเข้ากันของวัสดุ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรอยต่อ อย่างไรก็ตามในกรณีของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กนั้น ในเบื้องต้นรูปร่างนักเกต อาจไม่ใช่สิ่งที่บ่งชี้ถึงความแข็งแรงของรอยต่อเนื่องจากรูปร่างของนักเกตที่ดีหมายถึงความสามารถในการรวมตัวของวัสดุรอบๆ แนวเชื่อมที่ดีและอาจบ่งบอกถึงความสามารถในการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะที่เพิ่มขึ้น ในกรณีของรอยต่อระหว่างเหล็กและอลูมิเนียม โครงสร้างอินเทอร์เฟซ (Interface structure) เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงเป็นพิเศษ เนื่องจากการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะมักก่อตัวขึ้นที่บริเวณนี้ และเป็นบริเวณที่รับแรงโดยตรง เมื่อยุติการเชื่อม ด้านทานแบบจุดถูกนำไปใช้งาน การทดลองทำการเชื่อมเพื่อให้ได้ชั้นของสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความบางที่สุด หรือเป็นสารประกอบที่มีปริมาณของเหล็กผสมอยู่สูงเป็นความคาดหวังทางจินตภาพ ปัจจุบันเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่อไป
- อุณหภูมิของรอยต่อแปรผันตรงกับกระแส เวลาเชื่อม และแรงกด ดังแสดงในสมการที่ 2.4 การทำให้เกิดรอยต่อที่อุณหภูมิต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้เป็นวิธีการในการหลีกเลี่ยงชั้นสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความหนาและเปราะ [14] ดังนั้นการควบคุมความร้อนเพื่อหลีกเลี่ยงการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง
- การทดสอบสมบัติทางกลอื่นๆ ของรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กถ้าควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการนำรอยต่อไปใช้งาน ผลการทดลองที่ผ่านมาเน้นการทดสอบสมบัติทางกลได้ทำการทดสอบหาค่าแรงเฉือนด้วยวิธีต่างๆ เช่น วิธีการดึงเฉือน (Tensile shear strength) การทดสอบแบบดึงกากบาท (Cross tension test) และการลอกผิว (Peel test) เป็นหลัก หากมีการทดสอบความล้าตัวของรอยต่อเกยจะทำให้คาดการณ์ถึงอายุการใช้งานในอนาคตได้
- เนื่องจากรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กถ้าเป็นการต่อวัสดุแบบกัลวานิก (Galvanic couple) และเป็นการต่อเกยที่มีม้อบเกิดขึ้น ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนของรอยต่อ ควรมีการศึกษาต่อไป

2.3 การทดสอบสมบัติโลหะเชื่อม [8]

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ [8] ได้นำเสนอวิธีการทดสอบสมบัติของแนวเชื่อมประกอบไปด้วยการทดสอบสมบัติทางกลและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อเกยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สมบัติทางกลของวัสดุเป็นหนึ่งในคุณลักษณะสำคัญในการออกแบบโครงสร้างต่างๆ เพื่อนำไปทำการรับแรงในการใช้งานจริง สมบัติทางกลของวัสดุกล่าวได้ในภาพรวม คือ ความสามารถของวัสดุที่ต้านทานแรงกระทำกับตัวมันเองเพื่อที่จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ หากพิจารณาตามรูปแบบของแรงกระทำต่อวัสดุสามารถแบ่งรูปแบบในการกระทำได้ดังนี้ แรงดึง แรงกด แรงเฉือน แรงดัด รูปแบบของแรง

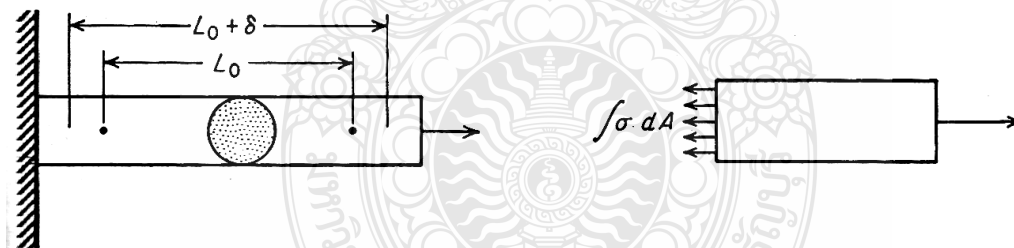
กระทำได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 จากรูปแบบของแรงที่กระทำต่อวัสดุ ลักษณะของความเค้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ มีดังนี้



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]

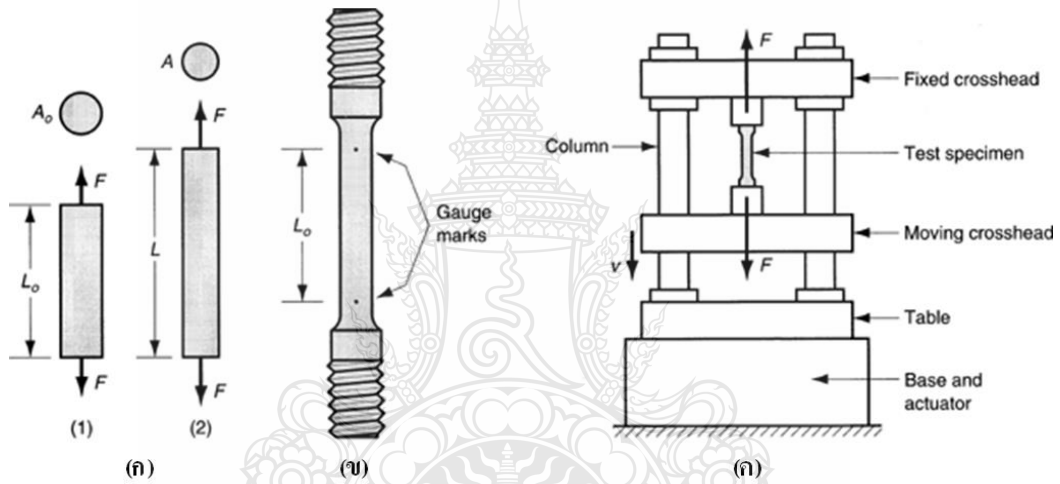
$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2.8)$$

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

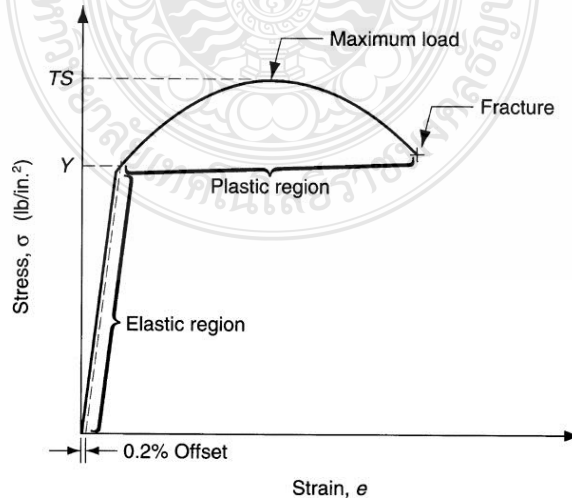
$$\% \text{elongation} = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100\% \quad (2.10)$$

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

- 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 วัสดุจะไม่หดกลับไปถึงความยาวเริ่มต้น 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]

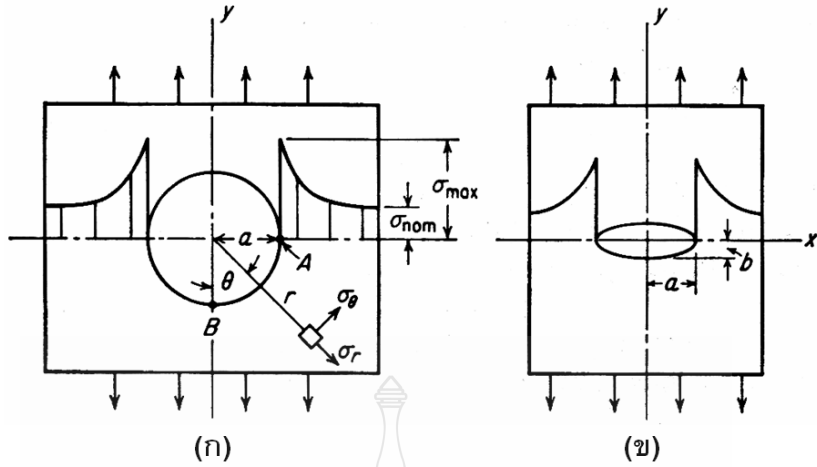
โลหะ	ความแข็งแรงคราก (MPa)	ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)
อลูมิเนียมผสม	175	350
เหล็กหล่อ	275	275
ทองแดงผสม	205	410
แมกนีเซียมทองแดง	175	275

2.3.2 ความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration)

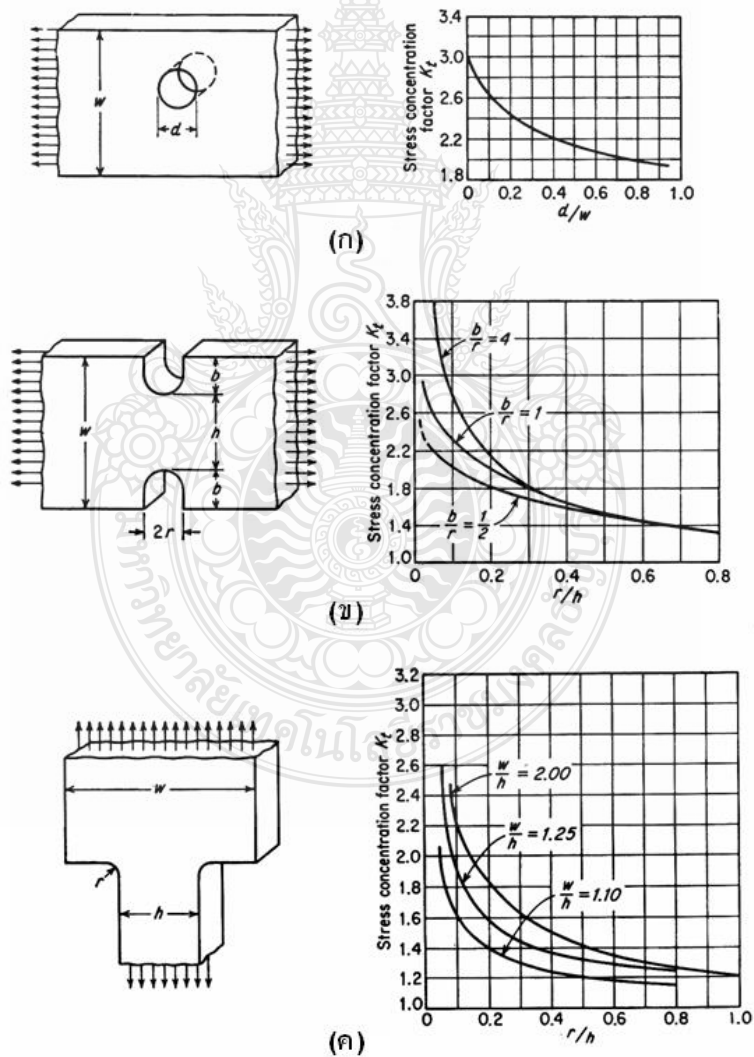
รูปร่างของชิ้นงานที่ไม่มีความต่อเนื่อง เช่น รู ร่องบาก ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณใกล้เคียงพื้นที่ไม่ต่อเนื่องนั้นจะมีค่าความเค้น (σ_{max}) ค่อนข้างสูงกว่าความเค้นเฉลี่ยที่ห่างไกลจากความไม่ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.11 บริเวณด้านข้างของรูวงกลมและรูวงรี หากไม่มีความเค้นที่กระจายตลอดทั้งแผ่น 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]



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ [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]

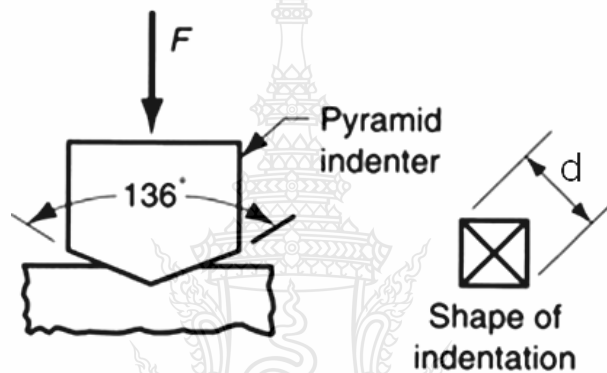
คือ การทดสอบแบบวิกเกอร์ การกดผิวชิ้นงานให้เกิดรอยด้วยแรงกดทดสอบด้วยหัวกดปิระมิดที่มุมเอียงของหัวกดรวมมีค่า 136° ความยาวของเส้นทะแยงมุมของรอยกดแสดงในรูปที่ 2.13 ถูกทำการวัดและนำมาทำการคำนวณตามสมการที่ 2.16 ในกรณีแรงกดมีหน่วยเป็นกรัมแรง (gf) แต่ถ้าแรงกดมีหน่วยเป็นนิวตันต้องใช้สมการที่ 2.17

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

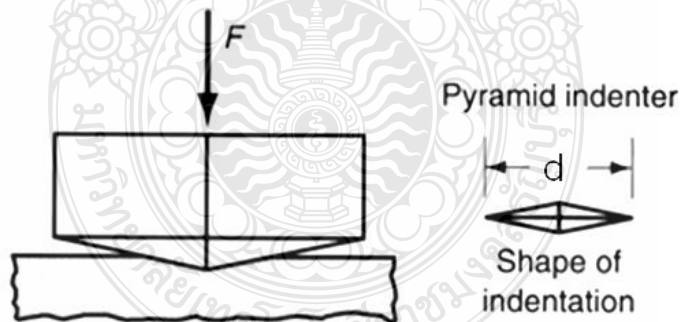
$$H_v = \frac{1.8544}{9.80665} \times \frac{F}{d^2} = 0.18909 \frac{F}{d^2} \quad (2.17)$$

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

การทดสอบความแข็งแบบนูน การกดผิวชิ้นงานให้เกิดรอยด้วยแรงกดทดสอบด้วยหัวกดปิระมิดที่มุมเอียงของหัวกดรวมมีค่า 172° 30' และ 130° ความยาวของรอยกดตั้งแสดงในรูปที่ 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 = ค่าคงที่ของหวัคคคำนวณจาก 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	การแสดงค่า
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) แล้วทำการบันทึกผลเพื่อใช้ประกอบในการวิเคราะห์เปรียบเทียบพื้นที่ที่เกิดการเชื่อมต่อไป

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 Vural *et al.* [1] ศึกษาผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางนักเกตที่มีผลต่อความล้าของรอยเชื่อมด้านทานแบบจุดแผ่นเหล็กกล้าต่างชนิดระหว่างแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีและเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนเนติก 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 และทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อเกยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด ความแข็งแรงของรอยต่อทำการศึกษาด้วยการทดสอบแรงดึงแบบกากบาท และทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเทอร์เฟซของรอยต่อเกยและค่าความแข็งแรงของรอยต่อ 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

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในทดลอง อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีเกรด SGACD แผ่นรีด ความหนา 1.0 มิลลิเมตร ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 แผ่นโลหะถูกตัดให้มีขนาดกว้าง 30 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร และนำมาต่อเกลยโดยกำหนดให้แผ่นเหล็กเกยอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม 30 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง

ธาตุ	Al	Fe	Si	Mn	Cu	P	S
AA1100	สมดุล	-	0.095	0.050	0.150	-	-
SGACD	-	สมดุล	-	-	0.006	0.014	0.024



รูปที่ 3.1 มิติชิ้นงานเชื่อม (หน่วย: มิลลิเมตร)

3.2 การเชื่อม

กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมรอยต่อเกลยระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กที่ออกแบบไว้ในรูปที่ 3.1 คือ การเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในหัวข้อ 2.2.2 โดยเครื่องเชื่อมต้านทานแบบจุดแสดงในรูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมประกอบด้วยอิเล็กโทรดสองด้านในแนวตั้งกลไกการทำงานของเครื่องเชื่อมที่แสดง อิเล็กโทรดด้านบนจะเคลื่อนที่ลงมาหาอิเล็กโทรดด้านล่าง ระบบการเคลื่อนที่และแรงกดลงของอิเล็กโทรดด้านบนทำงานด้วยระบบนิวแมติก

อิเล็กโทรดที่ติดอยู่ด้านปลายของชุดอิเล็กโทรดมีลักษณะรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นอิเล็กโทรดที่ออกแบบตามมาตรฐานสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมต้านทานชนิด E ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ด้านปลายของอิเล็กโทรดออกแบบให้มีขนาดอ้างอิงสมการที่ 2.5 – 2.7 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมตันทานแบบจุด



รูปที่ 3.3 ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์

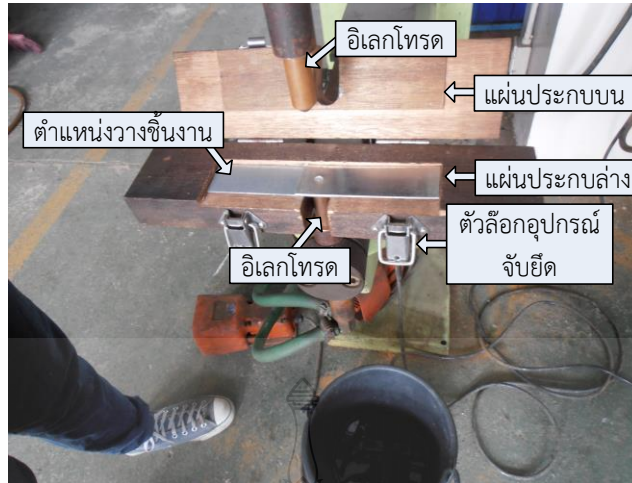
การจับยึดชิ้นงานให้เป็นรอยต่อเกยนั้น ในการศึกษานี้ได้ออกแบบอุปกรณ์จับยึดดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยอุปกรณ์การจับยึดนี้ทำจากวัสดุที่มีสมบัติเป็นฉนวน และมีแผ่นประกบด้านบนและล่างเพื่อถอดแผ่นโลหะ ด้านบนลงสู่ด้านล่างให้แนบสนิทกันดังแสดงในรูปที่ 3.5 – 3.8



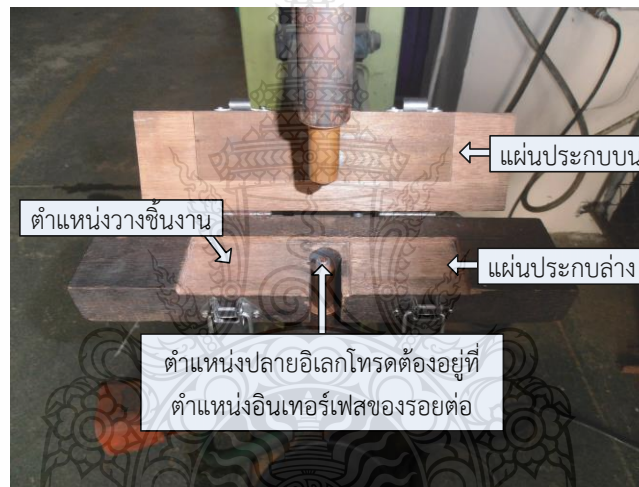
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การจับยึดชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 การยึดอุปกรณ์การจับยึดในเครื่องเชื่อมต้านทานแบบจุด



รูปที่ 3.6 การวางตำแหน่งชิ้นงาน



รูปที่ 3.7 การกำหนดระยะของอุปกรณ์จับยึด



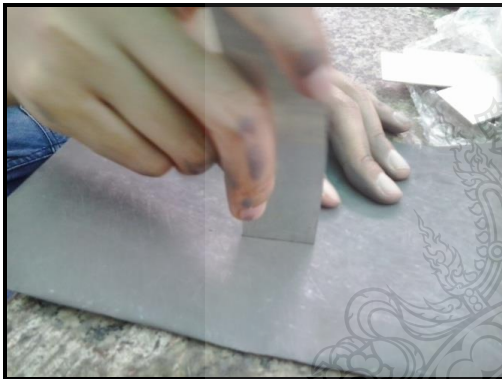
รูปที่ 3.8 การลือกชิ้นงาน

ในการเชื่อมรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กในการทดลองครั้งนี้มีตัวแปรการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองดังนี้

- กระแสไฟเชื่อม 90-105 A
- เวลาในการเชื่อม 1-20 cycles
- แรงกดอิเล็กโทรด 0.1- 0.3 MPa
- ตำแหน่งการวางแผ่นโลหะ: แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน และแผ่นเหล็กอยู่ด้านล่าง

ขั้นตอนการเชื่อมมีดังนี้

- เตรียมแผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และแผ่นอลูมิเนียม AA 1100 โดยตัดแผ่นโลหะทั้งสองชนิดให้มีขนาด กว้าง 30 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดโลหะ
- นำแผ่นเหล็กกล้าและแผ่นอลูมิเนียมที่ตัดได้ขนาดเรียบร้อยแล้วมาทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 250 เพื่อทำการลบคมที่เกิดจากการตัดแผ่นวัสดุทั้งสองชนิดดังรูปที่ 3.9



(ก.) การขัดลบคมด้านกว้างของแผ่นโลหะ

(ข.) การขัดลบคมด้านยาวของแผ่นโลหะ

รูปที่ 3.9 การลบคมของชิ้นงานขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 250

- นำแผ่นเหล็กกล้าเคลือบและแผ่นอลูมิเนียมที่ทำการลบคมเรียบร้อยแล้วมาเช็ดทำความสะอาดโดยแผ่นเหล็กกล้าทำความสะอาดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ และแผ่นอลูมิเนียมนั้นเช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตน
- ทำการติดตั้งอุปกรณ์จับยึด (jig) กับเครื่องเชื่อมต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding : RSW) ให้สมบูรณ์แบบเพื่อเตรียมใช้สำหรับการเตรียมทำการเชื่อมโลหะทั้งสองชนิดดังรูปที่ 3.10
- นำแผ่นเหล็กกล้าเคลือบและแผ่นอลูมิเนียมวางในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานดังรูปที่ 3.11
- ทำการตรวจเช็คให้แน่ใจว่าวางแผ่นเหล็กที่เตรียมไว้ตรงกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานแล้ว พร้อมทั้งจะทำการเชื่อม
- ตั้งค่าตามตัวแปรที่กำหนดไว้ที่เครื่องเชื่อมต้านทานแบบจุดให้เรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 3.12 ก่อนทำการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.13
- ชิ้นงานเมื่อผ่านการเชื่อมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้อง จากนั้นก็นำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงเฉือน (Tension shear testing)



รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด (jig) กับเครื่องเชื่อมตันทานแบบจุด



รูปที่ 3.11 การวางแผนวัสดุลงบนอุปกรณ์จับยึด



รูปที่ 3.12 การตั้งค่าตัวแปรการเชื่อม



รูปที่ 3.13 การเชื่อม

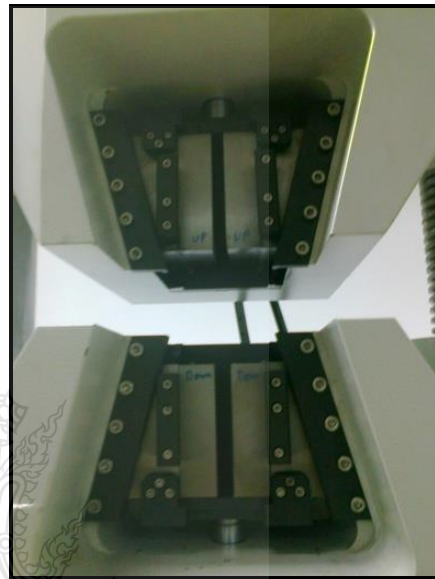
3.3 การทดสอบสมบัติรอยต่อ

3.3.1 การทดสอบความแข็งแรง

การทดสอบแรงดึงเฉือน (Tension shear testing) สำหรับการเชื่อมแบบจุด เพื่อหาค่าความแข็งแรงของการเชื่อมชิ้นงานทดสอบ เป็นการทดสอบรอยเชื่อมด้วยการดึงเฉือน ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน JIS z 3136 โดยการทดสอบค่าความสามารถในการต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงมาตรฐานทั่วไป ที่มีค่าผิดพลาดความเผื่อ $\pm 3\%$ แสดงดังรูปที่ 3.14



(ก) เครื่องทดสอบแรงดึงเฉือน



(ข) ปากจับยึดชิ้นงานของเครื่องทดสอบแรงดึงเฉือน

รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบแรงดึงเฉือน GOTECH รุ่น GT-7001-LA-C50

3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้าง

ในการตรวจสอบโครงสร้างนั้นจะนำเฉพาะชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐานต่างๆ ที่ทำการตรวจสอบ โดยจะนำชิ้นงานทดสอบมาทำการตัดขวางตามกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบ แล้วนำไปขึ้นตัวเรือนเรซิน หลังจากนั้นก็นำมาขัดแล้วกัดกรด แล้วจากนั้นจึงนำไปส่องโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างมหภาค และทำการถ่ายรูป

ก. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้าง

- กระดาษทรายเบอร์ 150,400,800,1000
- เครื่องขัดกระดาษทราย
- กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope)
- ผงเพชร ขนาด 3 ไมคอน
- กรดอะซิโตน
- ผ้าสักหลาด
- น้ำกลั่น
- แอลกอฮอล์

- สำลี

ข. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม (Microstructure)

การเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม (Microstructure) นำชิ้นงานที่ทำการเชื่อมเสร็จมาทำการตัด ผ่าแนวรอยเชื่อมโดยให้ชิ้นงานมีความกว้างประมาณ 5 – 10 มิลลิเมตร ซึ่งการตัดชิ้นงานใช้เครื่องตัดชิ้นงานแบบละเอียดดังแสดงรูปใน 3.15 เพื่อให้ชิ้นงานมีการสันสะท้อนน้อยเพื่อลด การแตกหักบริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงาน และเวลาตัดควรเปิดน้ำหล่อเย็น เพื่อลด ความร้อนของชิ้นงาน เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของชิ้นงาน



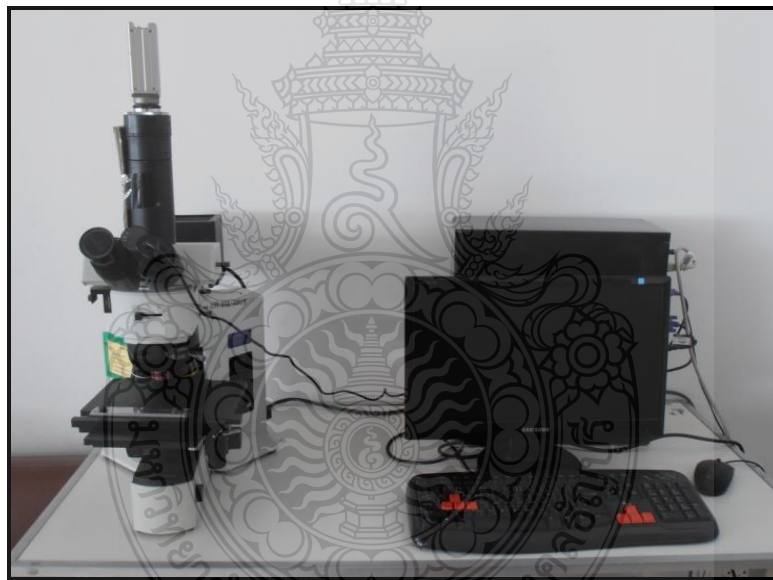
รูปที่ 3.15 เครื่องตัดชิ้นงานแบบละเอียด

การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์สะท้อนแสง (Optical Microscope) ในขั้นตอนนี้ ชิ้นงานทดสอบจะต้องถูกเตรียมเพื่อสามารถนำชิ้นทดสอบไปทำการตรวจสอบโครงสร้างได้นั้น ต้องนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปทำเรือนมีลักษณะดังรูป 3.16 (ก) เพื่อให้สะดวกต่อการจับถือและเตรียมชิ้นงานในขั้นตอนการขัดดูโครงสร้างก็สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว การทำเรือนสามารถทำได้โดยการผสม เรซิน 98 เปอร์เซ็นต์ โคบอลท์ (Cobalt) ประมาณ 0.2-0.4 เปอร์เซ็นต์ ตัวทำให้แข็ง (Hardener) 1-2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผสมเสร็จเทใส่เบ้าหล่อ ทิ้งไว้ประมาณ 20-30 นาที สามารถนำมาขัดได้ทันที ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150, 400, 800 และเบอร์ 1,000 เพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบ

ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำมาวิเคราะห์ จึงต้องขัดผิวชิ้นงานให้เรียบ เพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นนำมาขัดด้วยผงขัด (Polishing) ที่มีขนาด 3 ไมครอน เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจาก ผงเพชร (Diamond paste) การขัดผงขัดนี้จะทำบนเครื่องขัด แสดงดังรูปที่ 3.16 จะใช้เครื่องขัดที่หุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยนำผงขัดผสมกับ แอลกอฮอล์ เทลงบนผ้าสักหลาดแล้วขัดจนมันเงา และ ตามด้วยการกัดกรด เพื่อให้เห็นบริเวณต่างๆที่แตกต่างกันของชิ้นงาน เช่น ขอบเกรน บริเวณที่เชื่อม เพื่อนำมาวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ทำการเชื่อมด้วยสภาวะที่แตกต่างกันของแต่ละสภาวะ



รูปที่ 3.16 เครื่องขัดดูโครงสร้างงานขัดหุ้มด้วยผ้าสักหลาด



รูปที่ 3.17 กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope)

ชิ้นงานที่ขัดจนมันเงา นำมาล้างด้วยแอลกอฮอล์ และล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำมากัดกรดที่เตรียมไว้ ซึ่งกรดที่จะนำมากัดกรด จะมีส่วนผสมที่ประกอบด้วย ไฮโดรฟลูออริก (HF) 30 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรคลอริก (HCl) 10 เปอร์เซ็นต์ น้ำกลั่น (H_2O) 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผสมเสร็จก็นำสำลีจุ่มสารกัดกรดเช็ดบริเวณที่ต้องการส่อง ประมาณ 30 วินาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น เป่าให้แห้งด้วยไดร์เป่าผม นำมาส่องโครงสร้างที่กล้องตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชนิดสะท้อนแสง (Optical Microscope) ดังรูป 3.15 นำบริเวณรอยเชื่อมวางให้ตรงกลางบริเวณที่แสงผ่าน และให้ลำกล้องเลื่อนลงมาให้อยู่ใกล้ขึ้นตรวจสอบมากที่สุด ลำแสงไฟที่กล้องจะส่องผ่านและตกกระทบกับผิวของชิ้นงานจะผ่านเลนส์วัตถุและเลนส์ตาของกล้อง ที่บริเวณของเกรนจะเห็น

เป็นสีดำ (มืด) ขณะที่เนื้อกรนเป็นสีเหลือง (สว่าง) แล้วทำการบันทึกผลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบ รอยเชื่อมยึดต่อไป

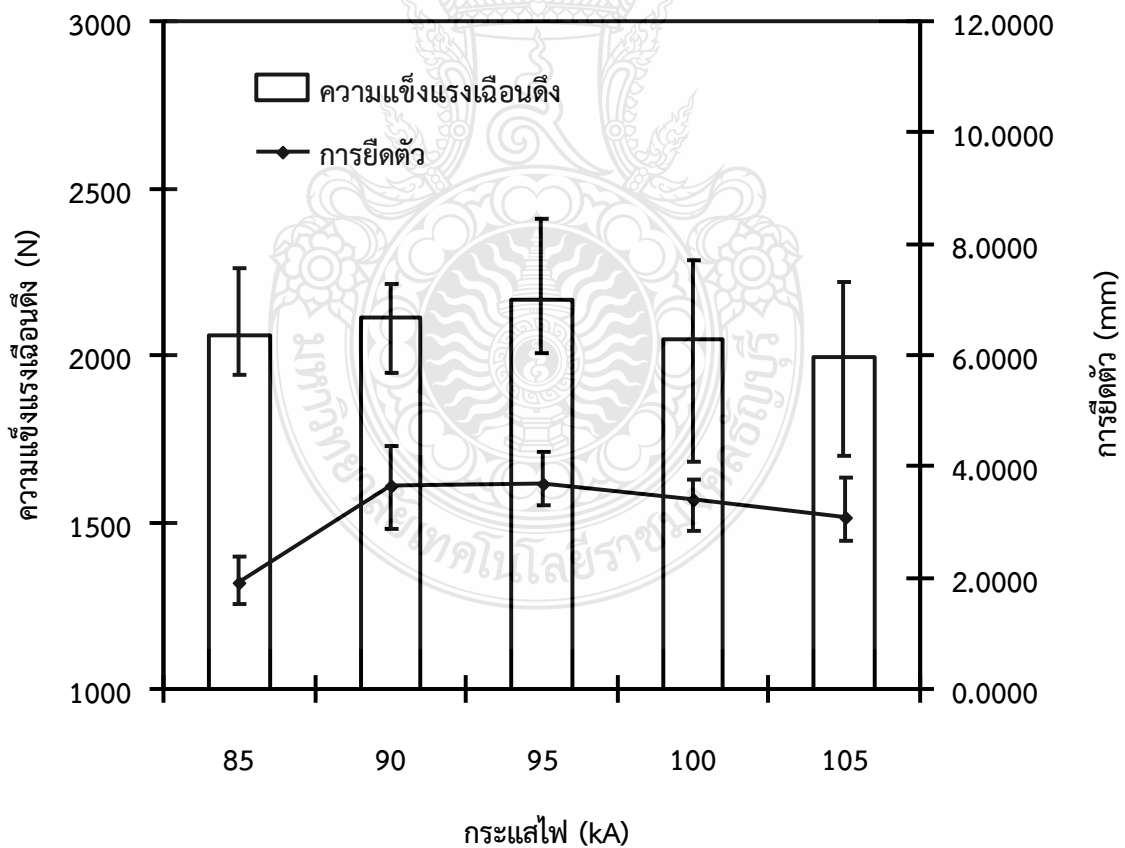


บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

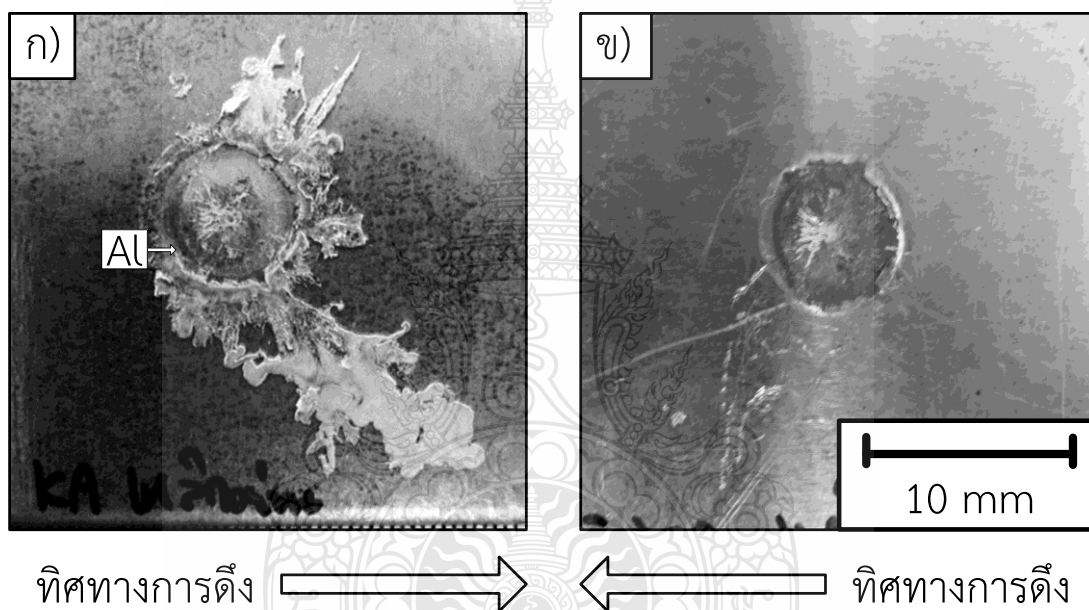
4.1 อิทธิพลกระแสไฟเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือนดึงของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นเหล็กไว้ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านล่าง

การทดลองเชื่อมได้ตั้งสมมติฐานเบื้องต้นไว้ว่า “หากนำเอาแผ่นโลหะที่มีความแข็งต่ำกว่า (อลูมิเนียม) ไว้ด้านบน การเกิดการเชื่อมอาจเป็นไปได้ลำบาก เนื่องจากเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่ทำการทดลองนั้นอิเล็กโทรดเกิดการเคลื่อนที่เพียงอิเล็กโทรดด้านบนลงมาหาอิเล็กโทรดด้านล่าง ความร้อนและแรงกดที่เกิดขึ้นกับแผ่นอลูมิเนียม อาจทำให้แผ่นอลูมิเนียมเสียรูป และส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อได้” ดังนั้นการเชื่อมจึงเริ่มต้นทำการเชื่อมโดยกำหนดให้รอยต่อเกาะระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กที่วางแผ่นเหล็กต่อเกยอลูมิเนียมที่ระยะ 30 มิลลิเมตร ถูกนำมาทำการเชื่อมด้วยแบบจุดด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนด โดยเริ่มต้นจากเปลี่ยนแปลงกระแสไฟเชื่อมระหว่าง 85-105 kA โดยกำหนดให้เวลาในการเชื่อม 10 cycles และแรงกด 0.1 MPa จากนั้นทำการทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อเกยได้ค่าความแข็งแรงและการยึดตัวของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความแข็งแรงเฉือนดึง และการยึดตัวของรอยต่อเกยที่วางแผ่นเหล็กไว้ด้านบน

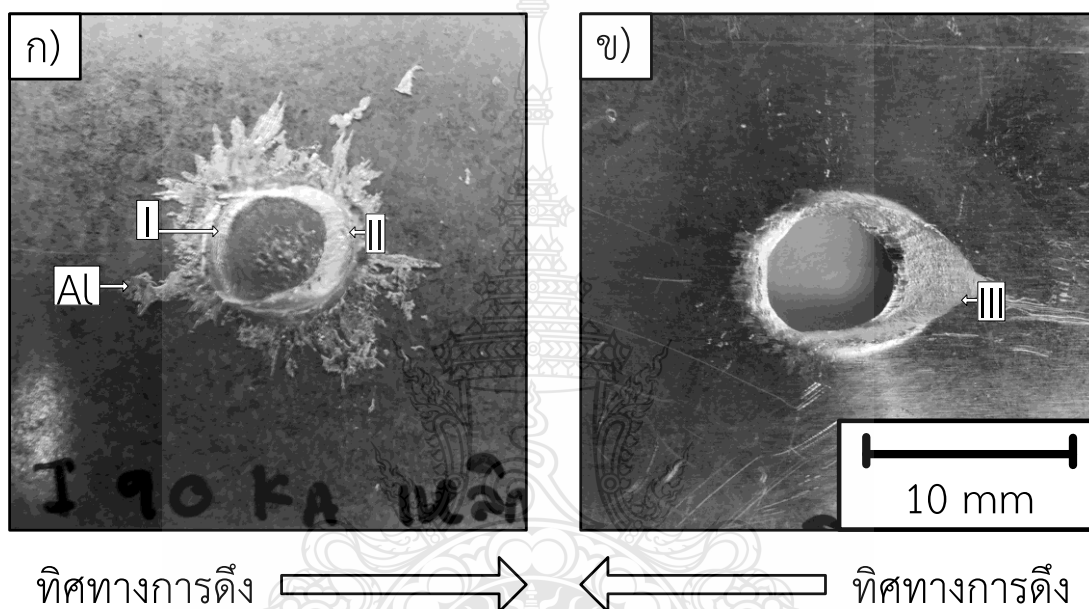
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความแข็งแรงเหน็ด และ การยึดตัวของรอยต่อ
 เกยที่เชื่อมด้วยเวลาในการเชื่อม 10 cycle และแรงกด 0.1 MPa พบว่าความแข็งแรงเหน็ดและการยึดตัว
 ของรอยต่อมีค่าสูงขึ้นเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นและแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดที่กระแสไฟเชื่อม 95
 kA ที่ค่าความแข็งแรงเหน็ดประมาณ 2200 N และการยึดตัวประมาณ 2.4 มิลลิเมตร การเพิ่มค่าความ
 แข็งแรงเหน็ดเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มกระแสส่งผลทำให้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อมีค่าสูงขึ้น
 ดังสมการความร้อนที่ได้แสดงไว้ใน การเชื่อมแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีโครไมด์ที่พบว่ากระแสที่เพิ่มส่งผลเป็น
 ทวีคูณต่อการเพิ่มความร้อนในรอยต่อ [20] อย่างไรก็ตามเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่าสูง คือ 100-105 kA พบว่า
 ค่าความแข็งแรงเหน็ดและการยึดตัวมีค่าลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การลดลงเมื่อกระแสมีค่าต่ำกว่า 95
 kA แล้วมีค่าการลดลงของค่าความแข็งแรงเหน็ดและการยึดตัวน้อยกว่า



รูปที่ 4.2 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเหน็ดที่เชื่อมด้วยกระแส 85 kA: (ก) แผ่นเหล็ก และ (ข)
 แผ่นอลูมิเนียม

รูปที่ 4.2 แสดงผิวหน้าการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเหน็ดที่กระแสไฟเชื่อมต่างๆ รูปรอย
 พังทลายแถวด้านบนเกิดจากการแยกแผ่นเหล็กที่อยู่ด้านบนที่ปกติถูกวางคว่ำประกบบนแผ่นอลูมิเนียมให้
 หายขึ้น และถ่ายภาพ ขณะที่แถวด้านล่าง คือ รอยพังทลายของแผ่นอลูมิเนียมหลังจากดึงขาดออกจากกัน
 ในการทดสอบค่าความแข็งแรงเหน็ดที่แสดงผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.1 นั้นแผ่นเหล็กถูกดึงไป
 ด้านขวา ขณะที่แผ่นอลูมิเนียมถูกดึงไปด้านซ้าย พิจารณารอยการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมที่เกิดจาก
 ความร้อนเสียหายที่แตกต่างจากการให้กระแสไฟเชื่อมที่แตกต่าง พบว่าเศษของอลูมิเนียมมีการ
 กระจายตัวออกมารอบๆ บริเวณพื้นที่การเชื่อมและกระจายตัวไประหว่างรอยต่อของแผ่นอลูมิเนียมและ
 เหล็ก เศษของอลูมิเนียมที่กระจายออกไปจากการตรวจสอบพบว่ามีกระจายตัวสูงที่ใช้กระแสไฟ
 เชื่อมต่ำ คือ 85 kA ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) เศษอลูมิเนียมที่กระจายตัวออกนี้ทำให้พื้นที่รับแรงของรอยต่อ

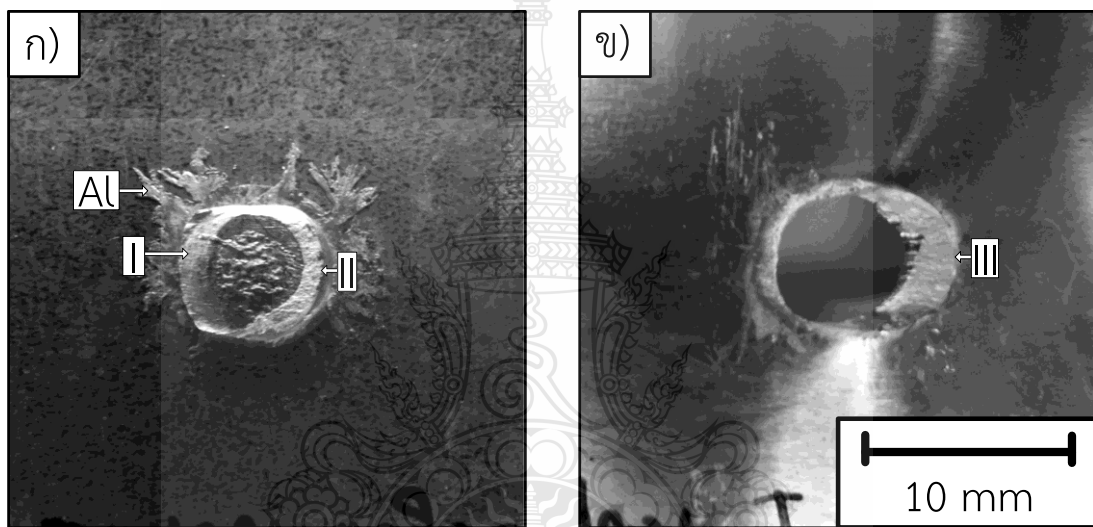
บริเวณที่ทำการรับแรงเฉือนดิ่งมีค่าน้อยลงและส่งผลทำให้ค่าการรับแรงเฉือนดิ่งมีค่าน้อย นอกจากนั้นที่บริเวณรอยฉีกขาดบนพื้นที่การเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) พบว่าการฉีกขาดนั้นเกิดที่อินเทอร์เฟซระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก เนื่องจากการตรวจสอบในระดับกำลังขยายต่ำ (Macro interface examination) กำลังขยายไม่เกิน 10 เท่าด้วยภาพถ่ายดังแสดงในรูปที่ 4.2 นั้น ไม่พบเศษอลูมิเนียมบนผิวเหล็ก หรือเศษเหล็กบนผิวอลูมิเนียม อย่างไรก็ตามการตรวจสอบที่ำลังขยายสูง เช่น ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope: SEM) และการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยฟุ้งหลายอาจต้องมีการตรวจสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองต่อไป



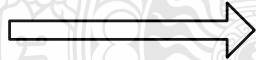
รูปที่ 4.3 รูปแบบการฟุ้งหลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดิ่งที่เชื่อมด้วยกระแส 90 kA: (ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม

รูปที่ 4.3 (ก) และ รูปที่ 4.4 (ก) แสดงผิวรอยฟุ้งหลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดิ่งที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 และ 95 kA เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวการฟุ้งหลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 85 kA ของแผ่นเหล็ก พบว่ารูปการฟุ้งหลายของรอยต่อที่กระแสไฟเชื่อมทั้งสองมีความแตกต่างจากกระแสไฟเชื่อม 85 kA อย่างชัดเจน กล่าวคือ การกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กที่กระจายตัวบริเวณรอบๆ แนวเชื่อม มีปริมาณลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น อลูมิเนียมที่กระจายออกมานั้นแสดงการกระจายต่ำสุดเมื่อใช้กระแสไฟเชื่อม 95 kA ซึ่งเป็นกระแสไฟเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุดในการทดลองนี้ การยึดติดของอลูมิเนียมและเหล็กมีการยึดติดที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนของอลูมิเนียมที่ติดบนแผ่นเหล็กดังแสดงด้วยลูกศร I ในรูปที่ 4.3 (ก) และ รูปที่ 4.4 (ก) ผิวของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA แสดงผิวเชื่อมที่มีความขรุขระมากกว่าอันเกิดจากกระแสไฟเชื่อมที่สูงกว่าทำให้เกิดความร้อนที่มากกว่าในการหลอมวัสดุเข้าด้วยกัน ตำแหน่งการฟุ้งหลายของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 และ 95 kA มีการฟุ้งหลายเนื่องจากแรงเฉือนดิ่งรอบๆ บริเวณพื้นที่การยึดติดของอลูมิเนียมและ

เหล็กดังแสดงด้วยลูกศร II ในรูปที่ 4.3 (ก) และ รูปที่ 4.4 (ก) โดยตำแหน่งการฉีกขาดเกิดที่เนื้ออลูมิเนียมรอบๆ พื้นที่การเชื่อมที่ด้านอลูมิเนียม โดยสามารถยืนยันการฉีกขาดบนแผ่นอลูมิเนียมได้ดังแสดงด้วยลูกศร III ในรูปที่ 4.3 (ข) และ รูปที่ 4.4 (ข) และพบว่าแนวเชื่อมของอลูมิเนียมและเหล็กมีความแข็งแรงสูงกว่าแผ่นวัสดุอลูมิเนียม เนื่องจากวัสดุเกิดการฉีกขาดที่แผ่นรอยต่อเกยด้านอลูมิเนียมและไม่เกิดการพังทลายที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในการศึกษาทดลองนี้รอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA แสดงความแข็งแรงเฉือนดึงสูงสุดที่ค่าประมาณ 2165 N ความแข็งแรงที่สูงกว่าของรอยต่อเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 kA เมื่อพิจารณาจากรอยพังทลายพบว่า พื้นที่การฉีกขาดของรอยต่อด้านแผ่นอลูมิเนียมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA มีค่ามากกว่าจึงสามารถรับแรงได้ดีกว่า



ทิศทางการดึง

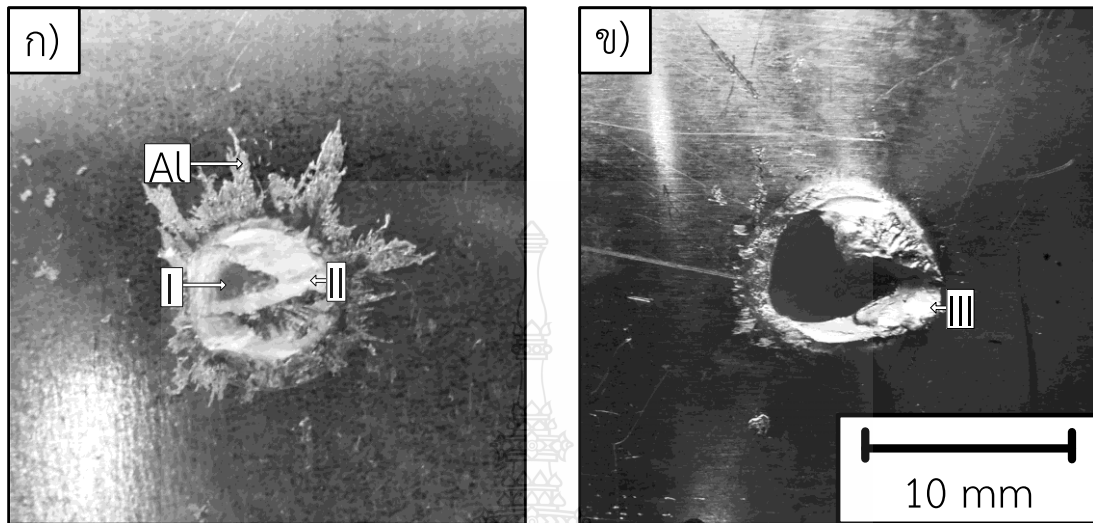


ทิศทางการดึง

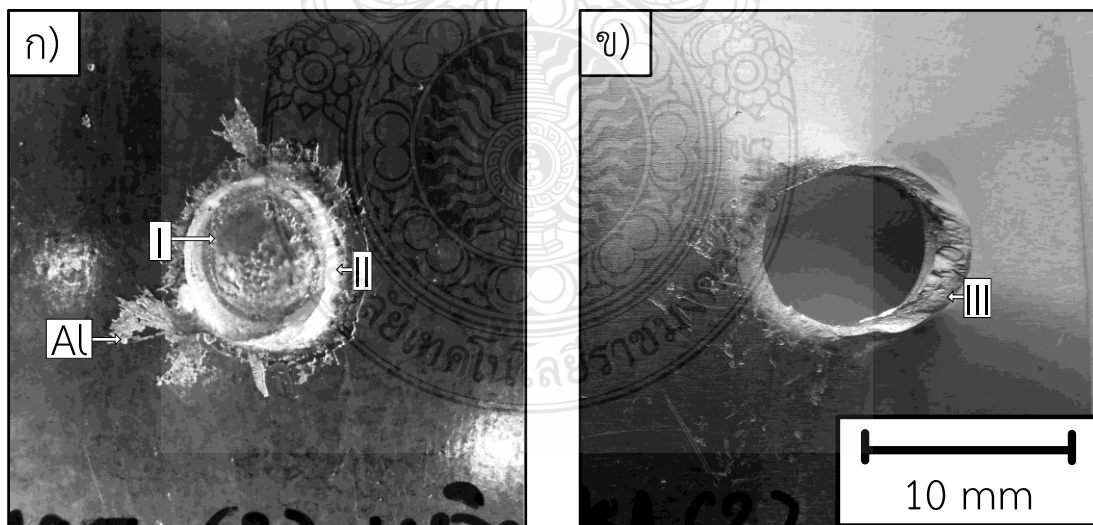
รูปที่ 4.4 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 95 kA: (ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม

รูปที่ 4.5 แสดงรอยการฉีกขาดของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแส 100 kA ด้านเหล็กและอลูมิเนียมตามลำดับ พบว่าแนวเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำกว่ากระแสไฟเชื่อม 95 kA แนวการฉีกขาดแตกต่างออกไป กล่าวคือ การฉีกขาดไม่ได้เกิดขึ้นรอบๆ พื้นที่การเชื่อมแต่เกิดสลักกันไปในพื้นที่การเชื่อมที่แสดงทั้งพื้นที่การเชื่อมที่เกิดจากการกดของอิเล็กโทรดดังแสดงด้วยลูกศร I และพื้นที่ที่เกิดการฉีกขาดบนส่วนของแผ่นอลูมิเนียมดังแสดงด้วยลูกศร II หากเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่ใช้กระแสไฟเชื่อม 95 kA แล้วสาเหตุที่รอยต่อมีความแข็งแรงต่ำกว่า คือ พื้นที่การรับแรงของรอยต่อมีค่าน้อยกว่า อันเกิดจากอลูมิเนียมที่ถูกทำให้กระจายออกด้านนอกรอบข้างแนวเชื่อมที่มากกว่า อย่างไรก็ตามรอยเชื่อมที่กระแสไฟนี้แสดงค่าที่มีความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกับความแข็งแรงของแผ่นอลูมิเนียมเพราะแสดงการฉีกขาดในเนื้อของอลูมิเนียมดังแสดงด้วยลูกศร III การเพิ่มกระแสไฟเชื่อมมีค่าเท่ากับ 105 kA พบว่ารอยฉีกขาดมีรูปแบบใกล้เคียงกับรอยเชื่อมที่

เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA คือ มีการฉีกขาดรอบๆ แนวเชื่อมบริเวณแผ่นอลูมิเนียม แต่พื้นที่การฉีกขาด หรือพื้นที่รับแรงมีค่าน้อยกว่า จึงเป็นสาเหตุทำให้รอยต่อแสดงค่าต่ำกว่า

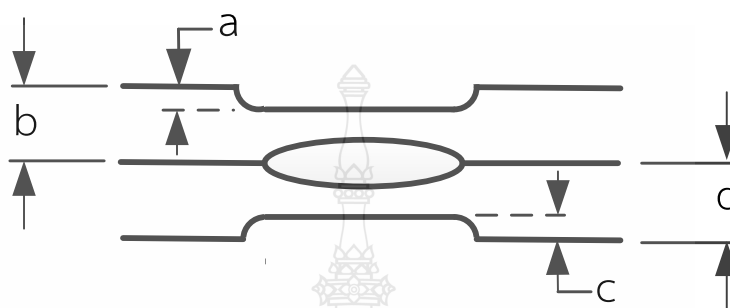


ทิศทางการดึง → ← ทิศทางการดึง
รูปที่ 4.5 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 100 kA: (ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม



ทิศทางการดึง → ← ทิศทางการดึง
รูปที่ 4.6 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 105 kA: (ก) แผ่นเหล็ก และ (ข) แผ่นอลูมิเนียม

การกระจายของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้นเป็น 105 kA ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) เมื่อเปรียบเทียบกับรอยฉีกขาดของแผ่นเหล็กที่เชื่อมด้วยกระแส 100 kA ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) พบว่าพื้นที่ของอลูมิเนียมที่ซรุขระที่แสดงการเชื่อมนั้นมีปริมาณพื้นที่ใหญ่ขึ้นดังแสดงด้วยลูกศร I ขณะที่พื้นที่ของการฉีกขาดของอลูมิเนียมดังแสดงด้วยลูกศร II มีขนาดที่เล็กลง ซึ่งตรวจสอบได้ว่าการขาดเกิดที่ทางด้านแผ่นอลูมิเนียมดังแสดงด้วยลูกศร III ในรูปที่ 4.5 (ข)



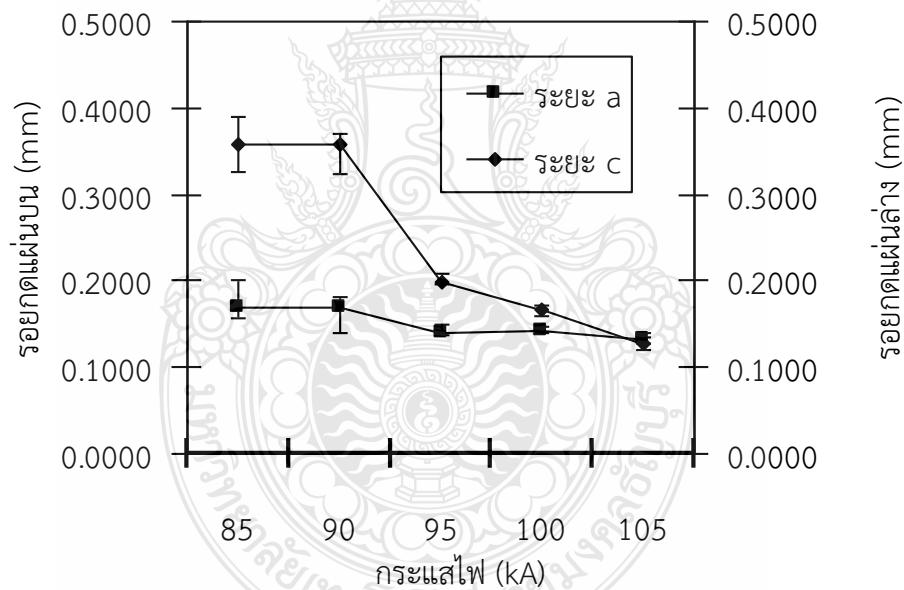
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งและระยะการวัดรอยกัด [22]

การนำรอยต่อการเชื่อมด้านทานแบบจุดไปใช้งานในงานอุตสาหกรรม รอยต่อควรมีรูปร่างของรอยเชื่อมเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น หมายเลข JIS Z31339 [22] ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยมีค่าสำคัญที่ต้องวัดดังแสดงในรูปที่ 4.7 คือ ความลึกของรอยกัดด้านบน (a) ความลึกของรอยกัดด้านล่าง อัตราส่วน (b) อัตราส่วนระหว่างความลึกรอยกัดและความหนาแผ่นบน (a/b) และอัตราส่วนระหว่างความลึกรอยกัดและความหนาแผ่นล่าง (c/d) ผลการตรวจสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 ค่าระดับคุณภาพของรอยเชื่อมด้านทานแบบจุด JIS Z31339 [22]

ระดับ	คุณภาพผิวสำเร็จ
A	คุณภาพผิวสำเร็จที่มีคุณภาพสูง ผิวสำเร็จต้องเรียบ ไม่มีรอยกัด ไม่มีรอยแตกร้าว และไม่มีรูแบบต่างๆ
B	คุณภาพผิวสำเร็จที่มีความละเอียด รอยกัดแผ่นบนและล่างไม่ลึกเกิน 0.1 มิลลิเมตร ไม่มีรอยแตกร้าว ไม่มีรูแบบต่างๆ และไม่มีเศษที่เกิดการกระจายออกมาของโลหะ
C	คุณภาพผิวสำเร็จที่มีความละเอียดปานกลาง รอยกัดแผ่นบนและล่างไม่ลึกเกิน 0.3 มิลลิเมตร ไม่มีรอยแตกร้าว ไม่มีรูแบบต่างๆ และไม่มีเศษที่เกิดการกระจายออกมาของโลหะ
D	ไม่คำนึงถึงรูปร่างรอยเชื่อม ไม่มีรอยแตกร้าว

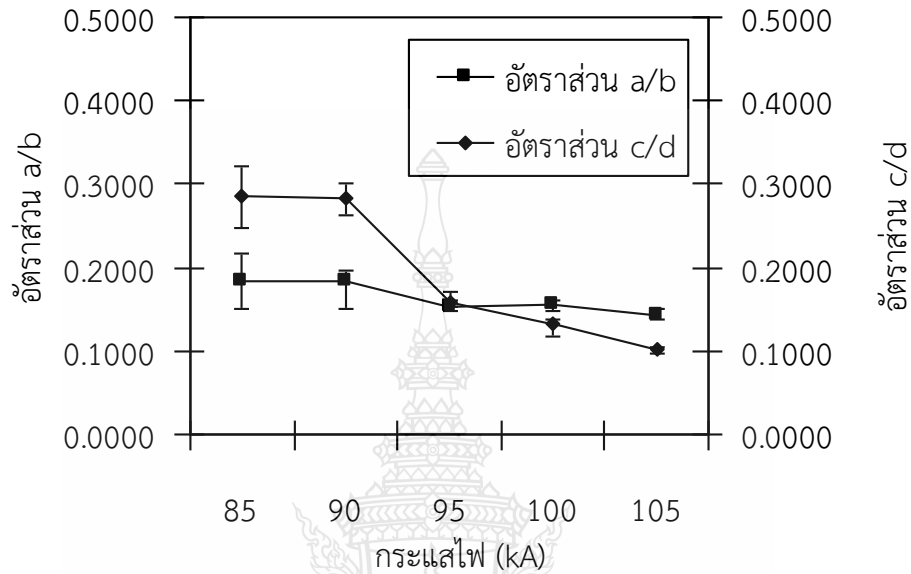
รูปที่ 4.8 แสดงความลึกของรอยกตอิเลกโทรดการเชื่อมด้านทานแบบจุดบนผิวรอยต่อเกยที่กระแสไฟต่างๆ พบว่ารอยกตที่เกิดขึ้นมีความลึกเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้น ความลึกของรอยกตที่เกิดขึ้นบนผิวของแผ่นเหล็กที่ถูกกำหนดไว้ด้านบนมีค่าประมาณ 0.1800 -0.1200 มิลลิเมตร และมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 85 ถึง 105 kA เมื่อนำค่าความลึกของรอยกตไปเปรียบเทียบกับความลึกของรอยกตด้านแผ่นอลูมิเนียมที่ถูกกำหนดไว้ที่ด้านล่าง พบว่า ความลึกของรอยกตมีค่าสูงประมาณ 3.5000 - 3.6000 มิลลิเมตร ในการเชื่อมที่กระแสไฟ 85-90 kA ความลึกมีค่าของรอยกตมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่าลดลงเช่นเดียวกันกับด้านแผ่นเหล็ก ผลความลึกของรอยกตที่วัดได้นี้เมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับค่าคุณภาพแนวเชื่อมด้านทานแบบจุดของผลิตภัณฑ์ยานยนต์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น หมายเลข JIS Z31339 พบว่าความลึกของรอยกตการเชื่อมด้านแผ่นอลูมิเนียมของกระแสไฟเชื่อม 85 และ 90 kA นั้นไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเนื่องจากความลึกของรอยกตมีค่าสูงกว่าเกณฑ์การยอมรับ ขณะที่ความลึกของรอยกตของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟ 95-105 kA นั้นมีค่าความลึกอยู่ในช่วงระดับ C มีค่าความลึกของรอยกตอยู่ที่ 0.1-0.3 มิลลิเมตร ผิวลักษณะนี้เป็นผิวรอยเชื่อมที่มีคุณภาพปานกลาง ต้องการการตกแต่งผิวก่อนสามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากไม่พบการเกิดการแตกร้าว (Crack) ขึ้นในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม



รูปที่ 4.8 ความลึกของรอยกตอิเลกโทรดของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบน

ความลึกของรอยกตของอิเลกโทรดบนผิวรอยต่อเกยนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาของแผ่นวัสดุ เนื่องจากหากความลึกของรอยกตมีค่ามากอาจทำให้แผ่นงานมีพื้นที่ในการรับแรงลดลงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่าอัตราส่วนระหว่างรอยกตของอิเลกโทรดบนผิวรอยต่อเกยต่อความหนาของแผ่นโลหะ โดยกำหนดไว้ตาม JIS Z31339 ว่าอัตราส่วนนี้ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.3 รอยต่อเกยจึงสามารถนำไปใช้งานในระดับคุณภาพแนวเชื่อมที่ยอมรับได้ ค่าอัตราส่วนอัตราส่วนระหว่างรอยกตของอิเลกโทรดบนผิวรอยต่อเกยต่อความหนาของแผ่นโลหะของการศึกษาครั้งนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.9 อัตราส่วนความลึกของรอยกตบนผิว

รอยต่อเกยต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่กระแสไฟต่างๆ ที่พบว่าค่าอัตราส่วนความลึกของรอยกุดบนผิวรอยต่อเกยต่อความหนาแผ่นโลหะมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่กระแสไฟ 85 kA ควรหลีกเลี่ยงนำไปใช้งาน เนื่องจากค่าอัตราส่วนความลึกของรอยกุดบนผิวรอยต่อเกยต่อความหนาแผ่นโลหะมีค่าใกล้เคียงค่าขีดจำกัดการยอมรับมากเกินไป



รูปที่ 4.9 อัตราส่วนความลึกของรอยกุดบนผิวรอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กอยู่ด้านบนต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่กระแสไฟต่างๆ

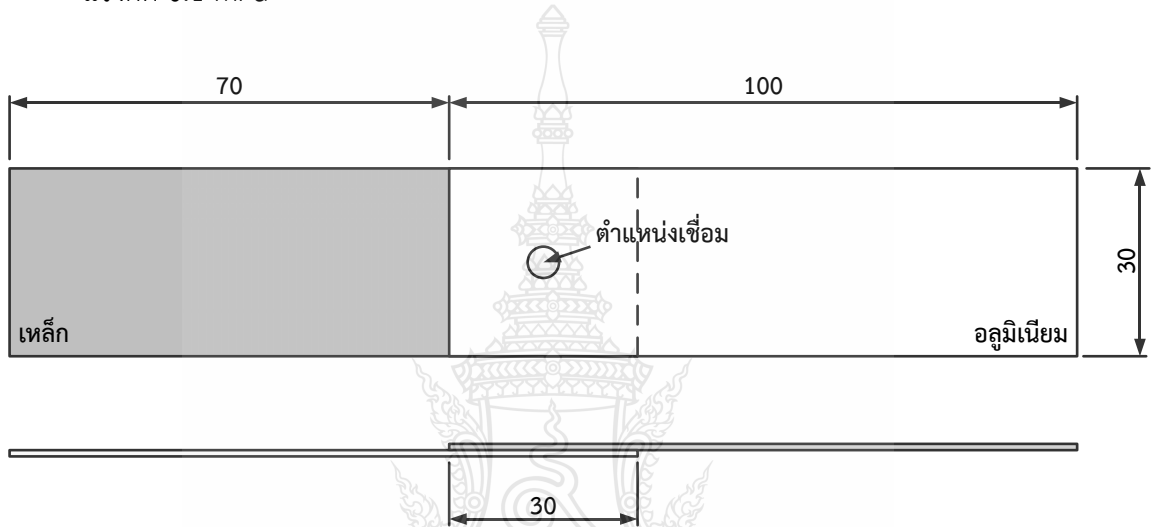
การทดลองในส่วนนี้ได้ทำการเชื่อมตันทานแบบจูดรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีเกรด SGACD โดยทำการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อ ผลการศึกษาสำคัญมีดังนี้

- การเชื่อมตันทานแบบจูดสามารถทำให้เกิดรอยต่อเกยที่มีความสมบูรณ์
- การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟเชื่อมทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนดึงและการยึดตัวของของรอยต่อเกยมีค่าเพิ่มขึ้น
- สถานะการเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดประมาณ 2200 N และการยึดตัวของรอยต่อเกย 2.8 มิลลิเมตร คือ กระแสไฟเชื่อม 95 kA เวลาเชื่อม 10 cycle และแรงกด 0.1 MPa
- ความลึกรอยกุดของอิเล็กโทรดการเชื่อมตันทานแบบจูดบนผิวหน้ารอยต่อเกยมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟมีค่าเพิ่มขึ้น
- อัตราส่วนอัตราส่วนรอยกุดต่อความหนาของแผ่นโลหะมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น

4.2 อิทธิพลกระแสไฟเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือนดึงของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบนและแผ่นเหล็กไว้ด้านล่าง

การทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการตรวจสอบสมมติฐานที่กำหนดไว้ในตอนต้นของหัวข้อที่ 4.1 โดยกำหนดให้ให้แผ่นอลูมิเนียมวางต่อเกยบนแผ่นเหล็กและมีรูปร่างรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.10 จากนั้นทำการเชื่อมด้วยตัวแปรการเชื่อมดังนี้

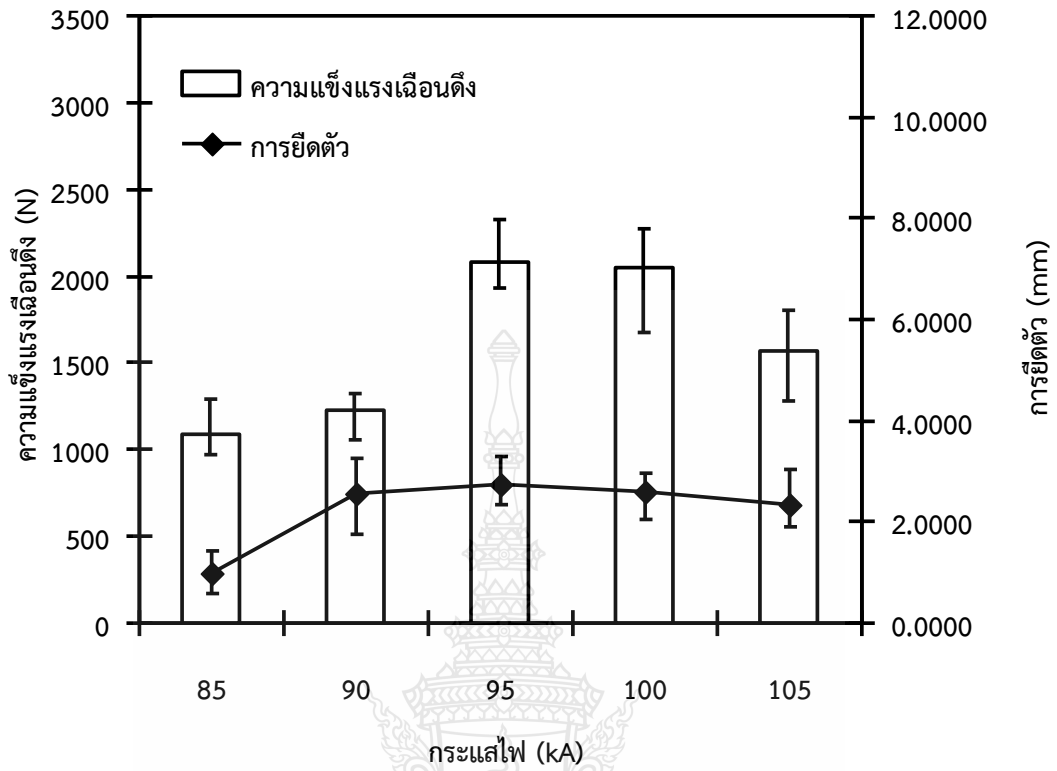
- กระแสไฟเชื่อมระหว่าง 85-105 kA
- เวลาในการเชื่อม 10 cycle
- แรงกด 0.1 MPa



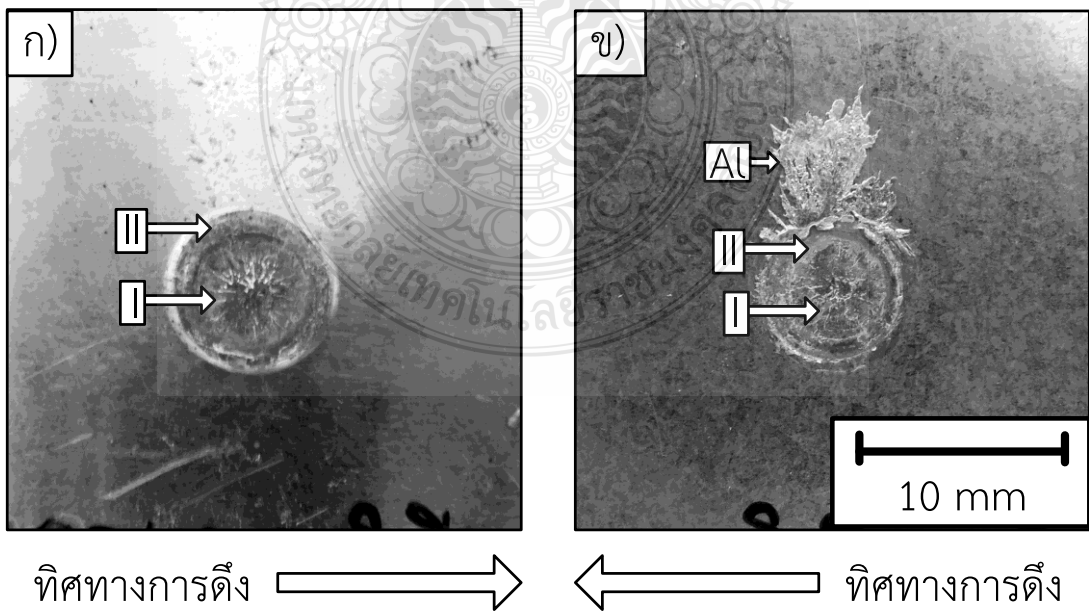
รูปที่ 4.10 รอยต่อเกยแบบที่ 2 ที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนแผ่นเหล็ก

รอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟต่างๆ ถูกนำไปทำการทดสอบความแข็งแรงเฉือนดึงและได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเฉือนดึง การยึดตัวของรอยต่อ และการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟเชื่อมจาก 85 ถึง 95 kA ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนดึงและการยึดตัวของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของช่วงกระแสที่เพิ่มขึ้นหากพิจารณาจากรอยฉีกขาดของรอยต่อที่กระแสไฟเชื่อม 85 90 และ 95 kA ดังแสดงในรูปที่ 4.12 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ พบรูปแบบการฉีกขาดที่แตกต่างกัน คือ ที่กระแสไฟเชื่อมที่ค่าต่ำสุดในการทดลองในหัวข้อนี้ ตำแหน่งการฉีกขาดของรอยต่อเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.12 การฉีกขาดเกิดเป็นรูปร่างที่สม่ำเสมอรอบๆ รอยเชื่อม พื้นที่การเชื่อมและพื้นที่การฉีกขาดแสดงด้วยลูกศรที่ I II และ III พื้นที่ที่เกิดการเกาะยึดกันแน่น และเกิดการฉีกขาดออกจากกันมีขนาดเล็ก นอกจากนี้อลูมิเนียมเกิดการแตกกระจายออกจากบริเวณการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข)

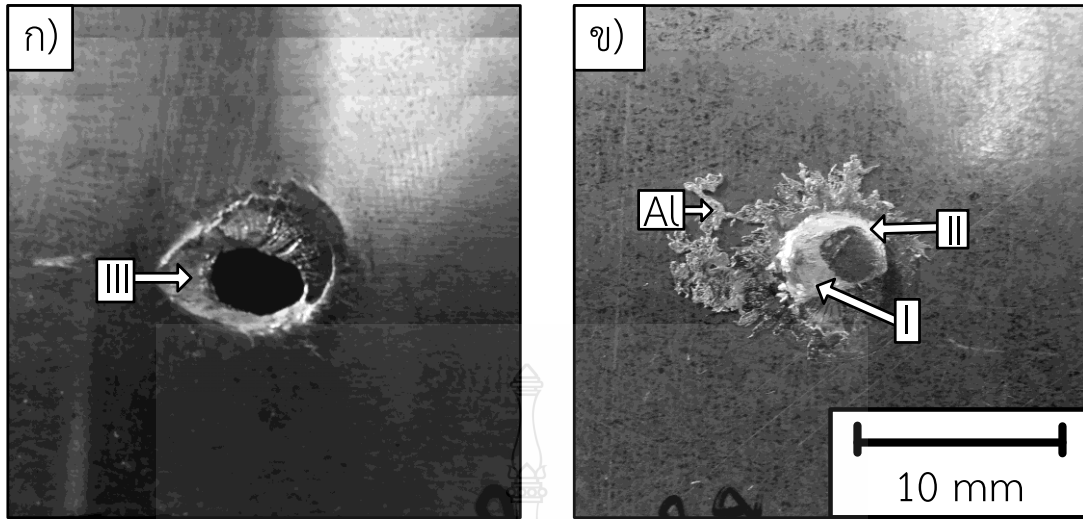
รูปที่ 4.13 แสดงรอยฉีกขาดของรอยต่อเกยที่วางแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบนและเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 kA รอยฉีกขาดที่แสดงพบว่าพื้นที่การเชื่อมดังแสดงด้วยลูกศร I และพื้นที่การเชื่อมที่เกิดการฉีกขาดแสดงด้วยลูกศร II มีลักษณะพื้นที่การฉีกขาดที่แตกต่างจากพื้นที่การฉีกขาดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 85 kA พื้นที่การฉีกขาดของรอยต่อนี้มีพื้นที่การฉีกขาดตำแหน่งที่ II มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อที่ 85 kA พื้นที่การเกาะยึดที่มากกว่าเป็นสาเหตุให้รอยต่อมีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่า



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความแข็งแรงแรงเฉือนดึง และการยืดตัวของรอยต่อเกยที่วางแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบน

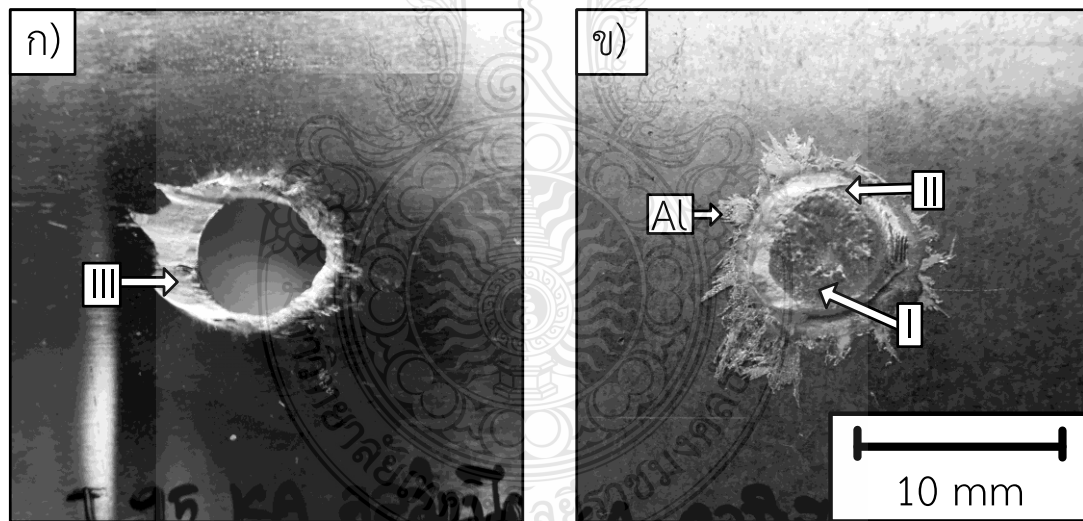


รูปที่ 4.12 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 85 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน: (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก



ทิศทางการดีง \longrightarrow \longleftarrow ทิศทางการดีง

รูปที่ 4.13 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเหนือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 90 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน: (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก

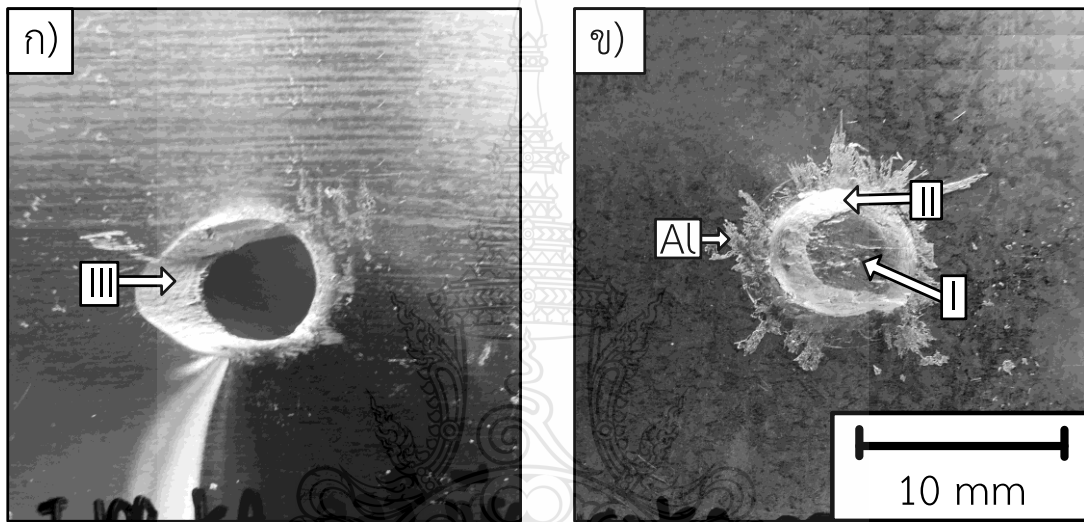


ทิศทางการดีง \longrightarrow \longleftarrow ทิศทางการดีง

รูปที่ 4.14 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเหนือนดึงที่เชื่อมด้วยกระแส 95 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน: (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก

รูปที่ 4.14 แสดงรอยฉีกขาดของชิ้นทดสอบแรงเหนือนดึงของรอยต่อเกยที่วางแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบนและเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA ปริมาณของอลูมิเนียมที่แตกกระจายออกรอบข้างแนวเชื่อมมีปริมาณที่น้อยลง ขณะที่พื้นที่รวมของการเชื่อม หรือพื้นที่รวมระหว่างพื้นที่การเชื่อม (พื้นที่ I) และพื้นที่เกิดการฉีก

ขาด (พื้นที่ II) มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่การฉีกขาดของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 kA พื้นที่การเชื่อมที่มากกว่านี้เป็นสาเหตุให้รอยต่อมีค่าความแข็งแรงมากกว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 kA นอกจากนี้เมื่อพิจารณาพื้นที่การฉีกขาดที่แสดงด้วยลูกศรหมายเลข III ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA กับรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 kA พบว่าพื้นที่นี้มีความกว้างมากกว่า และมีหลักฐานที่แสดงการยึดตัวมากกว่า ผลการทดลองนี้ยืนยันผลการทดลองว่ารอยต่อที่ได้มีค่าการยึดตัวของรอยต่อที่มีค่าสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.11 ในการทดลองในหัวข้อนี้การเชื่อมที่ กระแสไฟเชื่อม 95 kA แสดงค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ค่าความแข็งแรงเฉือนถึง 2085 N และการยึดตัวของรอยต่อเกยมีค่าประมาณ 2.76 มิลลิเมตร

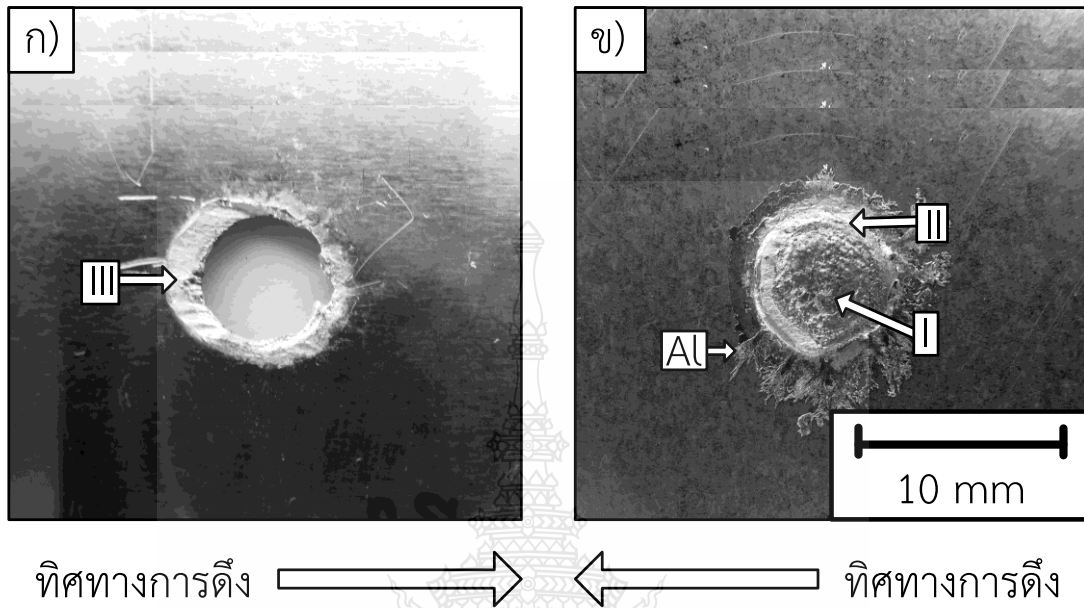


ทิศทางการดึง ← → ← → ทิศทางการดึง

รูปที่ 4.15 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดิ่งที่เชื่อมด้วยกระแส 100 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน: (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก

รูปที่ 4.15 แสดงรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดิ่งที่วางแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบนและทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 100 kA การตรวจสอบด้วยสายตาพบว่า ที่บริเวณรอยเชื่อมบนแผ่นเหล็กมีส่วนของอลูมิเนียมที่เกิดการกระจายตัวออกมาเนื่องจากความร้อนและแรงกดจากการเชื่อมด้านทานแบบจุด มีปริมาณการกระจายตัวเหมือนกับการเกิดรอบๆ รอยเชื่อมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พื้นที่ของรอยฉีกขาดของรอยต่อประกอบไปด้วยพื้นที่ผิวขรุขระที่เกิดจากการกัดด้วยอิเล็กโทรด (พื้นที่ I) และพื้นที่ที่เกิดการฉีกขาด (พื้นที่ II) ตรวจสอบพื้นที่ของการฉีกขาดพบว่าพื้นที่การฉีกขาดมีขนาดใกล้เคียงกับรอยต่อที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA นอกจากนี้เมื่อพิจารณารอยฉีกขาดด้านอลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ก) พบว่าการฉีกขาดของด้านอลูมิเนียมมีทิศทางขนานยาวไปตามทิศทางการดึงของชิ้นทดสอบและมีลักษณะเหมือนกับการเกิดในรอยต่อที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA รูปแบบการฉีกขาดและขนาดพื้นที่การฉีกขาดที่แสดงในรอยต่อที่

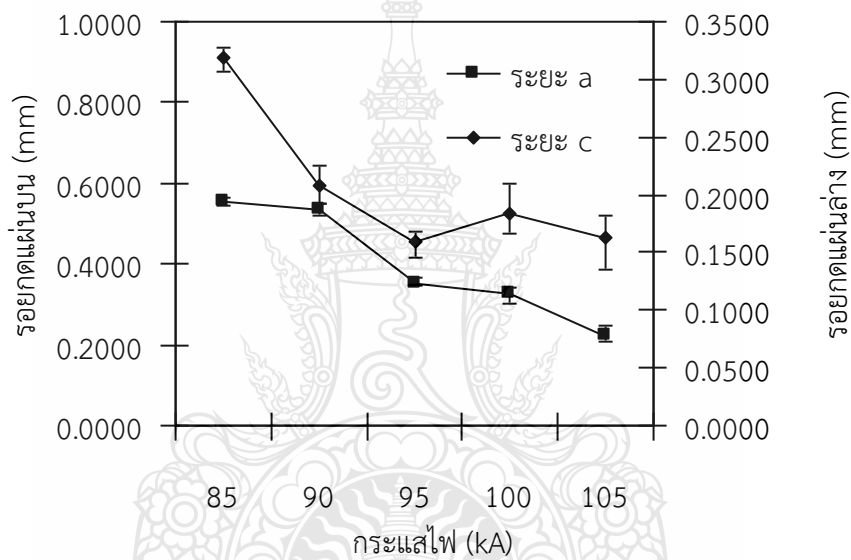
เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 100 kA ที่คล้ายกับรอยต่อที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA คาดว่าอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมทั้งสองมีค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.16 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดิ่งที่เชื่อมด้วยกระแส 105 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน: (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นเหล็ก

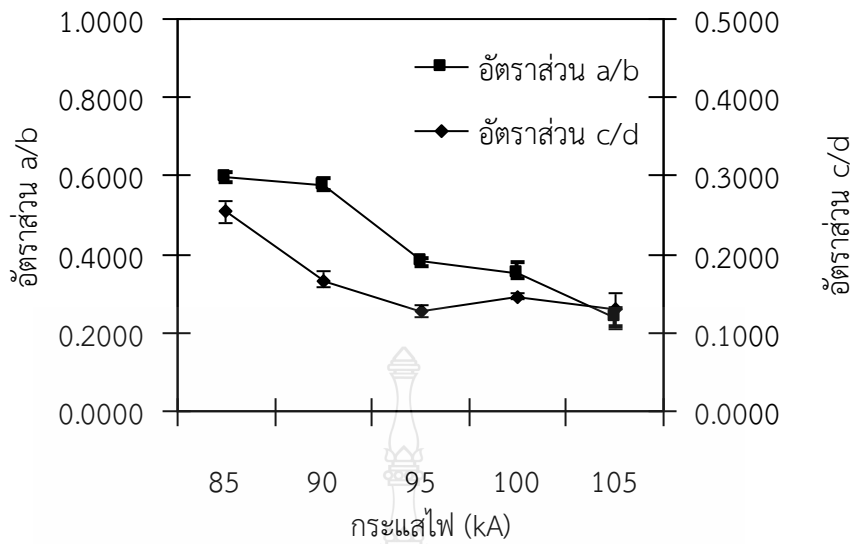
รูปที่ 4.16 แสดงรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดิ่งที่เชื่อมด้วยกระแส 105 kA และแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบน ซึ่งเป็นกระแสไฟเชื่อมที่สูงสุดในหัวข้อนี้ พิจารณารอยฉีกขาดด้านแผ่นเหล็กพบการกระจายตัวของอลูมิเนียมเนื่องจากแรงกดและความร้อนของการเชื่อมด้านทานแบบจุดรอบๆ รอยเชื่อมคล้ายกับการเกิดรอบๆ รอยต่อในรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมตั้งแต่ 85-100 kA อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอลูมิเนียมที่กระจายตัวรอบแนวเชื่อมมีลักษณะที่แตกต่างจากการเชื่อมที่กระแสที่ต่ำกว่า กล่าวคืออลูมิเนียมที่กระจายตัวรอบแนวเชื่อมมีลักษณะสีเข้มกว่าแนวเชื่อมที่ผ่านมา และอลูมิเนียมที่กระจายออกมา มีลักษณะที่ไม่เกิดการกระจายตัวออกเป็นเส้นตรง การเกิดลักษณะนี้คาดว่าเกิดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแนวเชื่อมเนื่องจากกระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มขึ้น [20] อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแนวเชื่อมในการทดลองครั้งนี้ไม่ได้ทำการตรวจวัดจึงไม่สามารถยืนยันผลการตรวจสอบนี้ได้ พิจารณาพื้นที่การเชื่อมพบว่าประกอบด้วยพื้นที่การเชื่อมที่ถูกกดด้วยอิเล็กโทรด (พื้นที่ I) และพื้นที่ที่เกิดการฉีกขาดรอบๆ แนวเชื่อม พื้นที่ที่การฉีกขาดมีพื้นที่ที่น้อยกว่าพื้นที่การฉีกขาดของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 100 kA รูปที่ 4.17 แสดงการวัดความลึกของรอยกดของปลายอิเล็กโทรดการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่กดลงบนผิวของรอยต่อโดยการวัดด้านบนและล่างของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยในกรณีของการวัดในหัวข้อนี้ ระยะ a คือ ความลึกของรอยกดบนแผ่นอลูมิเนียม และระยะ b คือ ความลึกของรอยกดบนแผ่นเหล็ก ผลการการตรวจสอบความลึกพบว่า ความลึกของรอยกดมีแนวโน้มที่มีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น การลดลงของความลึกของแนวเชื่อมนี้มีสาเหตุในการเกิดคล้ายกับการเกิดในรอยต่อเกยที่วางแผ่นเหล็กไว้

ด้านบนของการเชื่อมดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1 กล่าวคือ ที่กระแสไฟเชื่อมที่มีค่าต่ำส่งผลทำให้ลูมิเนียมที่เกิดการหลอมละลายแตกกระจายออกจากบริเวณแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.12-4.16 นอกจากนั้นจากการตรวจสอบความลึกของรอยกตบนรอยต่อในรูปที่ 4.17 และ 4.8 พบว่า หากความลึกของรอยกตมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เช่น ในกรณีของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมเท่ากับ 95 kA นั้น รอยต่อที่ได้สามารถแสดงค่าความแข็งแรงได้สูงกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารอยกตที่ได้และเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS Z31339 [22] ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แล้วพบว่า รอยต่อที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบนดังแสดงผลการทดลองในหัวข้อนี้ให้ผลเสียต่อสมบัติของรอยต่อ กล่าวคือ ค่าความลึกของรอยกตลงบนผิวของรอยต่อส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 0.3 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าความลึกของรอยกตบนรอยต่อในระดับ D ซึ่งเป็นเกณฑ์ต่ำสุดที่ใช้ในการตัดสิน และหากต้องการนำเอารอยต่อไปใช้งานต้องมีการตกแต่งก่อนเสมอ



รูปที่ 4.17 ความลึกของรอยกตอเล็กโทรดของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนที่กระแสต่างๆ

รูปที่ 4.18 แสดงอัตราส่วนความลึกของรอยกตบนผิวรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อที่กระแสไฟต่างๆ ดังแสดงรายละเอียดการวัดดังแสดงในรูปที่ 4.7 ผลการตรวจสอบพบว่า อัตราส่วนความลึกของรอยกตต่อความหนาของวัสดุมีแนวโน้มที่มีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ผลการตรวจสอบที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS Z31339 [22] ที่กำหนดไว้ว่า อัตราส่วน a/b และ c/d เพื่อตอบคำถามว่ารอยต่อสามารถนำไปใช้งานจริงและอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้หรือไม่ ผลการตรวจสอบพบว่าอัตราส่วนความลึกของรอยกตต่อความหนาของรอยต่อที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอัตราส่วน a/b และ c/d ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS Z31339 [22] ที่กำหนดไว้ว่า อัตราส่วน a/b และ c/d ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.3 แล้ว พบว่าอัตราส่วนอัตราส่วนความลึกของรอยกตต่อความหนาของรอยต่อแยกส่วนมากมีค่าเกิน 0.3 ซึ่งมีความไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 4.18 อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวรอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่กระแสไฟต่างๆ

การเปรียบเทียบสมบัติของรอยต่อเกย 2 แบบ คือ รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กวางเกยบนแผ่นอลูมิเนียม (ในที่นี้กำหนดชื่อเรียกเป็น “รอยต่อเกยแบบที่ 1”) และรอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมวางเกยบนแผ่นเหล็ก (ในที่นี้กำหนดชื่อเรียกเป็น “รอยต่อเกยแบบที่ 2”) มีผลการทดลองที่น่าศึกษาต่อไปนี้

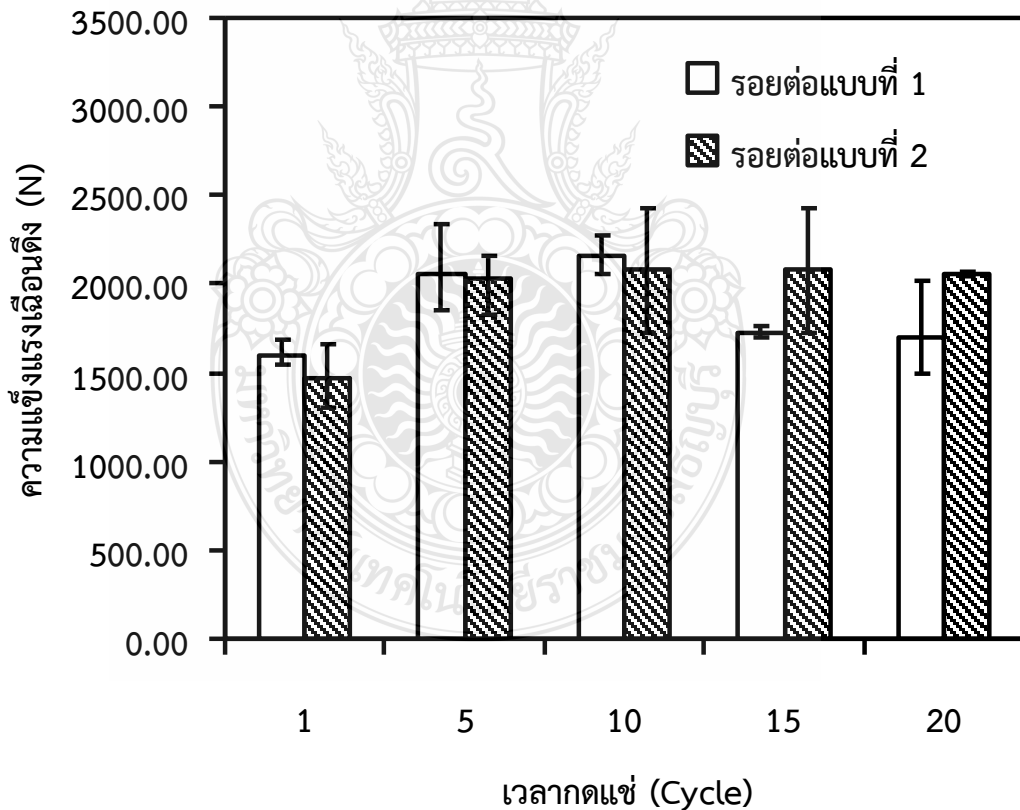
- รอยต่อเกยแบบที่ 1 มีความแข็งแรงสูงกว่ารอยต่อเกยแบบที่ 2 ประมาณ 5% และมีการยึดตัวของรอยต่อเกยสูงกว่า 34%
- กระแสไฟเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อเกยแบบที่ 2 มากกว่ารอยต่อเกยแบบที่ 1
- กระแสไฟเชื่อมส่งผลต่อความลึก และอัตราส่วนความลึกของรอยกดต่อความหนาแผ่นงาน ของรอยต่อเกยแบบที่ 2 มากกว่ารอยต่อเกยแบบที่ 1
- การเชื่อมรอยต่อเกยแบบที่ 2 ด้วยกระแสต่างๆ ทำให้อายุการใช้งานต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่สามารถนำไปใช้งานได้

4.3 อิทธิพลของเวลากดแช่ต่อความแข็งแรงเนื่องดึงของรอยต่อ

ตัวแปรการเชื่อมด้านทานแบบจุดตัวที่ 2 ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ คือ เวลาในการกดแช่อิเล็กโทรด ในตำแหน่งที่อิเล็กโทรดตกลงไปบนผิวของรอยต่อเกย ตัวแปรการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ประกอบด้วย

- กระแสไฟเชื่อม 95 kA ซึ่งเป็นกระแสไฟเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดึงสูงสุดในการเชื่อมรอยต่อเกยในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ที่ผ่านมา
- เวลาในการเชื่อมซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำการศึกษาในหัวข้อนี้กำหนดให้มีการศึกษาที่ 1-20 cycles
- แรงกด 0.1 MPa

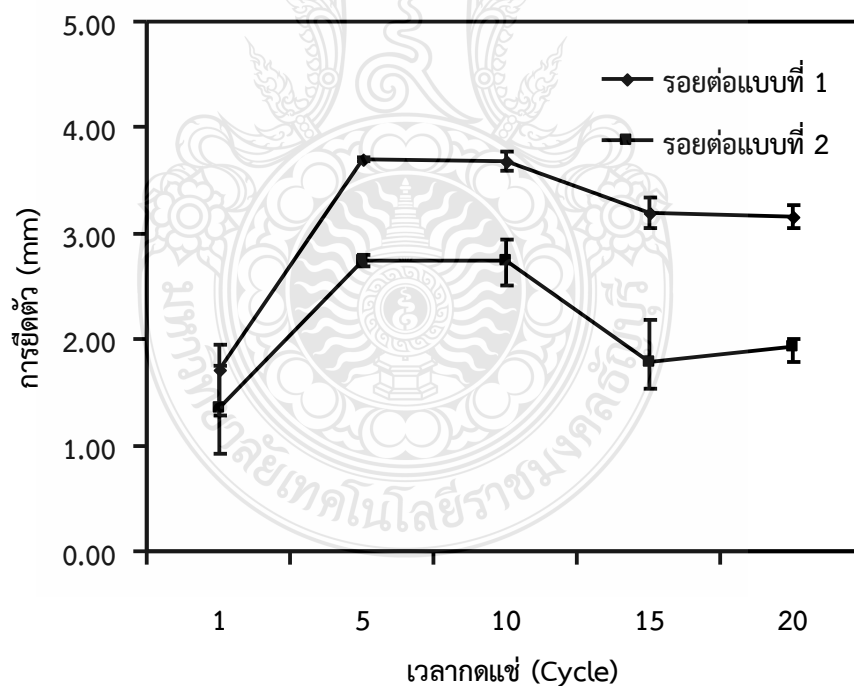
ในการเชื่อมเพื่อศึกษาหาค่าเวลาในการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดึงสูงสุดในครั้งนี้ เป็นการเชื่อมรอยต่อทั้งสองแบบกล่าวคือ “รอยต่อเกยแบบที่ 1” ที่หมายถึงความถึง รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นเหล็กวางเกยบนแผ่นอลูมิเนียม และ “รอยต่อเกยแบบที่ 2” ที่หมายถึงความถึง รอยต่อเกยที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมวางเกยบนแผ่นเหล็ก ผลการทดสอบรอยต่อที่ทำการเชื่อมด้วยเวลาในการเชื่อมต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 ดังนี้



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความแข็งแรงเนื่องดึง การยึดตัวของรอยต่อเกยที่วางแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบน และเวลากดแช่

รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเฉือนดึง และเวลากดแช่ 1-20 cycles ของ รอยต่อเกยแบบที่ 1 และรอยต่อเกยแบบที่ 2 ผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อเกยแบบที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้น 28% และ 32% เมื่อเปรียบเทียบกับเวลากดแช่ 1 cycles สำหรับรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 5 และ 10 cycles ตามลำดับ และรอยต่อเกยแบบที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น 27% 30% เมื่อเปรียบเทียบกับเวลากดแช่ 1 cycles สำหรับรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 5 และ 10 cycles ตามลำดับ และที่ค่า 10 cycles คือ ค่าเวลากดแช่ที่ให้ค่าความแข็งแรงเฉือนดึงสูงที่สุดในการทดลองเชื่อมด้วยเวลากดแช่ต่างๆ ในหัวข้อนี้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงเฉือนดึงของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่อิเล็กโทรด 1-10 cycles พบว่าค่าความแข็งแรงเฉือนดึงของรอยต่อเกยแบบที่ 1 มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงเฉือนดึงรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังที่ได้เกิดขึ้นมาแล้วในการเปรียบเทียบรอยต่อเกยทั้งสองแบบในหัวข้อที่ 4.2

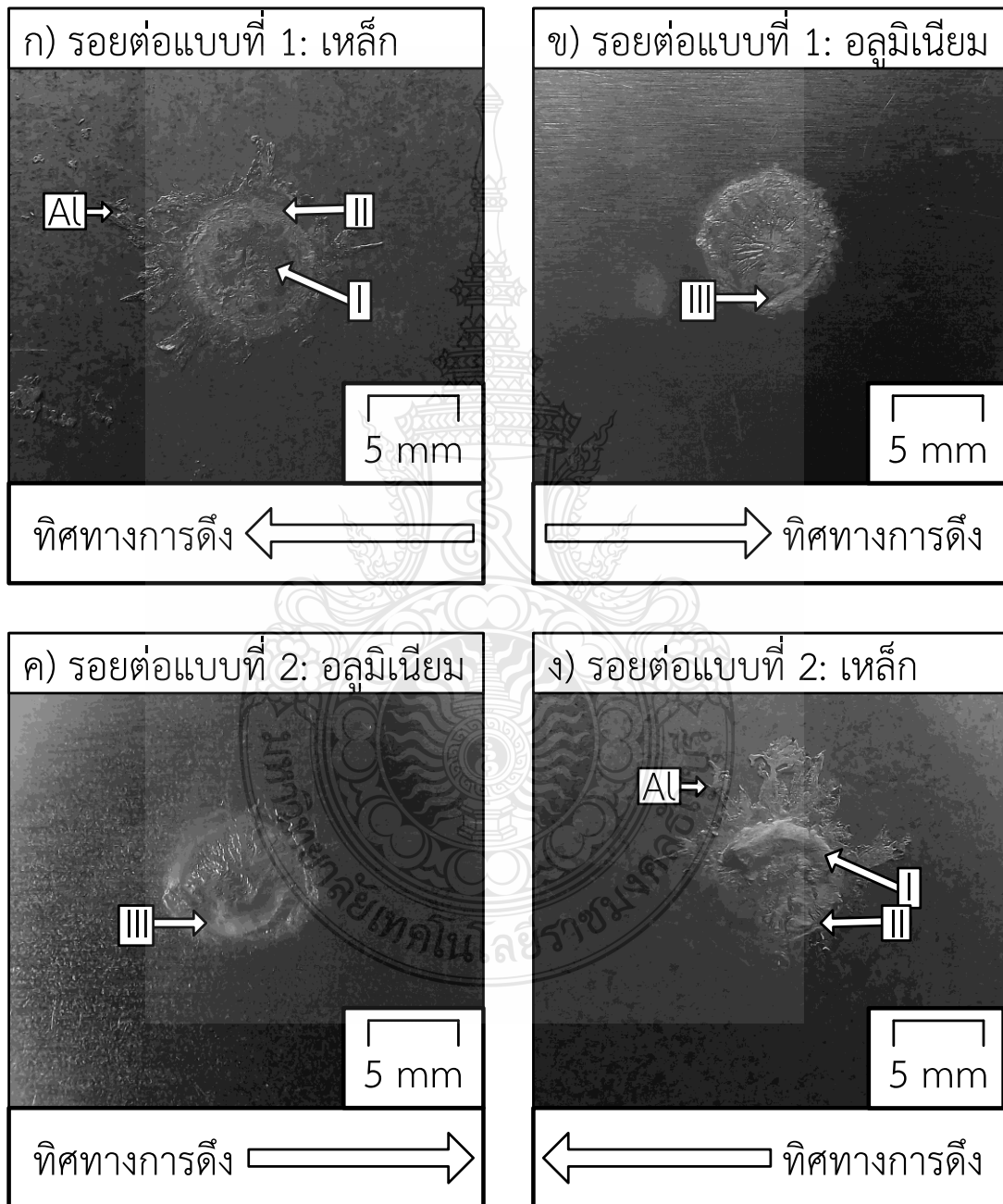
เมื่อเวลาในการเชื่อมเวลากดแช่อิเล็กโทรดมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 10-20 cycles ค่าความแข็งแรงเฉือนดึงของรอยต่อเกยแบบที่ 1 มีแนวโน้มที่มีค่าลดลงเป็น 29 และ 30% เมื่อเปรียบเทียบกับเวลากดแช่ 10 cycles สำหรับเวลากดแช่ 15 และ 20 cycles ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อเกยที่ 2 มีการลดลงเพียงเล็กน้อยหรืออยู่ในระดับเกือบไม่มีการลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเวลากดแช่ 10 cycles สำหรับเวลากดแช่ 15 และ 20 cycles มีค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงเฉือนดึงที่ประมาณเพิ่ม 1% และลดลง 1% ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดตัว รูปแบบรอยต่อ และเวลากดแช่ต่างๆ

รูปที่ 4.20 แสดงผลการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างการยึดตัว และเวลากดแช่ 1-20 cycles ของ รอยต่อเกยแบบที่ 1 และรอยต่อเกยแบบที่ 2 พบว่า เมื่อเวลาในการกดแช่เพิ่มขึ้นจาก 1-5 cycles การยึด

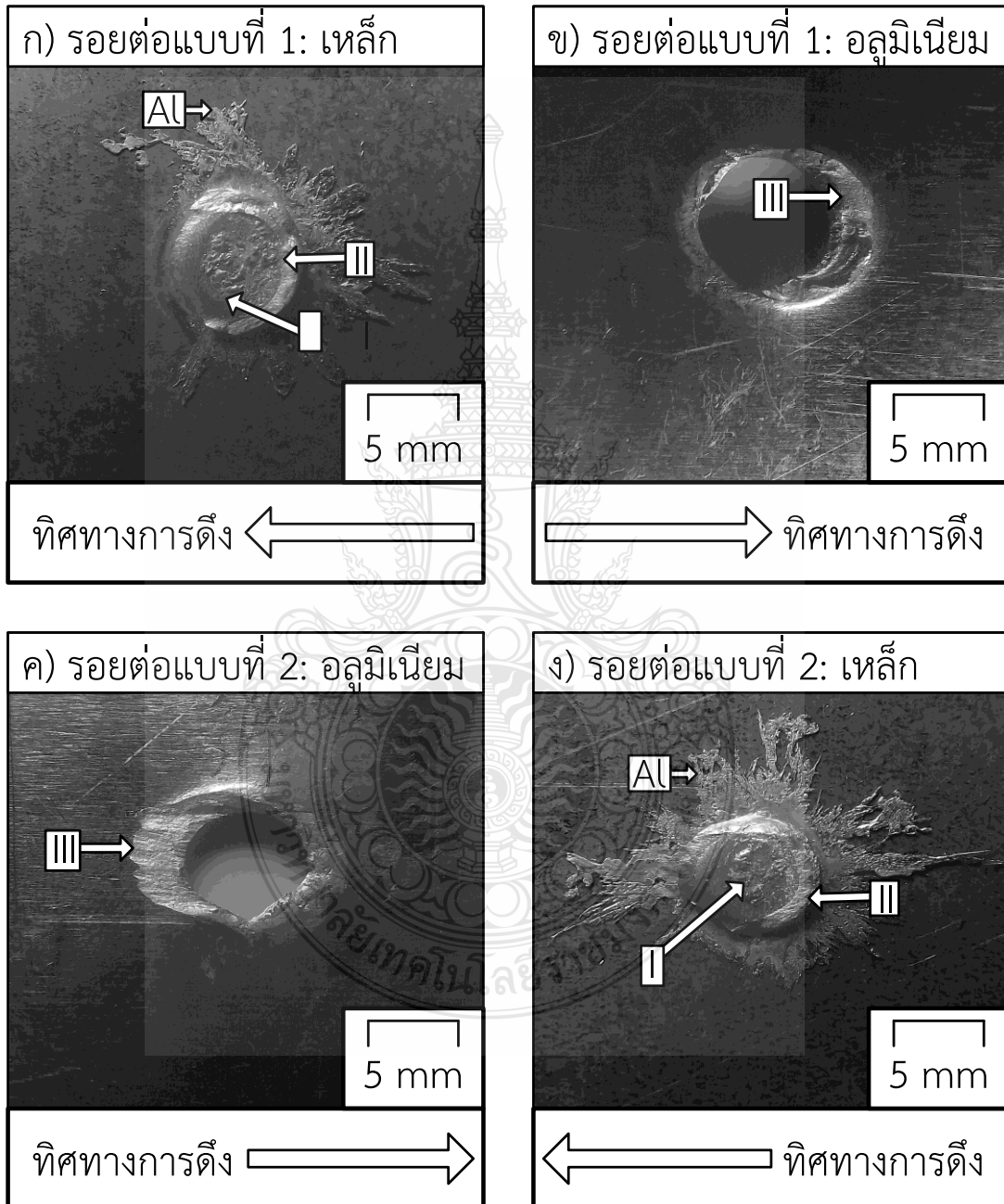
ตัวมีค่าเพิ่มขึ้น 112% และ 100% สำหรับรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และเมื่อเวลาในการกดแช่เพิ่มขึ้นเท่ากับ เวลากดแช่ 10 cycles ที่แสดงค่าความแข็งแรงเหนือนิ่งสูงสุด คือ แล้วพบว่า การยึดตัวมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 1% เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการกดแช่ที่ 5 cycles อย่างไรก็ตามเวลาการกดแช่ที่มีค่าสูงกว่า 10 cycles คือ 15 และ 20 cycles พบว่าค่าการยึดตัวของรอยต่อมีค่าลดลงเท่ากับ เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการกดแช่ 10 cycles



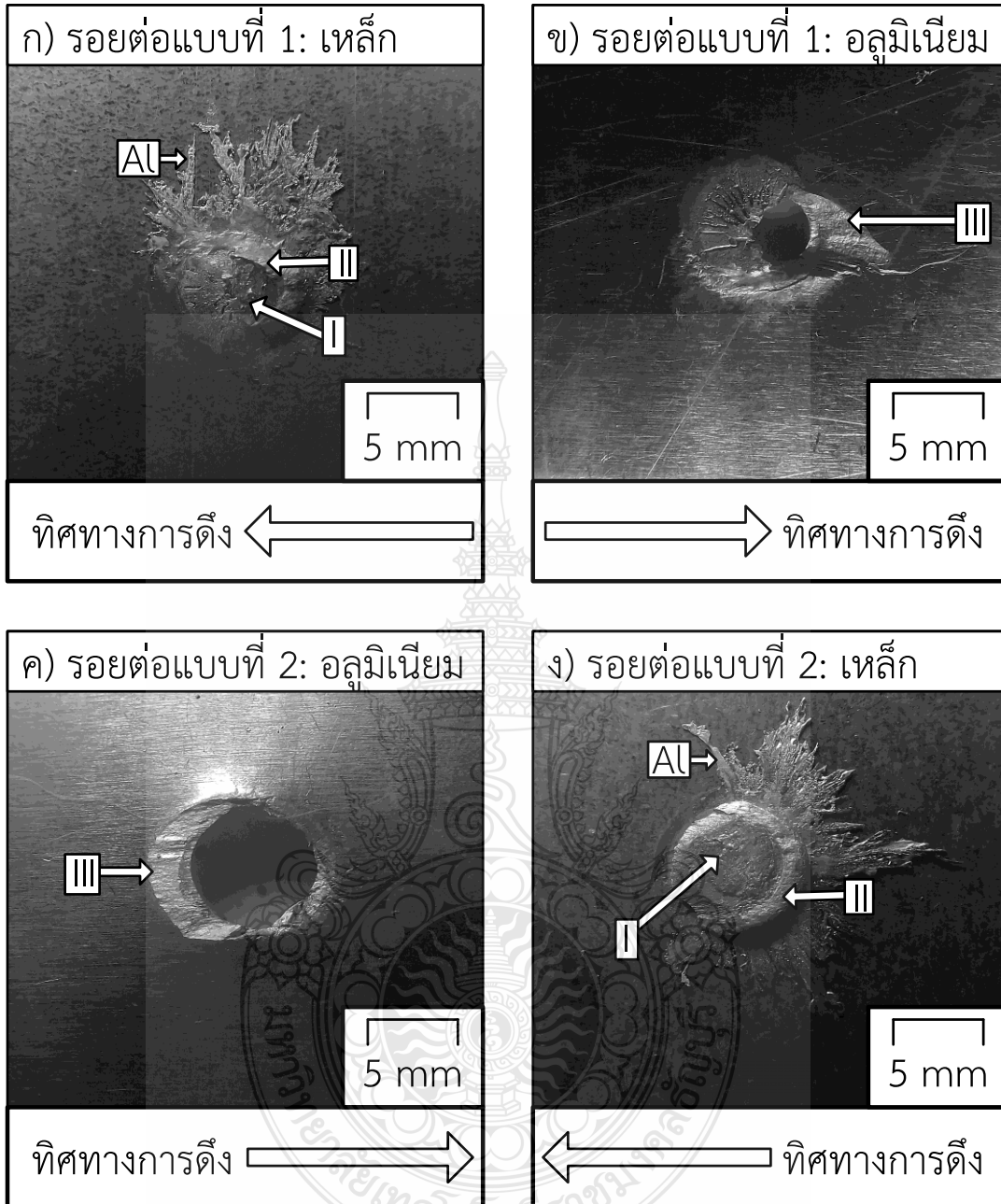
รูปที่ 4.21 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเหนือนิ่งของรอยต่อแบบ 2 แบบ ที่เชื่อมด้วยเวลาการกดแช่ 1 cycle

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ของรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลาทดแช่ต่างๆ

เวลาทดแช่ (cycles)	1	5	10	15	20
การฉีกขาดผ่านอินเทอร์เฟส	√	×	×	×	×
การฉีกขาดผ่านแนวเชื่อม	×	√	√	√	√



รูปที่ 4.22 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเค้นดึงของรอยต่อเกย 2 แบบ ที่เชื่อมด้วยเวลาทดแช่ 5 cycle



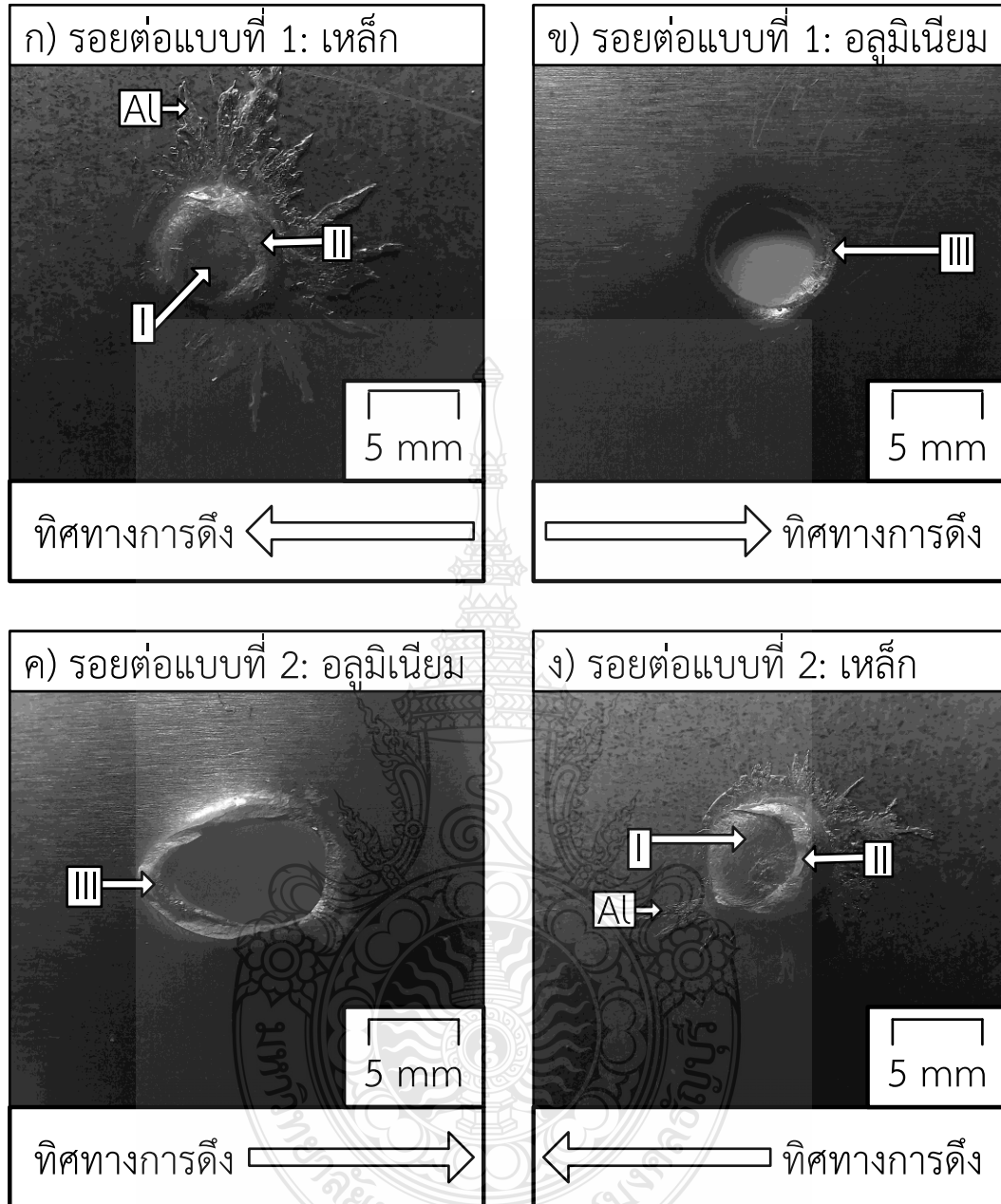
รูปที่ 4.23 รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเค้นดึงของรอยต่อเกย 2 แบบ ที่เชื่อมด้วยเวลาทดแ่ 15 cycle

รูปที่ 4.21 แสดงรูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเค้นดึงที่เชื่อมด้วยเวลาทดแ่ 1 Cycle ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่ารอยต่อแบบที่ 1 มีการพังทลายหรือการฉีกขาดคล้ายกับการพังทลายของรอยต่อเกยสองแบบที่เชื่อมด้วยกระแสต่าง ๆ ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ที่เวลาทดแ่ต่ำ คือ 1 Cycle การกระจายของอลูมิเนียมรอบๆ รอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ก) และ (ง) อลูมิเนียมเกิดการกระจายตัวออกด้านข้างรอยเชื่อมดังแสดงด้วยลูกศร Al ในรูปที่ 4.21 (ก) แต่เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าการ

กระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อเกยแบบที่ 1 มีรูปร่างของการกระจายตัวที่สมมาตรออกทุกด้านมากกว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังแสดงด้วยลูกศร Al ในรูปที่ 4.21 (ก) และ (ง) การกระจายตัวของอลูมิเนียมรอบๆ รอยเชื่อมคาคว่าเป็นสาเหตุทำให้การเกิดการยึดของวัสดุทั้งสองไม่แข็งแรงและเป็นสาเหตุของการพังทลายที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อเนื่องจากไม่สามารถมองเห็นร่องรอยของการฉีกขาดได้ดังแสดงด้วยลูกศรที่ I และ II ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ก) และดังแสดงด้วยลูกศรที่ III ในรูปที่ 4.21 (ข) ซึ่งผลการตรวจสอบนี้แตกต่างจากการฉีกขาดของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.21 (ค) และ (ง) อย่างไรก็ตามการฉีกขาดที่เกิดขึ้นยังเป็นการฉีกขาดที่บริเวณอินเทอร์เฟซคล้ายดังเกิดในรอยต่อเกยแบบที่ 1

รูปที่ 4.22 แสดงแสดงรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 5 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่าอลูมิเนียมมีการกระจายตัวเนื่องจากความร้อนและการกด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างรอยต่อเกยทั้งสองแบบพบอลูมิเนียมที่กระจายตัวรอบๆ แนวเชื่อมของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังแสดงด้วยลูกศร Al ในรูปที่ 4.22 (ก) มีการกระจายตัวน้อยกว่าการเกิดกระจายตัวของอลูมิเนียมรอบๆ แนวเชื่อมของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังแสดงด้วยลูกศร Al ในรูปที่ 4.22 (ง) ซึ่งคาดว่าอลูมิเนียมที่เกิดการกระจายตัวมากกว่าส่งผลทำให้เกิดการเชื่อมยึดของรอยต่อเกยลดลง ทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนดึงน้อยลง พื้นที่ของการกดเชื่อมจากอิเล็กโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังแสดงด้วยลูกศร I ในรูปที่ 4.22 (ก) มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ของการกดเชื่อมของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังแสดงด้วยลูกศร I ในรูปที่ 4.22 (ง) และพื้นที่ของการกดเชื่อมของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 1 Cycle ดังแสดงด้วยลูกศร I ในรูปที่ 4.21 (ก) และ (ง) ตำแหน่งที่เกิดการฉีกขาดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และ 2 ดังแสดงด้วยลูกศร II ในรูปที่ 4.22 (ก) และ (ง) สามารถตรวจสอบพบได้ว่าการฉีกขาดที่โลหะหลัก คือ แผ่นอลูมิเนียม ซึ่งเป็นลักษณะที่มีความแตกต่างจากการฉีกขาดที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นการฉีกขาดของรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 1 Cycle ขนาดของรอยฉีกขาดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ดังแสดงด้วยลูกศร II ในรูปที่ 4.22 (ก) มีขนาดใหญ่กว่ารอยฉีกขาดของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังแสดงด้วยลูกศร II ในรูปที่ 4.22 (ง) ซึ่งเป็นสาเหตุแสดงให้เห็นถึงสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงเฉือนดึงมีค่าสูงกว่า พื้นที่การยึดตัวของอลูมิเนียมของรอยต่อทั้งสองแบบดังแสดงด้วยลูกศรที่ III ในรูปที่ 4.22 (ข) และ (ค) แสดงการยึดตัวของรอยต่อที่เกิดการฉีกขาด พบว่ารอยต่อที่เป็นแนวการฉีกขาดของรอยต่อแบบที่ 2 มีค่ามากกว่ารอยต่อเกยแบบที่ 1 แต่จากการวัดค่าการยึดตัวพบรอยต่อเกยมีค่าการยึดตัวของรอยต่อมีค่ามากกว่า

รอยฉีกขาดของชิ้นทดสอบความแข็งแรงสูงสุดในการทดลองทำการเชื่อมด้านทานแบบจุดด้วยเวลากดแช่ต่างๆ ในหัวข้อนี้ คือ รอยต่อเกยแบบที่ 1 และ 2 ที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 10 Cycles ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.14 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 5 Cycles พบความแตกต่างที่ทำให้รอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 10 Cycles มีความแข็งแรงมากกว่า คือ อลูมิเนียมที่กระจายรอบๆ รอยเชื่อมที่เกิดจากความร้อนและแรงกดอิเล็กโทรดนั้นมีปริมาณการกระจายตัวออกด้านข้างรอยเชื่อมในปริมาณที่น้อยกว่า การกระจายออกไปด้านข้างที่น้อยกว่าแสดงให้เห็นว่าอลูมิเนียมส่วนใหญ่เกิดการยึดเหนี่ยวเข้ากับเนื้อโลหะเชื่อมมากกว่า นอกจากนั้นตำแหน่งการฉีกขาดรอบๆ แนวเชื่อมของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 10 Cycles ดังแสดงด้วยลูกศรที่ II ในรูปที่ 4.4 และ 4.14 มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่ารอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 5 Cycles ดังแสดงในรูปที่ 4.22



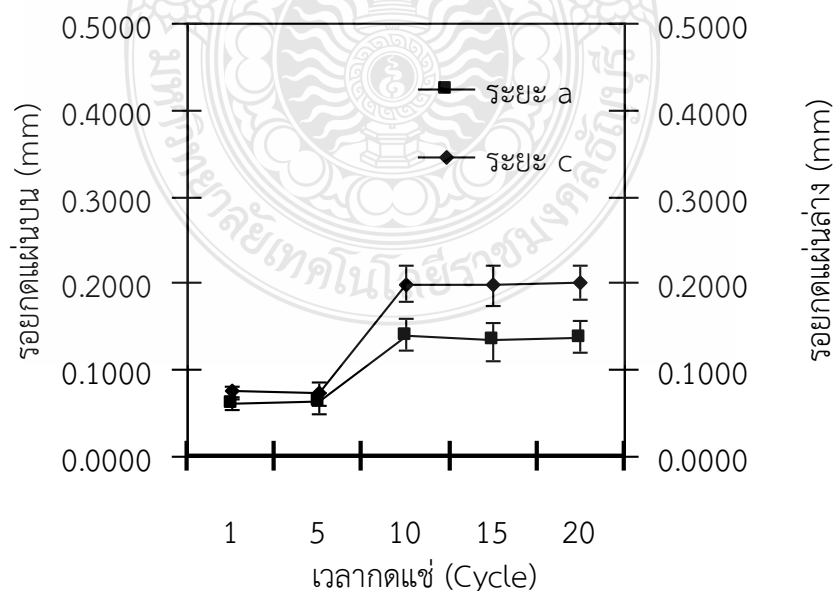
รูปที่ 4.24 รูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงของรอยต่อเกย 2 แบบ ที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 20 cycle

รูปที่ 4.23 แสดงรูปแบบการพังทลายของชั้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 15 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อแบบที่ 1 ดังแสดงด้วยลูกศร Al ในรูปที่ 4.23 (ก) มีปริมาณการกระจายตัวค่อนข้างมากกว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 10 Cycle การกระจายตัวสูงของอลูมิเนียมทำให้อลูมิเนียมเกิดการเกาะยึดกับโลหะเชื่อมน้อยลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาพื้นที่การเชื่อมที่ถูกกัดด้วยอิเล็กโทรดดังแสดงด้วยลูกศร I และพื้นที่การฉีกขาดดังแสดงด้วยลูกศร II พบว่ามีขนาดเล็กกว่าทำให้รอยต่อนี้แสดงค่าความแข็งแรงเฉือนดึงต่ำกว่า เมื่อ

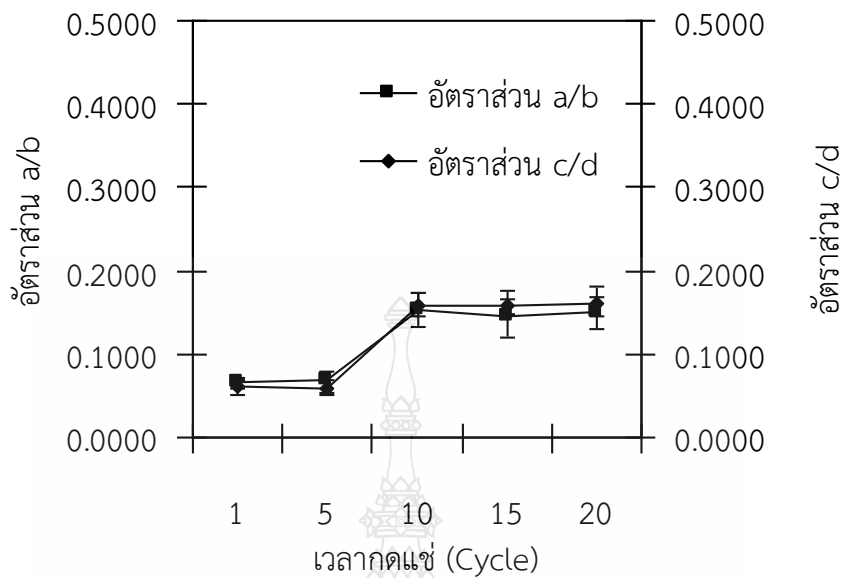
เปรียบเทียบกับผลการกระจายตัวของอลูมิเนียมของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ง) พบว่าอลูมิเนียมมีการกระจายตัวน้อยกว่า (ลูกศร AI) นอกจากนั้นรอยกดอิเล็กโทรด (ลูกศร I) และรอยฉีกขาด (ลูกศร II) มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่ารอยต่อเกยแบบที่ 1 และเป็นสาเหตุทำให้รอยต่อเกยแบบที่ 2 แสดงค่าความแข็งแรงเฉือนดิ่งสูงกว่า รอยฉีกขาดด้านอลูมิเนียมของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และ 2 ดังแสดงด้วยลูกศรที่ III ในรูปที่ 4.23 (ข) และ (ค) แสดงผลการตรวจสอบที่แสดงให้เห็นว่ารอยต่อเกยแบบที่ 2 มีค่าความแข็งแรงสูงกว่ารอยต่อเกยแบบที่ 1 เนื่องจากพื้นที่การฉีกขาดของรอยต่อมีค่ามากกว่า ผลการตรวจสอบการฉีกขาดที่ได้สามารถอธิบายสาเหตุที่ทำให้รอยต่อเกยมีความแข็งแรงเฉือนดิ่งดังแสดงในรูปที่ 4.19 และการยึดตัวของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.20

รูปที่ 4.24 แสดงรูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดิ่งที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 20 Cycles ของรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 ที่เป็นเวลากดแช่สูงสุดในการทดลองในหัวข้อนี้ พบว่าการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และ 2 ดังแสดงด้วยลูกศร AI ในรูปที่ 4.24 (ก) และ (ง) มีปริมาณการกระจายตัวสูงกว่ากว่ารอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 15 Cycles พื้นที่การกดเชื่อมของอิเล็กโทรดดังแสดงด้วยลูกศร I และรอยฉีกขาดที่แสดงด้วยลูกศร II ในรูปที่ 4.24 (ก) และ (ง) มีขนาดพื้นที่ใกล้เคียงกับรอยต่อที่เวลากดแช่ 15 Cycles นอกจากนั้นรอยฉีกขาดของแผ่นอลูมิเนียมดังแสดงด้วยลูกศร III ในรูปที่ 4.24 (ก) และ (ง) มีรูปร่างและขนาดคล้ายกับรอยฉีกขาดที่เกิดขึ้นในรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 15 Cycles ขนาดและรูปร่างของรอยฉีกขาดที่คล้ายกันนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้รอยต่อเกยที่ได้แสดงค่าใกล้เคียงกับความแข็งแรงเฉือนดิ่งของรอยต่อที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 15 Cycles

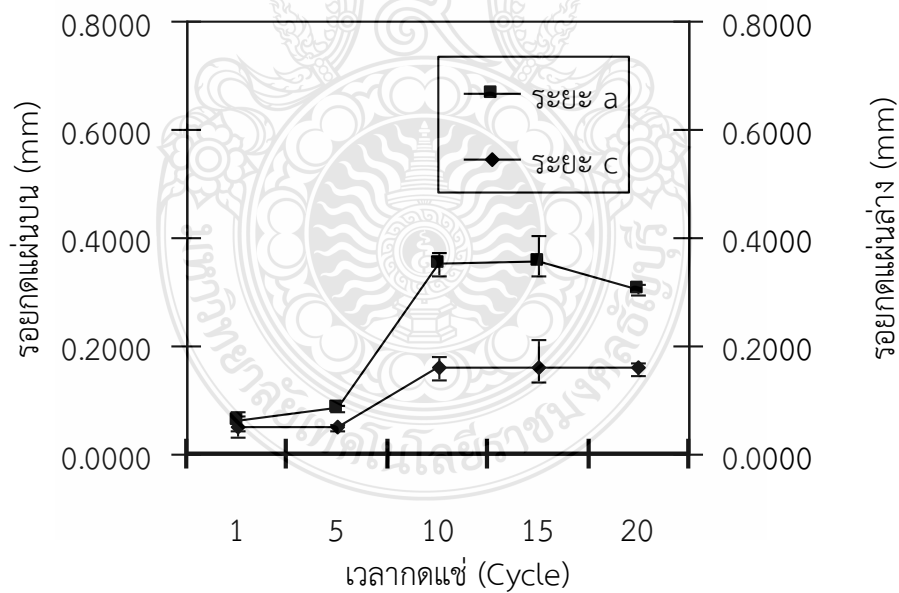
การตรวจสอบรูปร่างของรอยต่อที่ได้จากการเชื่อมด้านทานแบบจุดตามมาตรฐาน JIS Z31339 [2] เป็นสิ่งสำคัญในการนำชิ้นงานไปใช้งานอุตสาหกรรม เนื่องจากรูปร่างของรอยต่อที่เป็นไปตามข้อกำหนดมีผลทำให้การประยุกต์ใช้งานเกิดประโยชน์สูงสุดได้ ผลการตรวจสอบรูปร่างของรอยต่อเกยในตำแหน่งตรวจสอบดังแสดงในรูปที่ 4.7 ได้ผลการตรวจสอบขนาดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.25 ความลึกของรอยกดอิเล็กโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ที่เวลากดแช่ต่างๆ



รูปที่ 4.26 อัตราส่วนความลึกของรอยกดบนผิวรอยต่อเกยแบบที่ 1 ต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่เวลาทดสอบต่างๆ

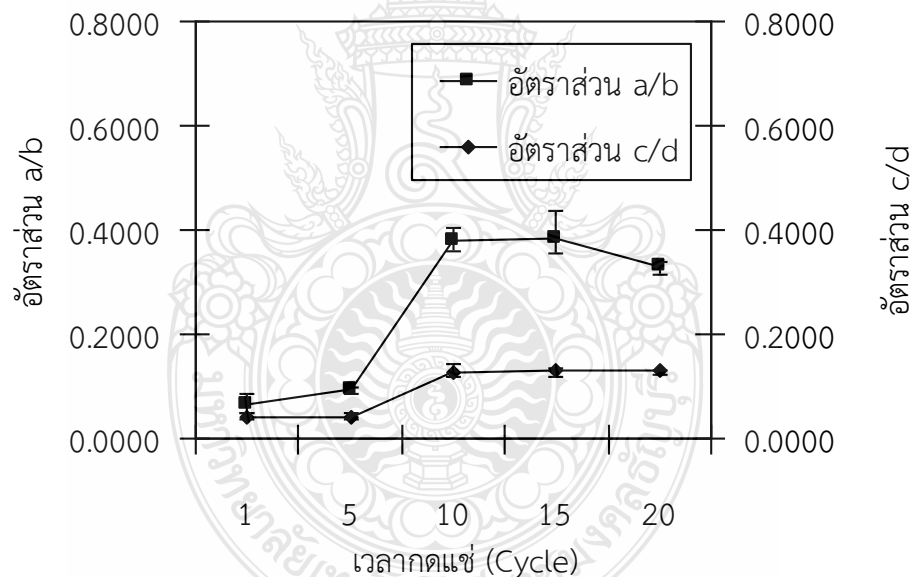


รูปที่ 4.27 ความลึกของรอยกดอิลเลกโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ที่เวลาทดสอบต่างๆ

รูปที่ 4.25 แสดงผลการตรวจสอบความลึกของรอยกดอิลเลกโทรดบนผิวทั้งสองด้านของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ที่เวลาทดสอบต่างๆ พบว่าความลึกของรอยกดอิลเลกโทรดลงบนผิวของรอยต่อทั้งด้านบน (แผ่นเหล็ก) และด้านล่าง (แผ่นอลูมิเนียม) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น เวลาทดสอบที่น้อยทำ

ให้อลูมิเนียมมีเวลาน้อยในการรวมเข้ากับเนื้อโลหะเชื่อมและส่งผลทำให้รอยต่อมีพื้นที่การเชื่อมยึดระหว่างโลหะน้อยและส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนดึงของรอยต่อมีค่าต่ำกว่า ขณะเดียวกันเวลาทดสอบที่เพิ่มขึ้นทำให้อลูมิเนียมสามารถเชื่อมยึดเข้ากับโลหะเชื่อมได้เพิ่มสูงขึ้นและส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงเฉือนดึงของรอยต่อแบบที่ 1 ค่าระยะความลึกรอยกัดของอิเล็กโทรดบนผิวรอยต่อแบบที่ 1 นี้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.200 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกให้ทราบว่ารอยต่อมีค่าระดับคุณภาพของรอยเชื่อมด้านทานแบบจุดในระดับ C ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ค่าระยะความลึกรอยกัดของอิเล็กโทรดบนผิวของรอยต่อแบบที่ 1 ถูกนำมาหาค่าความสัมพันธ์กับความหนาของแผ่นรอยต่อและได้ผลการตรวจสอบดังแสดงในรูปที่ 4.26 โดยผลการตรวจสอบมีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น การเกิดแนวโน้มลักษณะนี้เนื่องจากเวลาทดสอบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นส่งผลโดยตรงต่อการเกิดความลึก ระยะเวลาที่อิเล็กโทรดเกิดการสัมผัสกับผิวของรอยต่อเพิ่มขึ้น ทำให้โลหะมีเวลาในการเกิดกระบวนการเชื่อมยึดการเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยกัดต่อความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อแบบที่ 1 ทุกค่ามีค่าต่ำกว่า 0.2 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้สำหรับการเชื่อมด้านทานแบบจุดโลหะที่มีความหนาไม่เกิน 1.3 มิลลิเมตรที่ต้องมีค่าอัตราส่วนนี้อยู่ที่ค่าต่ำกว่า 0.3 [22]



รูปที่ 4.28 อัตราส่วนความลึกของรอยกัดบนผิวรอยต่อแบบที่ 2 ต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อที่เวลาทดสอบต่างๆ

รูปที่ 4.27 แสดงผลการตรวจสอบความลึกของรอยกัดอิเล็กโทรดบนผิวรอยต่อด้านบน (อลูมิเนียม) และผิวรอยต่อด้านล่าง (เหล็ก) ของรอยต่อแบบที่ 2 ที่เชื่อมที่เวลาทดสอบต่างๆ ผลการตรวจสอบพบว่าเวลาในการทดสอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความลึกของรอยกัดอิเล็กโทรดบนผิวรอยต่อแบบที่ 2 เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าความลึกของรอยกัดอิเล็กโทรดบนผิวด้านบน (อลูมิเนียม) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มเป็น 10-20 Cycles ผลการตรวจสอบที่ได้

นี้เป็นข้อยืนยันผลการตรวจสอบในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ได้ว่า การเชื่อมรอยต่อเกลของวัสดุต่างชนิด คือ อลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี หากกำหนดให้อลูมิเนียมไว้ด้านบนของรอยต่อเกล (รอยต่อเกลแบบที่ 2) ส่งผลทำให้ผิวของอลูมิเนียมถูกกดลงไปสู่ด้านล่างและเกิดการเสียหายได้ ความลึกของรอยกดอเล็กโทรด ในรูปที่ 4.28 ได้แสดงข้อมูลเพิ่มเติมที่น่าสนใจ คือ รอยต่อเกลที่เชื่อมด้วยเวลากดแช่ 10-15 Cycles นั้นมีค่าระดับคุณภาพต่ำกว่าระดับ C เนื่องจากความลึกของรอยกดเหล่านี้มีค่ามากกว่า 0.3 มิลลิเมตร [22] นอกจากนี้เมื่อนำเอาความลึกของรอยกดที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความหนาของแผ่นโลหะแล้วสามารถแสดงผลการตรวจสอบได้ดังแสดงในรูปที่ 4.28 อัตราส่วนของระยะรอยกดและความหนาของแผ่นโลหะ รอยต่อด้านบน (a/b) และด้านล่าง (c/d) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลากดแช่เพิ่มขึ้น ที่เวลากดแช่ต่ำ 1-5 Cycles อัตราส่วนของระยะรอยกดและความหนาของแผ่นโลหะรอยต่อมีค่าที่สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้ แต่ที่เวลากดแช่ต่ำ 10-20 Cycles อัตราส่วนของระยะรอยกดและความหนาของแผ่นโลหะ รอยต่อไม่เหมาะสมนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนที่มากกว่า 0.3 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเชื่อมที่เวลากดแช่ต่ำ 1-5 Cycles นั้นมีความแข็งแรงเนื่องดิ่งต่ำกว่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งของ รอยต่อที่เวลากดแช่ต่ำ 10-20 Cycles ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ เพิ่มเติมต่อไป

การทดลองเชื่อมรอยต่อเกลแบบที่ 1 และ 2 ด้วยเวลากดแช่ 1-20 Cycles ด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA แรงกด 0.1 MPa ได้ผลการทดลองที่น่าสนใจดังนี้

- เวลากดแช่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การเกาะยึดของโลหะในโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นและทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเกลเพิ่มขึ้น
- ความแข็งแรงเนื่องดิ่งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2200 N ที่เวลากดแช่ 10 Cycles ด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA แรงกด 0.1 MPa
- การเปลี่ยนแปลงเวลากดแช่ส่งผลทำให้ความสามารถในการควบคุมรูปร่างของรอยต่อเกล
- รอยต่อเกลแบบที่ 2 ที่กำหนดให้วางแผ่นอลูมิเนียมเกลบนแผ่นเหล็กไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน เนื่องจากทำให้ผิวของอลูมิเนียมเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง และต่ำกว่าเกณฑ์การใช้ในงานอุตสาหกรรม

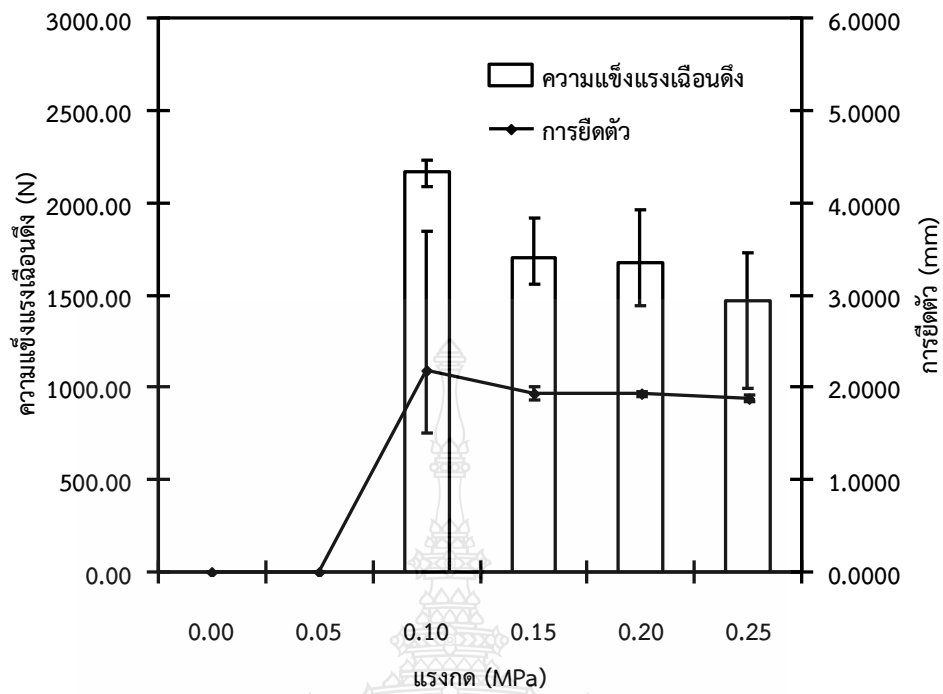
4.4 อิทธิพลของแรงกดอเล็กโทรดต่อความแข็งแรงเนื่องดิ่งของรอยต่อ

ตัวแปรการเชื่อมด้านทานแบบจุดตัวที่ 3 ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ คือ แรงกดอเล็กโทรด ในตำแหน่งที่อเล็กโทรดกดลงไปบนผิวของรอยต่อเกล ตัวแปรการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ประกอบด้วย

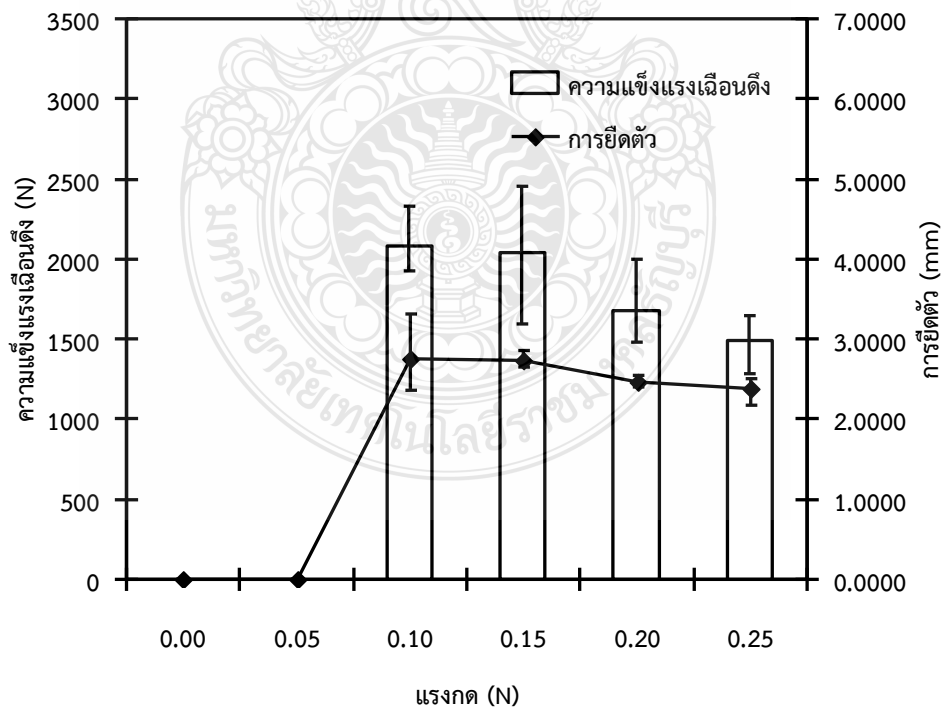
- กระแสไฟเชื่อม 95 kA ซึ่งเป็นกระแสไฟเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งสูงสุดที่ผ่านมา
- เวลากดแช่ 10 Cycles ซึ่งเป็นเวลากดแช่ที่ให้ค่าความแข็งแรงเนื่องดิ่งสูงสุดในหัวข้อที่ 4.3
- แรงกด 0.00 - 0.25 MPa

ตารางที่ 4.3 ผลการเกาะยึดของรอยต่อเกลที่เชื่อมด้วยแรงกดต่างๆ

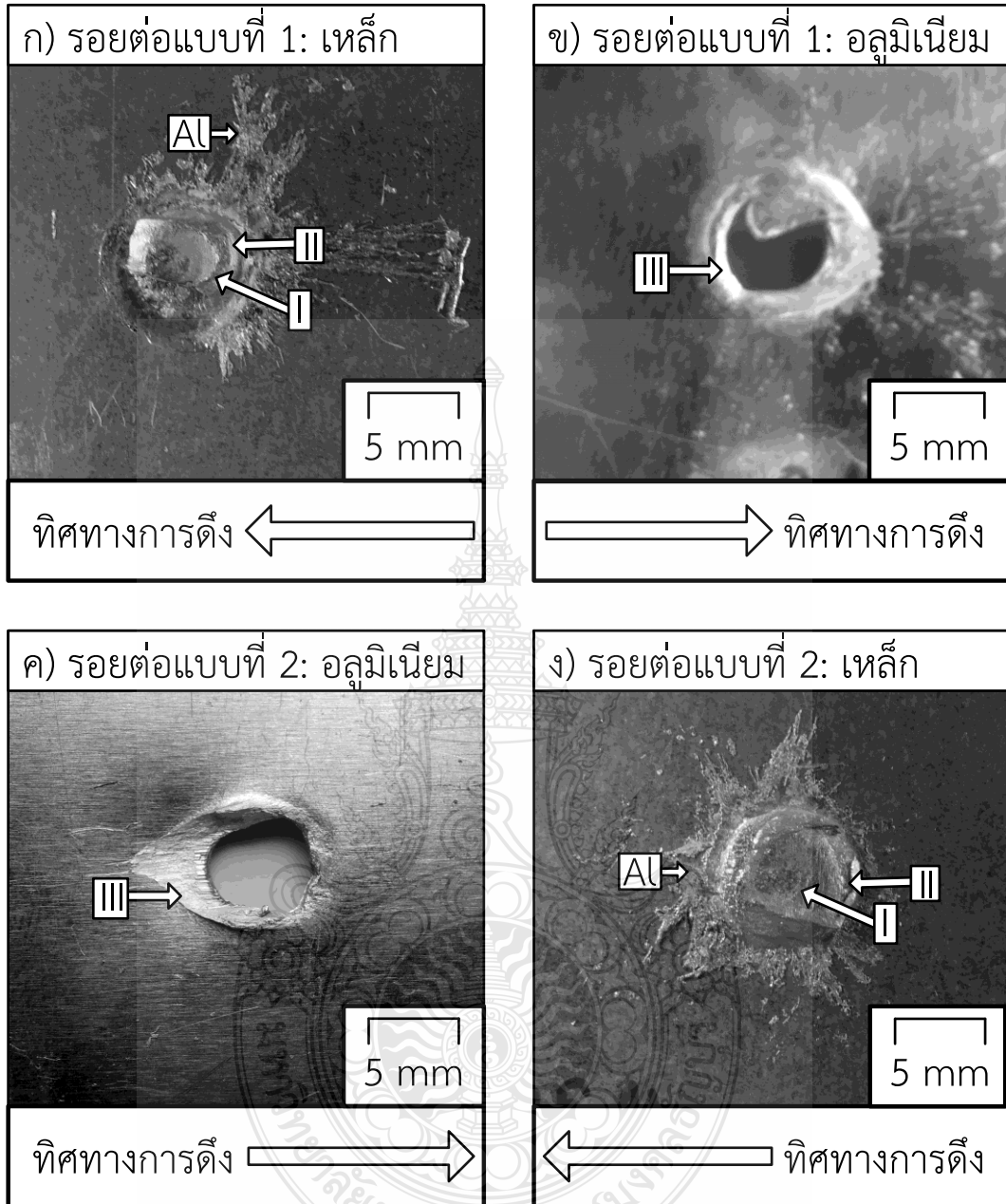
แรงกด (MPa)	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
รอยต่อเกลแบบที่ 1	×	×	√	√	√	√
รอยต่อเกลแบบที่ 2	×	×	√	√	√	√



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเนื่องดึง การยืดตัวของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และแรงกด



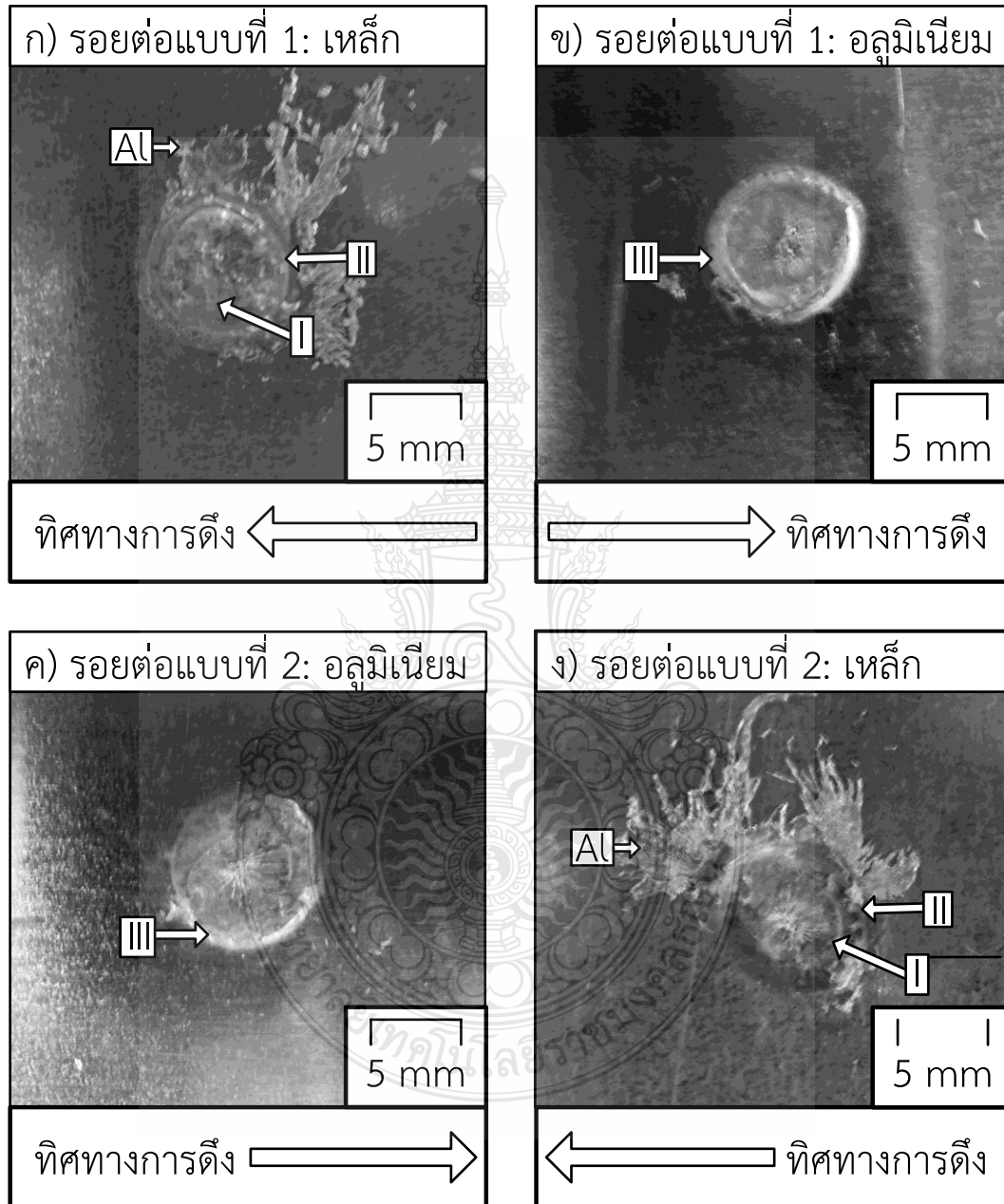
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเนื่องดึง การยืดตัวของรอยต่อเกยแบบที่ 2 และแรงกด



รูปที่ 4.31 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยแรงกด 0.15 MPa

ตารางที่ 4.3 ผลการเชื่อมตันทานแบบจุ่มรอยต่อภายใต้แรงกดอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.00-0.30 MPa พบว่าที่แรงกดอิเล็กโทรดมีค่าต่ำสุด คือ 0.00 MPa ไม่สามารถทำให้รอยต่อแบบที่ 1 ที่กำหนดให้แผ่นเหล็กไว้ด้านบนและแผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านล่างของรอยต่อเกิดการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันได้ ขณะที่เมื่อเพิ่มแรงกดอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นเป็น 0.05 MPa พบว่าแรงกดที่เพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กโทรดเกิดการเคลื่อนที่ลงมากดลงผิวของรอยต่อ แต่อิเล็กโทรดที่กดลงบนแผ่นรอยต่อไม่สามารถทำให้เกิดความร้อนต้านทาน (Resistant heat) ที่เพียงพอที่ทำให้เกิดการเชื่อมยึดระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กได้ นอกจากนี้ค่าแรงกดอิเล็กโทรด 0.00 และ 0.01 MPa นี้ ไม่ทำให้เกิดการเชื่อมยึดระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นเหล็ก

ของรอยต่อแบบที่ 2 ที่กำหนดให้แผ่นอลูมิเนียมไว้ด้านบนและแผ่นเหล็กไว้ด้านล่างของรอยต่อแยกได้ เช่นเดียวกัน เมื่อแรงกดอเนกโทรดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.01-0.30 MPa พบว่าแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นเหล็กของ รอยต่อแบบที่ 1 และ 2 สามารถเชื่อมต่อเข้าด้วยกันได้



รูปที่ 4.32 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยแรงกด 0.20 MPa

รอยต่อแยกที่เชื่อมด้วยแรงกดอเนกโทรดเท่ากับ 0.01-0.03 MPa ที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมยึด ระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กได้ถูกนำไปทำการทดสอบความแข็งแรงแรงเฉือนดึง และได้ผลการทดลองดังแสดง ในรูปที่ 4.29 ซึ่งเป็นผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงแรงเฉือนดึง รูปแบบรอยต่อ และแรงกด

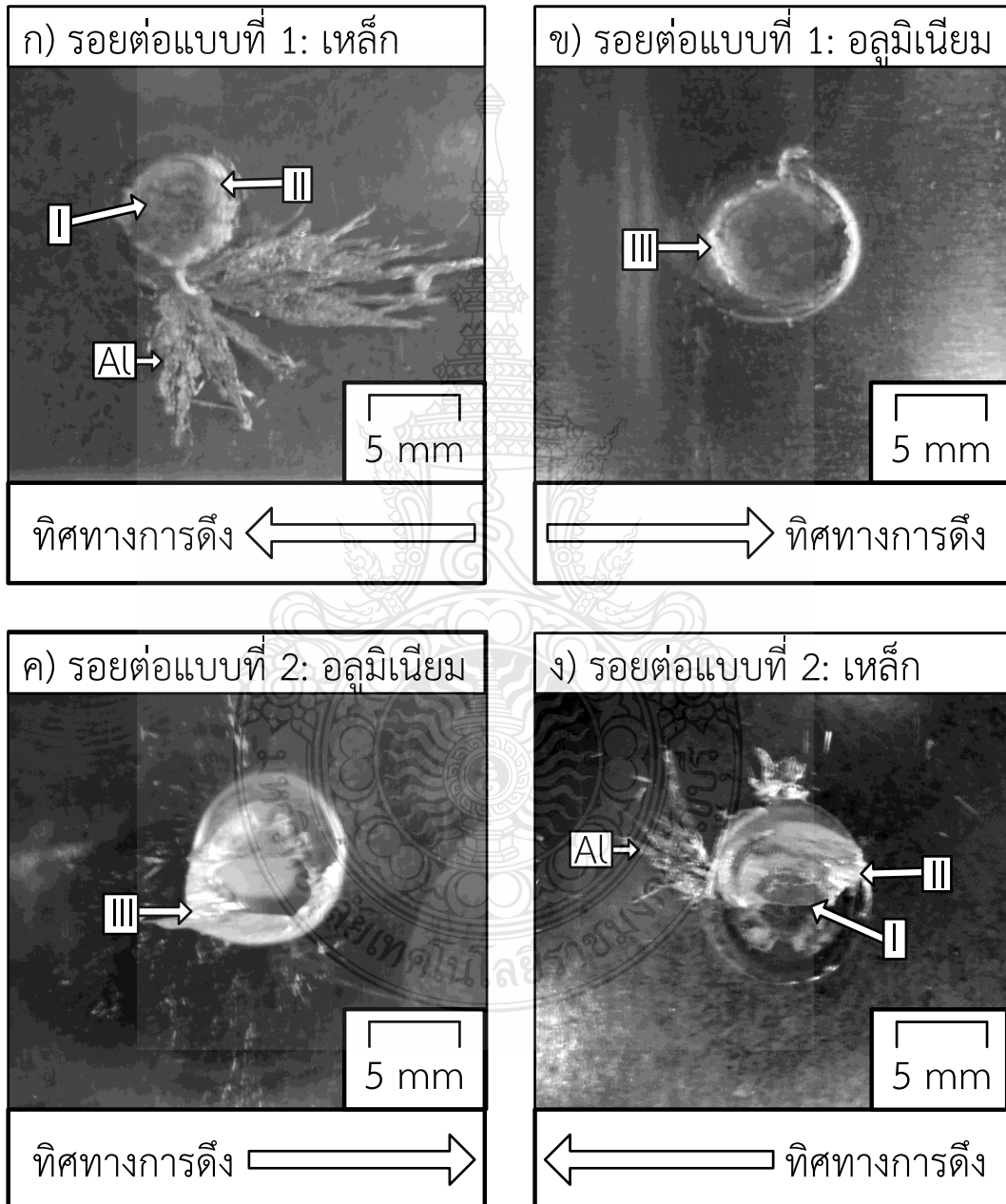
ต่างๆ ของรอยต่อแบบที่ 1 แรงกดอิเล็กโทรด 0.01 MPa ที่ทำให้เกิดการเชื่อมยึดระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและเหล็ก พบว่ารอยต่อมีค่าความแข็งแรงเฉือนดึงเท่ากับ 2165 MPa ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงเฉือนดึงที่รอยต่อเคยมีการพังทลายดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งการฉีกขาดแบ่งออกเป็นพื้นที่ที่เกิดการกดและทำให้เกิดผิวเชื่อม ด้านแผ่นเหล็กดังแสดงด้วยลูกศร I พื้นที่การฉีกขาดด้านแผ่นเหล็กดังแสดงด้วยลูกศร II และพื้นที่การฉีกขาดด้านแผ่นอลูมิเนียมดังแสดงด้วยลูกศรที่ III นอกจากนั้นอลูมิเนียมมีการกระจายตัวออกจากพื้นที่การเชื่อมเนื่องจากแรงกดและความร้อนดังแสดงด้วยลูกศร A1 ขณะที่แรงกดอิเล็กโทรด 0.01 MPa ที่ใช้ในการเชื่อมรอยต่อแบบที่ 2 แสดงความแข็งแรงเฉือนดึง 2085 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเฉือนดึง รูปแบบรอยต่อ และแรงกดต่างๆ ของรอยต่อที่ 2 พบการฉีกขาดของรอยต่อเคยดังแสดงในรูปที่ 4.13 ที่แสดงพื้นที่การฉีกขาด 3 ส่วนดังแสดงในรอยต่อแบบที่ 1 ที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.01 MPa แต่พื้นที่การฉีกขาดตำแหน่งลูกศรที่ I มีค่าน้อยกว่าการฉีกขาดที่เกิดขึ้นในรอยต่อแบบที่ 1

เมื่อแรงกดอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นเป็น 0.15 MPa พบว่าในขณะที่ปลายอิเล็กโทรดกดลงพื้นผิวของรอยต่อเคยและเกิดการเชื่อมขึ้นนั้น การเชื่อมด้านทานแบบจุดทำให้เกิดประกายไฟขึ้นขณะทำการส่งกระแสไฟเชื่อมและประกายไฟเนื่องจากการเชื่อมนี้มีการอาร์กและกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อแรงกดอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.15 MPa มีค่าลดลงประมาณ 22% เมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อแบบที่ 1 ที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.10 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.29 รอยการฉีกขาดพบการกระจายตัวของอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กที่มีปริมาณมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.31 (ก) เมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.10 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ผิวเชื่อมที่เกิดจากการกดอิเล็กโทรดดังแสดงด้วยลูกศร I รอยฉีกขาดด้วยลูกศร II และ III ดังแสดงในรูปที่ 4.31 มีพื้นที่น้อยกว่ารอยฉีกขาดดังแสดงในรูปที่ 4.29

ขณะที่ทำการเชื่อมรอยต่อแบบที่ 2 ด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.15 MPa ให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อเคยใกล้เคียงกับรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.10 MPa โดยที่ค่าความแข็งแรงที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่าประมาณ 2% อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาด (Error bar) พบว่ารอยต่อแบบที่ 2 ที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.15 MPa มีค่าความแตกต่างระหว่างค่าสูงและต่ำมากถึง 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดของรอยต่อแบบที่ 2 ที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.15 MPa ทำการเปรียบเทียบรอยฉีกขาดของรอยต่อแบบที่ 2 ที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.15 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (ค) และ (ง) พบว่าพื้นที่การฉีกขาดที่แสดงด้วยลูกศร II และ III มีขนาดที่ใหญ่กว่ารอยต่อแบบที่ 1 ที่แสดงในรูปที่ 4.31 (ก) และ (ข) และมีขนาดที่ใกล้เคียงกับรอยฉีกขาดที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.01 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.14

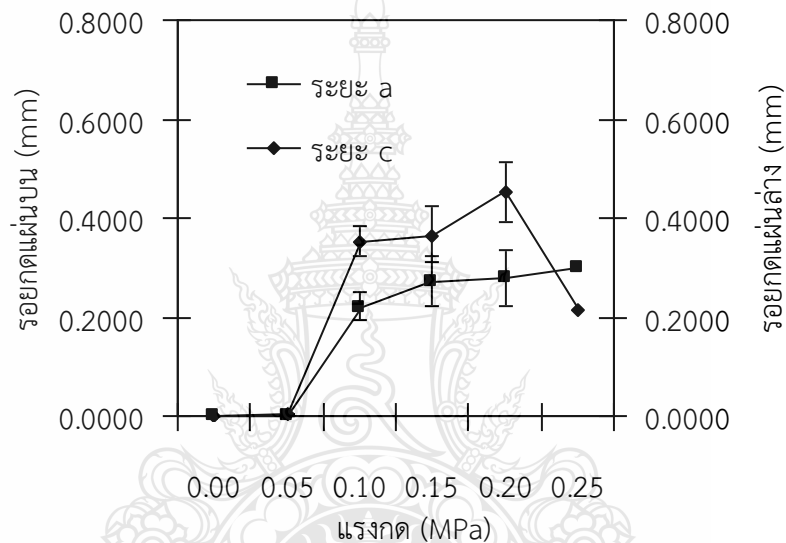
แรงกดอิเล็กโทรดถูกเพิ่มขึ้นเป็น 0.20 MPa ในการเชื่อมรอยต่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อเคยที่เชื่อมด้วยแรงกดอิเล็กโทรด 0.15 MPa อย่างไรก็ตามในการลดลงของค่าความแข็งแรงเฉือนดึงของรอยต่อแบบที่ 1 มีค่าการลดลงที่น้อยกว่า 2% แต่ขณะที่รอยต่อแบบที่ 2 มีค่าความแข็งแรงเฉือนดึงลดลงที่น้อยกว่า 18% เมื่อพิจารณารอยฉีกขาดของรอยต่อเคยทั้งสองแบบด้านแผ่นเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ก) และ (ง) พบว่าอลูมิเนียมที่กระจายออกรอบๆ รอยเชื่อมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อที่เชื่อมด้วยรอยต่อเคยที่เชื่อมด้วยแรง

กดอิลิกโทรด 0.20 MPa ขณะที่ผิวการเชื่อมดังแสดงด้วยลูกศร I มีค่าพื้นที่กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ รอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยแรงกดอิลิกโทรด 0.15 MPa อย่างไรก็ตามพื้นที่การฉีกขาดด้วยลูกศร II ดังแสดงใน รูปที่ 4.32 (ก) และ (ง) และ ลูกศร III ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ข) และ (ค) มีพื้นที่การฉีกขาดที่เล็กกว่ารอย ฉีกขาดที่แสดงในรูปที่ 4.31 พื้นที่รอยฉีกขาดที่เล็กกว่านี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของการรับแรงของ รอยต่อที่มีค่าน้อยกว่า

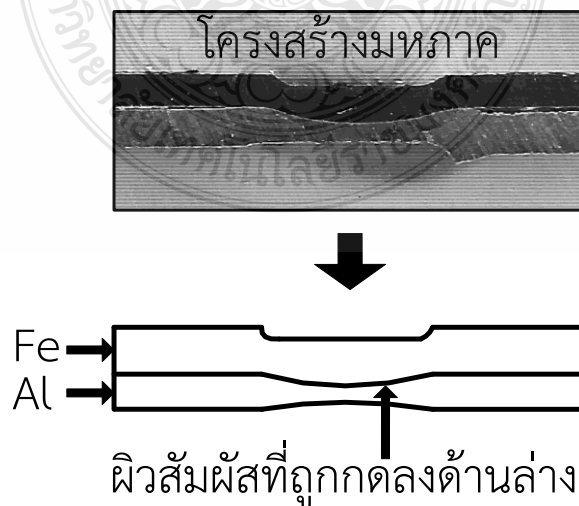


รูปที่ 4.33 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงเฉือนดึงที่เชื่อมด้วยแรงกด 0.25 MPa

ค่าความแข็งแรงเหนือนดึงของรอยต่อเกยแบบที่ 1 และ 2 มีค่าลดลงเมื่อแรงกดอิกเลกโทรดเพิ่มขึ้นเป็น 0.25 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยแรงกดอิกเลกโทรด 0.20 MPa มีค่าต่ำกว่า 11-13% ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงเหนือนดึงของรอยต่อเกยนี้เกิดจากแรงกดที่มีค่ามากกดลงไปบนผิวรอยต่อทำให้วัสดุเกิดการอัดเข้าด้วยกันและมีพื้นที่ของการเชื่อมขยายใหญ่ขึ้นดังแสดงด้วยลูกศร I ในรูปที่ 4.33 (ก) และ (ง) แรงกดที่เพิ่มขึ้นทำให้อลูมิเนียมโดบิบบัดและกระจายออกจากพื้นที่การเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.33 (ก) การขยายออกของพื้นที่การเชื่อมที่มากขึ้นและการกระจายตัวของอลูมิเนียมส่งผลทำให้อรอยต่อเกิดการเชื่อมยึดที่ค่าน้อยลงเมื่อรับแรงจึงมีพื้นที่การรับแรงมีค่าน้อยลงดังแสดงด้วยลูกศร II และ III ในรูปที่ 4.33 และส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าลดลงได้

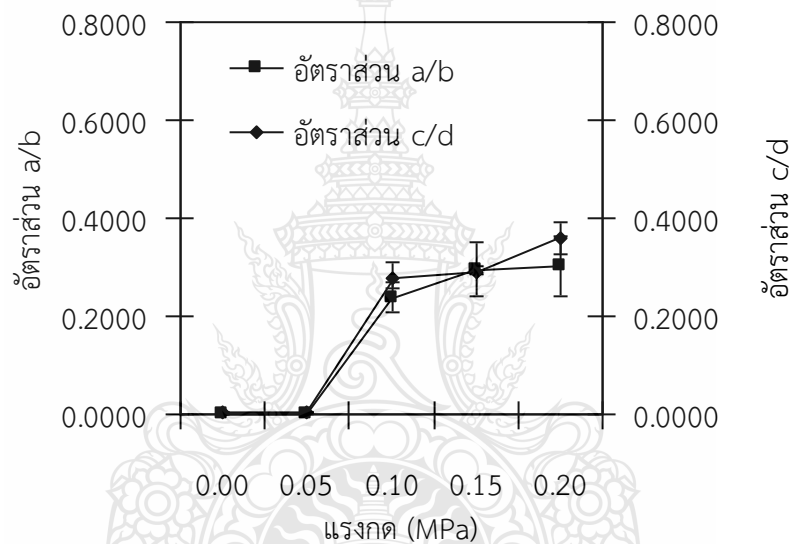


รูปที่ 4.34 ความลึกของรอยกดอิกเลกโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ที่แรงกดต่างๆ



รูปที่ 4.35 ผิวสัมผัสของรอยต่อที่เชื่อมด้วยแรงกดอิกเลกโทรด 0.25 MPa ถูกกดลงด้านล่าง

รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรอยกตอเหล็กโทรดบนผิวรอยต่อเกยแบบที่ 1 และแรงกตการเชื่อมต๋านทานแบบจุดต๋างๆ พบว่ที่แรงกตอเหล็กโทรดต๋า คือ 0.00 และ 0.05 MPa ที่ไม่ว่ทำให้เกิดแรงกตบนผิวรอยต่อถั้น ส่ผลว่ทำให้เกิดรอยกตอเหล็กโทรดถ้อยมาก ถลว่คือที่แรงกตอเหล็กโทรด 0.00 MPa ไม่ว่เกิดรอยกตบนผิวรอยต่อ แต่ว่ขณะที่แรงกตอเหล็กโทรดมีค่ว 0.05 MPa เกิดผิวรอยกตถ้อยบนผิวรอยต่อ อย่ว่ไร้ว่ถตามเมื่แรงกตอเหล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.10-0.25 MPa พบว่รอยต่อมีรอยกตอเหล็กโทรดในระดบความถีกที่เพิ่มขึ้นตามแรงกตที่เพิ่มขึ้น อย่ว่ไร้ว่ถตามเมื่พิจารณารอยกตบนผิวของอลูมิเนียมของแรงกตอเหล็กโทรด 0.25 MPa พบว่รอยกตมีค่วลดต๋าลง การเกิดในลักษณะถี้เนื่องจากแรงกตที่มีค่วสูงถั้นได้ต๋นเอาส่วผิวส่ผสมของรอยต่อถีกถมาที่ส่วของอลูมิเนียมต๋งแสดงในรูปที่ 4.35 ถิ่งส่ผลว่ให้ความถีกของรอยกตมีค่วต๋าลง รอยต่อถี้มีผิวส่ผสมเปลี่ยนแปลงในลักษณะถี้ว่ทำให้ค่วความแข็งแรงถี้จนถึงมีค่วต๋า และไม่ว่สมควรนำไปใช้งาน



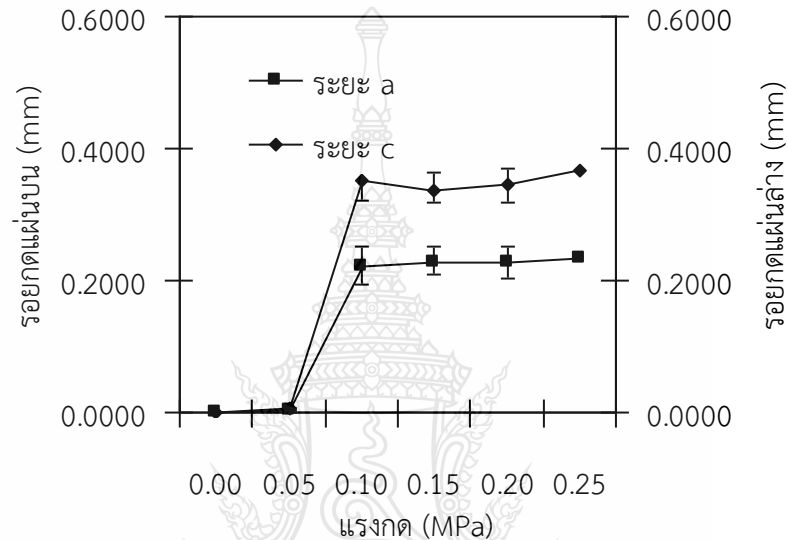
รูปที่ 4.36 อัตราส่วความถีกของรอยกตบนผิวรอยต่อเกยแบบที่ 1 ต่ความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่แรงกตต๋างๆ

รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วของรอยกตอเหล็กโทรดบนรอยต่อเกยแบบที่ 1 ต่ความหนาแผ่นวัสดุ และแรงกตต๋างๆ พบว่ที่แรงกตที่ว่ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างแผ่นเหล็กและแผ่นอลูมิเนียมมีค่วเพิ่มขึ้นเมื่แรงกตอเหล็กโทรดมีค่วเพิ่มขึ้น ค่วรอยต่อถี้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานตามมาตรฐาน JIS Z31339 คือ รอยต่อถี้มีค่วอัตราส่วต๋ากว่ 0.3 ถั้น [22] คือ รอยต่อถี้เชื่อมต๋ว้ด้วยแรงกตอเหล็กโทรด 0.10 และ 0.15 MPa เท่านั้น

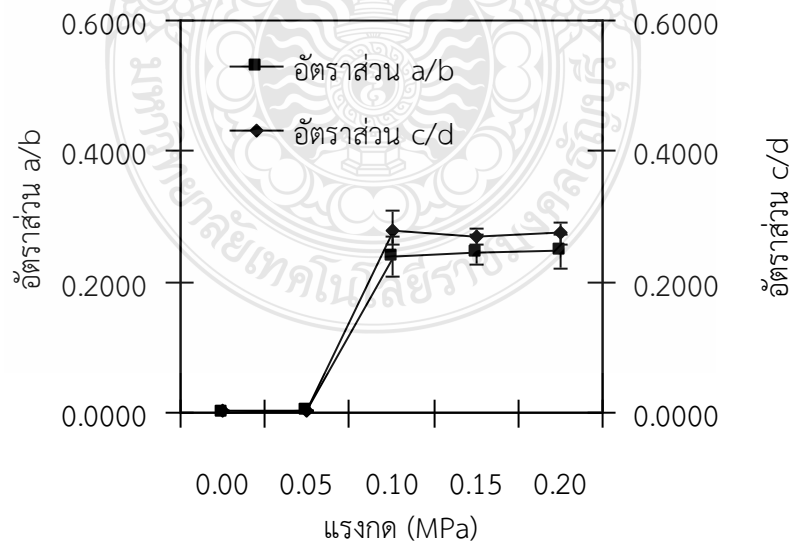
รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรอยกตอเหล็กโทรดบนรอยต่อแบบที่ 2 และแรงกตต๋างๆ พบว่ความถีกของรอยกตอเหล็กโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 2 ที่เชื่อมต๋านทานแบบจุดต๋ว้ด้วยแรงกต 0.10-0.25 MPa มีความถีกเพิ่มขึ้นเมื่แรงกตเพิ่มสูงขึ้น ค่วความถีกของรอยกตอเหล็กโทรดของรอยต่ออยู่ในช่วงระยษะความถีกระหว่าง 0.2000-0.4000 มิลลิเมตร ค่วความถีกของรอยกตบนแผ่นเหล็กต๋านบนเป็นค่วความถีกของรอยกต

ที่มีค่าอยู่ในช่วงระดับ C และค่าความลึกของรอยกตบนผิวรอยต่อด้านอลูมิเนียมที่มีค่าอยู่ในช่วงระดับ D ตามมาตรฐาน JIS Z31339 [22]

รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรอยกตอิเล็กโทรดบนรอยต่อเกยแบบที่ 2 ต่อความหนาแผ่นวัสดุ และแรงกดต่างๆ พบว่ารอยต่อเกยแบบที่ 2 ระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและเหล็กที่สามารถเชื่อมติดกันด้วยแรงกด 0.10-0.25 MPa นั้น มีค่าอยู่ต่ำกว่า 0.3 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้งานในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ได้



รูปที่ 4.37 ความลึกของรอยกตอิเล็กโทรดของรอยต่อเกยแบบที่ 1 ที่แรงกดต่างๆ



รูปที่ 4.38 อัตราส่วนความลึกของรอยกตบนผิวรอยต่อเกยแบบที่ 2 ต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่แรงกดต่างๆ

การทดลองในส่วนนี้ได้ทำการเชื่อมด้านทานแบบจตุรรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 และ เหล็กกล้าเคลือบสังกะสีเกรด SGACD โดยทำการศึกษาอิทธิพลของแรงกดอเลกโทรดที่มีผลต่อสมบัติของ รอยต่อ ผลการศึกษาสำคัญมีดังนี้

- สภาวะการเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดประมาณ 2200 N และการยึดตัวของรอยต่อ เกย 2.8 มิลลิเมตร คือ กระแสไฟเชื่อม 95 kA เวลาเชื่อม 10 cycle และแรงกด 0.1 MPa
- แรงกดอเลกโทรดที่ต่ำเกินไปไม่ทำให้เกิดการเกาะยึดของรอยต่อ ขณะที่แรงกดอเลกโทรดที่สูงทำให้ พื้นที่การเชื่อมบริเวณผิวสัมผัสขยายเพิ่มขึ้น และลดความแข็งแรงของรอยต่อ
- แรงกดที่มีค่าสูงเกินไปทำให้ผิวสัมผัสของรอยต่อเกยที่กำหนดให้เหล็กอยู่ด้านบนบนแผ่นอลูมิเนียมอยู่ ด้านล่างเกิดการเสียรูปและส่งผลทำให้ความแข็งแรงเฉือนดิ่งต่ำ



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยโครงการเรื่องนี้ทำการศึกษาสมบัติรอยเชื่อมด้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วยกระแสไฟเชื่อม 85-105 kA เวลากดแช่ 1-20 cycle และแรงกดปลายอิเล็กโทรด 0.00-0.25 MPa รอยต่อที่ได้จากการเชื่อม ถูกนำมาทำการตรวจสอบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

- 5.1.1 ตัวแปรการเชื่อมที่ทำให้ได้ความแข็งแรงเฉือนดึง 2200 N คือ กระแสไฟเชื่อม 95 kA เวลากดแช่ 10 cycle และแรงกดปลายอิเล็กโทรด 0.10 MPa
- 5.1.2 กระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนดึงของรอยต่อเกยเพิ่มขึ้น
- 5.1.3 กระแสไฟเชื่อมที่สูงส่งผลทำให้อลูมิเนียมบริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อเกยกระจายออกด้านข้างสูงและทำให้ลดการเกาะตัวของวัสดุ
- 5.1.4 รูปร่างโครงสร้างมหภาคของรอยต่อเกยอยู่ในระดับ C ของมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS Z31339 สามารถนำไปใช้ในงานผลิตรถยนต์ได้
- 5.1.5 รอยเชื่อมต่อเกยที่กำหนดให้เหล็กอยู่ด้านบนอลูมิเนียมมีความแข็งแรงเฉือนดึงสูงกว่ารอยเชื่อมต่อเกยที่กำหนดให้อลูมิเนียมอยู่ด้านบนเหล็ก
- 5.1.6 เวลากดแช่อิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้นทำให้ส่งผลทำให้การเกาะยึดของโลหะเพิ่มขึ้นและทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเกยเพิ่มขึ้น
- 5.1.7 การเพิ่มเวลากดแช่ที่สูงเกินไปส่งผลทำให้รูปร่างโครงสร้างมหภาคของรอยต่อเกยเสียรูป
- 5.1.8 แรงกดอิเล็กโทรดที่ต่ำเกินไปไม่ทำให้เกิดการเกาะยึดของรอยต่อ ขณะที่แรงกดอิเล็กโทรดที่สูงทำให้พื้นที่การเชื่อมบริเวณผิวสัมผัสขยายเพิ่มขึ้น และลดความแข็งแรงของรอยต่อ
- 5.1.9 แรงกดที่มีค่าสูงเกินไปทำให้ผิวสัมผัสของรอยต่อเกยที่กำหนดให้เหล็กอยู่ด้านบนแผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านล่างเกิดการเสียรูปและส่งผลทำให้ความแข็งแรงเฉือนดึงต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาการเชื่อมด้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมผสม 1100 กับเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และปัญหาที่พบจากการดำเนินงาน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนารอยต่อเกยการเชื่อมด้านทานแบบจุดเพื่อให้ความสมบูรณ์และความแข็งแรงเฉือนดึงสูง มีดังต่อไปนี้

- 5.2.1 การเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุทดลอง เนื่องจากในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์มีการใช้แผ่นโลหะที่มีความหนาต่างๆ แต่ในงานนี้ใช้แผ่นโลหะที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรเท่านั้น
- 5.2.2 การเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุที่ประกอบเป็นรอยต่อเกยที่นอกเหนือจากรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสมเกรด 1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD

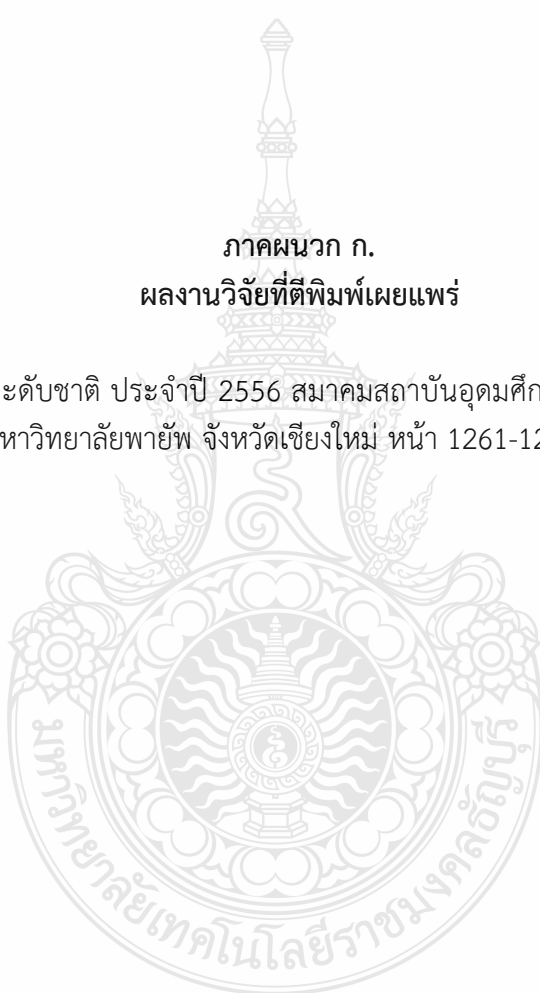
- 5.2.3 การเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทำอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการนำไฟฟ้า นอกจากนี้รูปร่างของอิเล็กทรอนิกส์เป็นสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาเนื่องจากรูปร่างของปลายอิเล็กทรอนิกส์นั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเชื่อมและสมบัติของรอยต่อ
- 5.2.4 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรอยต่อเกยที่ประกอบไปด้วยรอยต่อเกยสำหรับการทดสอบแรงเฉือนดึง รอยต่อเกยสำหรับการทดสอบแรงดึงกากบาท และรอยต่อเกยสำหรับการทดสอบลอกผิว
- 5.2.5 การพยากรณ์ความเค้นและความร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อจุดประสงค์ในการลดเวลาการเชื่อม และการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ
- 5.2.6 การวิเคราะห์สมบัติของรอยต่อด้วยวิธีการทดสอบความล้าซึ่งเป็นการพังทลายที่เกิดขึ้นหลังจากการใช้งานในระยะเวลานาน หากทำการพยากรณ์ระยะเวลาการพังทลายได้อาจทำให้การนำเอารอยต่อเกยที่ได้ไปใช้งานมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Vural, A. Akkus and B. Eryurek. 2006. Effect of Welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets. J. of Materials Processing Technology 176: 127-132.
- [2] <http://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf>, August 4, 2010.
- [3] R. Qiu, H. Shi, K. Zhang, Y. Tu, C. Iwamoto and S. Satonaka. 2010. Interfacial characterization of joint between mild steel and aluminum alloy welded by resistance spot welding. Materials Characterization 61: 684-688.
- [4] Askeland, D.R. and Phule, P.P. 2006. The Science and Engineering of Materials. Toronto. Thomson Canada Limited.
- [5] สุรัตน์ ตรียานพงษ์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2555. รายงานวิจัยประจำปีงบประมาณ 2554 เรื่อง การประเมินค่าตัวแปรการเชื่อมเสียดทานแบบจุดที่เหมาะสมของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม 5052 และ เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD ด้วยวิธีการทาทุชิ. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 83 หน้า
- [6] ปราโมทย์ พูนนายม พรกช สิริสุวัฒน์ ศักดิ์ชัย จันทศรี และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2553. รายงานวิจัยประจำปีงบประมาณ 2552 เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพรอยเชื่อมการเสียดทานแบบกวนรอยต่ออลูมิเนียม 6063-T1 ในโครงสร้างรถยนต์ด้วยตัวกวนหลายรูปแบบ. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [7] ธรรมบุญ อินทรพล. 2552. วิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา เรื่อง ศึกษาตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทอร์เลอร์แบลิ่งค์ต่อการยึดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี เกรด SGACD. ปทุมธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์
- [8] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ประจักษ์อ่างบุญตา และบุญส่ง จงกลณี. 2552. รายงานวิจัยประจำปีงบประมาณ 2551 เรื่อง โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของรอยเชื่อมวัสดุด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมแบบใหม่. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- [9] <http://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf>, August 4, 2010.
- [10] Aslanlar, A., Qgur, A., Ozasrac, U., Ilhan, E. and Demir, Z. 2007. Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding. Materials and Design, 28: 2-7.
- [11] ASM International. 2000. ASM Handbook Volume 6 Welding, Brazing and Soldering. Ohio, ASM International.
- [12] นิวัฒน์ คุณวงศ์. 2551. วิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา เรื่อง การศึกษาผลกระทบของรอยเชื่อมเนื่องจากการเตรียมสภาพผิวหน้าของอลูมิเนียมผสมในการเชื่อมด้วยความต้านทานชนิดจุด. กรุงเทพมหานคร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

- [13] Kattner, U.R. and Massalski, T.B. 1990. Binary Alloy Phase Diagrams. ASM International, Material Park, OH, P.147.
- [14] S. Kobayashi and T. Yakou. 2002. Control of Intermetallic Compound Layers at Interface between Steel and Aluminum by diffusion-treatment. Mater. Sci. and Eng. A, 338:44-53.
- [15] Groover, M.P. 2002. Fundamentals of Modern Materials, Processes, and Systems Manufacturing. 2nd edition.. New York. John Wiley and Sons, Inc.
- [16] Dieter, G E. 1988. Mechanical Metallurgy. Singapore. McGraw-Hill, Inc.
- [17] Japanese Industrial Standard. 1992. Handbook of Non-Ferrous Metals&Metallurgy. Tokyo. Japanese Industrial Standard Association.
- [18] Qiu, R, Iwamoto, C. and Satonaka, S. 2009. The Influence of reaction layer on the strength of aluminum/steel joint welded by resistance spot welding. Materials Characterization, 60: 156-159.
- [19] Qiu, R, Iwamoto, C. and Satonaka, S. 2009. Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy joints welded by resistance spot welding with cover plate. J. of Materials Processing Technology, 209: 4186-4193.
- [20] S. Aslanlar. 2006. The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. Materials and Design 27: 125-131.
- [21] Sun, X., Stephens, E.V., Khaleel, M.A., Shao, H. and Kimchi, M. 2004. Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Materials – From Process to Performance – Part I: Experimental Study. Welding Journal, 84-6: 188s-195s.
- [22] Japanese Industrial Standard. 1997. JIS Handbook of Welding. Tokyo. Japanese Industrial Standard Association.



ภาคผนวก ก.
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] การประชุมวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2556 สมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย 31 พฤษภาคม 2556 มหาวิทยาลัยพายัพ จังหวัดเชียงใหม่ หน้า 1261-1268

อิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมต้านทานแบบจุดต่อ ความแข็งแรงดึงเฉือน รอยต่อ เกยอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD

Effect of Resistance Spot Welding Current on Tensile Shear Strength of AA1100
Aluminum Alloy and SGACD Zinc-coated Steel Lap Joint

ศักดิ์ชัย จันทศรี* ไพบูลย์ แยมเผื่อน เจษฎา แก้ววิจิตร กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

E-mail: sakchai.c@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์ในการแสดงผลการทดลองการศึกษาคือความเป็นไปได้ในการเชื่อมต้านทานแบบจุด รอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD รอยต่อเกยถูกเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 85-105 kA เวลาเชื่อม 10 รอบ และความดัน 0.1 MPa และทำการศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและสมบัติของรอยเชื่อมเสียดทานแบบต่อเกย ผลการทดลองที่ได้โดยสรุปมีดังต่อไปนี้ การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟเชื่อม ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉือนและการยึดตัวของรอยต่อเกยมีค่าเพิ่มขึ้น และแสดงค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุด ประมาณ 2200 N และการยึดตัวของรอยต่อเกย 2.8 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟเชื่อม 95 kA ความลึกรอยกดของอิเลกโทรดการเชื่อมต้านทานแบบจุดบนผิวหน้ารอยต่อเกยมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราส่วนอัตราส่วนรอยกดต่อความหนาของแผ่นโลหะมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: อลูมิเนียม เหล็กกล้าเคลือบสังกะสี การเชื่อมต้านทานแบบจุด ความแข็งแรงเฉือน

ABSTRACT

This paper aims to present the feasibility experimental study results of resistance spot welding of AA1100 aluminum alloy and SGACD 45/45 zinc coated steel lap joint. The lap joint was resistance spot welded using the welding current of 85-105 kA, welding time of 10 cycles and welding force of 0.1 MPa and then, investigated for a relation between the welding parameters and the lap joint properties. The summarized are as follows. The increase of the welding current affected to increase the tensile shear strength and the displacement of the lap joint and also showed the maximum tensile shear strength of 2200N and the displacement of 2.8 mm at the welding current of 95 kA. An Indentation depth of the end of the resistance spot welding electrode on the lap joint surface was decreased when the welding current was increased. The ratio of electrode indentation depth and the lap joint thickness was decreased when the welding current was increased.

KEYWORDS: aluminum, zinc coated steel, resistant spot welding, tensile shear strength

บทนำ

การเชื่อมด้านทานแบบจุด (Resistance Spot Welding: RSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยความร้อนที่เกิดจากการต้านทานการไหลของกระแสผ่านพื้นที่รอยต่อในการหลอมวัสดุและกดให้ติดกันด้วยแรงดันจากอิเล็กโทรดทั้งสองข้างให้ติดกัน กระบวนการเชื่อมนี้เป็นวิธีการสำคัญที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ดังเห็นได้จากรถยนต์หนึ่งคันที่มีปริมาณการต่อยึดด้วยการเชื่อมด้านทานแบบจุดของชิ้นส่วนระหว่างวัสดุเดียวกัน วัสดุต่างชนิด หรือวัสดุที่มีความหนาแตกต่างกัน ในปริมาณมากกว่าหนึ่งพันจุด (Vural et al., 2006) หนึ่งในข้อดีของการเชื่อมด้านทานแบบจุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมทิก คือ รอยเชื่อมของการเชื่อมด้านทานแบบจุดนั้นเกิดขึ้นด้านในของรอยต่อ ขณะที่รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกเกิดขึ้นด้านนอก ลักษณะเช่นนี้ทำให้รอยเชื่อมของการเชื่อมทิกนั้นมีความง่ายต่อการตกแตงมากกว่า ขณะเดียวกันในมุมมองของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในปัจจุบันที่มุ่งเน้นในการผลิตรถยนต์ที่มีการใช้น้ำมันอย่างประหยัด เพื่อเป็นการอนุรักษ์พลังงาน และรักษาสีสิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมยานยนต์ได้พยายามคิดค้นหาวิธีการในการลดการใช้ น้ำมันของรถยนต์ด้วยวิธีการต่างๆ หนึ่งในวิธีการที่มีการใช้งานในปัจจุบัน คือ การทำให้น้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ลดลง ซึ่งทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เช่น เหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High strength low alloy: HSLA) วัสดุประกอบ (Composite materials) หรืออลูมิเนียมผสม เข้ามาแทนที่ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้าที่มีน้ำหนักสูงกว่า (Qiu et al., 2010) วัสดุน้ำหนักเบาที่นิยมนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นในการทดแทนเหล็กในปัจจุบัน คือ อลูมิเนียม เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและ

นำหนักสูงกว่าเหล็กประมาณ 2 เท่า (Askeland and Phule, 2006)

ที่ผ่านมารายงานผลการเชื่อมด้านทานแบบจุดรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก เช่น การเชื่อมอลูมิเนียมผสมเกรด A5052 เข้ากับแผ่นเหล็กรีดเย็น SPCC และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่พบความแข็งแรงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับชั้นสารประกอบกึ่งโลหะที่ก่อตัวแบบไม่ต่อเนื่องที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อ (Qiu et al., 2010) หรือรอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมผสม AA5182-O และเหล็กกล้า SAE 1008 ที่ใช้แผ่นสอดระหว่างรอยต่อ พบพื้นที่การหลอมละลายแบ่งออกเป็นสองส่วน นักเกตด้านของแผ่นเหล็กมีรูปร่างปกติเหมือนดังการเชื่อมทั่วไป และด้านอลูมิเนียมมีรูปร่างวงรีครึ่งใบประกอบด้วยแถบบางตามอินเทอร์เฟซของรอยต่อ ความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าที่สามารถเทียบเคียงได้กับระดับความแข็งแรงของรอยที่ยึดด้วยวิธี (Sun, 2004) หรือรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052 และเหล็กกล้ารีดเย็น SPCC ที่มีผลการทดลองพบความหนาของชั้นการเกิดปฏิกิริยานั้นมีความบางและมีขนาดที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่กึ่งกลางของแนวเชื่อม ชั้นการเกิดปฏิกิริยาส่งผลต่อการลดค่าความแข็งแรงของรอยต่อในกรณีที่มีความหนามากกว่า 1.5 มม. (Qiu, 2009) หรือรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052 และเหล็กกล้ารีดเย็น SPCC รอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052 ที่ทำการเชื่อมด้านทานแบบจุดที่มีแผ่นครอบด้านบนรอยเชื่อม ที่พบการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะ Fe_2Al_5 และ $FeAl_3$ ค่าความหนาของสารประกอบกึ่งโลหะที่ก่อตัวขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมเพิ่มขึ้น สารประกอบกึ่งโลหะไม่มีผลต่อรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม A5052/เหล็กกล้าไร้สนิม 304 (Qiu, 2009)

อย่างไรก็ตามในการเชื่อมด้านทานแบบจตุรรอยต่อระหว่างเหล็กและอลูมิเนียมที่มีความยากลำบากในการเชื่อมเพื่อให้ได้รอยต่อที่มีประสิทธิภาพสูงและวัสดุบางตัวที่มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศไทย คือ รอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD และอลูมิเนียม AA1100 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้งานมากในการผลิตตัวถังของรถยนต์นั้นไม่มีการรายงานไว้ ดังนั้นหากมีการทำการทดลองเพื่อเตรียมข้อมูลไว้ อาจทำให้เกิดประโยชน์สูงในอนาคตเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไทยต่อไป

วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษา อิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมด้านทานแบบจตุรต่อความแข็งแรงดึงเฉือนรอยต่อเกยอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD
- 2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่ตัวแปรการเชื่อมต่างๆ

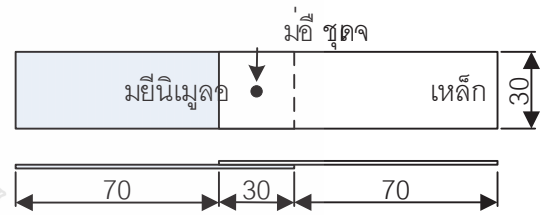
วิธีดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีวัสดุทดลอง

ธาตุ	AA1100	SGACD
Al	สมดุล	-
Fe	-	สมดุล
Si	0.095	-
Mn	0.050	-
Cu	0.15	-
P	0.006	0.014
S	-	.024

วัสดุที่ใช้ในทดลอง อลูมิเนียมผสมเกรด AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีเกรด SGACD

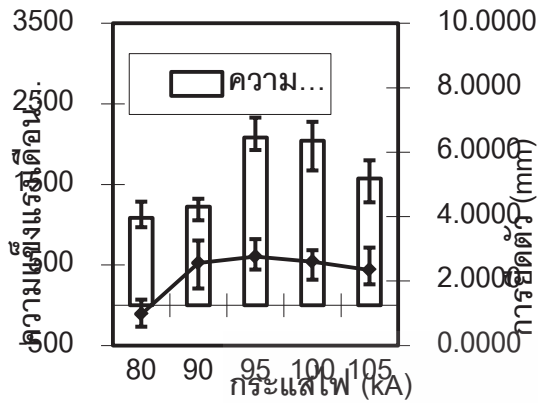
แผ่นรีด ความหนา 1.0 มิลลิเมตร ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 แผ่นโลหะถูกตัดให้มีขนาดกว้าง 30 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร และนำมาต่อเกยโดยกำหนดให้แผ่นเหล็กเกยอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม 30 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 1 ก่อนการทำการเชื่อมแผ่นโลหะถูกทำสะอาดด้วยอะซิโตนก่อนนำไปทำการยึดแน่นในอุปกรณ์การจับยึดที่ทำมาจากวัสดุฉนวน



รูปที่ 1 มิติชิ้นงานเชื่อม (หน่วย: มิลลิเมตร)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำมาจากทองแดงบริสุทธิ์มีรูปร่างแบบชนิด A ตามข้อกำหนดสมาคมผู้ผลิตเครื่องเชื่อมด้านทาน โดยกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายอิเล็กโทรดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาของชิ้นทดสอบมีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตร (ASM International, 2000) รอยต่อเกยถูกนำไปทำการเชื่อมด้วยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟเชื่อม 85-105 กิโลแอมแปร์ เวลาในการเชื่อม 10 รอบ (Cycle) และแรงกด 0.1 MPa ชิ้นทดสอบที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟต่างๆ ถูกนำไปทำการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงเฉือน (Tensile shear strength) และการยึดตัวตัวเนื่องจากแรงเฉือน (Shear strain) โดยกำหนดให้ค่าอัตราการเกิดความเครียดเท่ากับ 25 mm/min ชิ้นงานทุกสภาวะการเชื่อมถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยต่อเพื่อศึกษาค่าความลึกของรอยกุด ความสัมพันธ์ของความลึกรอยกุดและความหนาของแผ่นรอยต่อ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของรอยเชื่อมและโครงสร้างมหภาคต่อไป

ผลการทดลองและการวิจารณ์

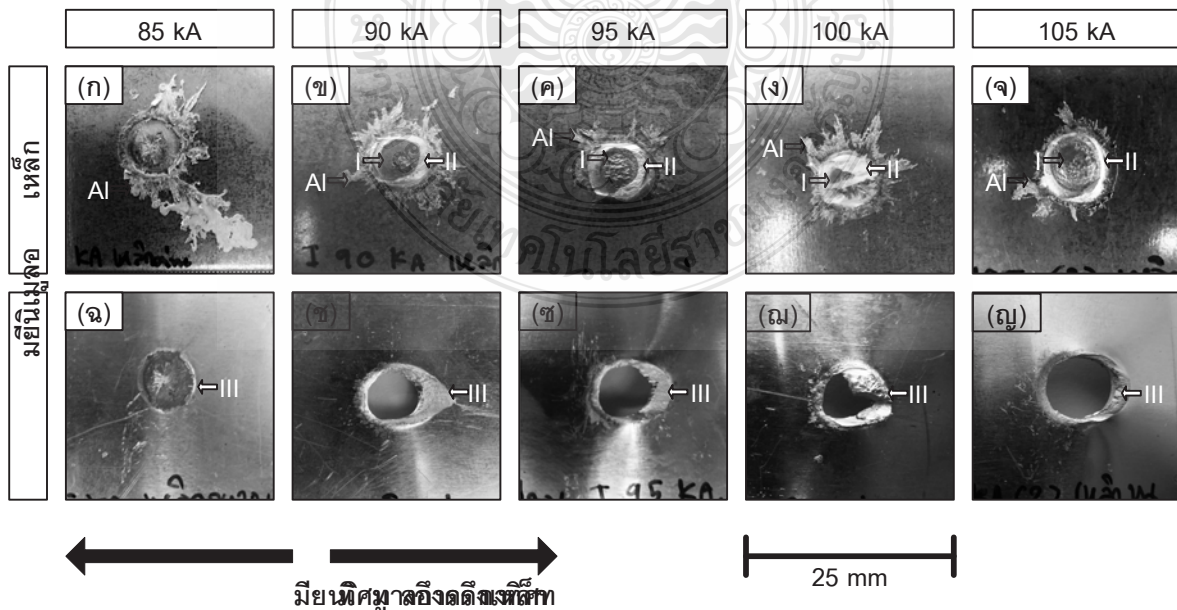


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความแข็งแรงดึงเฉลี่ย และการยัดตัวของรอยต่อเกย

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความแข็งแรงดึงเฉลี่ย และการยัดตัวของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยเวลาในการเชื่อม 10 รอบ และแรงกด 0.1 MPa พบว่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ย และการยัดตัวของรอยต่อมีค่าสูงขึ้นเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นและแสดงค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยที่กระแสไฟเชื่อม 95 kA ที่ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยประมาณ 2200 N และการยัดตัวประมาณ 2.4

มิลลิเมตร การเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มกระแสส่งผลทำให้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อมีค่าสูงขึ้น ดังสมการความร้อนที่ได้แสดงไว้ใน การเชื่อมแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีโครไมด์ที่พบว่ากระแสที่เพิ่มส่งผลเป็นทวีคูณต่อการเพิ่มความร้อนในรอยต่อ (Aslanlar et al., 2007) อย่างไรก็ตามเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่า สูง คือ 100-105 kA พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยและการยัดตัวมีค่าลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การลดลงเมื่อกระแสมีค่าต่ำกว่า 95 kA แล้วมีค่าการลดลงของค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยและการยัดตัวน้อยกว่า

รูปที่ 3 แสดงผิวหน้าการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงเฉลี่ยที่กระแสไฟเชื่อม ต่างๆ รูปรอยพังทลายแถวด้านบนเกิดจากการแยกแผ่นเหล็กที่อยู่ด้านบนที่ปกติถูกวางคว่ำประกบบนแผ่นอลูมิเนียมให้หงายขึ้น และถ่ายภาพ ขณะที่แถวด้านล่างคือ รอยพังทลายของแผ่นอลูมิเนียมหลังจากดึงขาดออกจากกัน ในการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยที่แสดงผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1 นั้นแผ่นเหล็กถูกดึงไปด้านขวา ขณะที่แผ่นอลูมิเนียมถูกดึงไปด้าน



รูปที่ 3 รูปแบบการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงเฉลี่ย

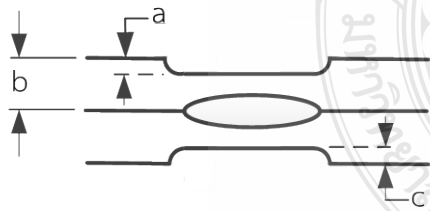
ซ้าย พิจารณารอยการกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมที่เกิดจากความร้อนเสียดทานที่แตกต่างกันจากการใช้กระแสไฟเชื่อมที่แตกต่างกัน พบว่าเศษของอลูมิเนียมมีการกระจายตัวออกมารอบๆ บริเวณพื้นที่การเชื่อมและกระจายตัวไประหว่างรอยต่อของแผ่นอลูมิเนียมและเหล็ก เศษของอลูมิเนียมที่กระจายออกไปจากการตรวจสอบพบว่าการกระจายตัวสูงที่ใช้กระแสไฟเชื่อมต่ำ คือ 85 kA ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) เศษอลูมิเนียมที่กระจายตัวออกนี้ทำให้พื้นที่รับแรงของรอยต่อบริเวณที่ทำการรับแรงดึงเชื่อมมีค่าน้อยลงและส่งผลทำให้ค่าการรับแรงดึงเชื่อมมีค่าน้อย นอกจากนั้นที่ บริเวณรอยฉีกขาดบนพื้นที่การเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) และ (ข) พบว่าการฉีกขาดนั้นเกิดที่อินเทอร์เฟซระหว่างอลูมิเนียมและเหล็ก เนื่องจากการตรวจสอบในระดับกำลังขยายต่ำ (Macro interface examination) กำลังขยายไม่เกิน 10 เท่าด้วยภาพถ่ายดังแสดงในรูปที่ 3 นั้น ไม่พบเศษอลูมิเนียมบนผิวเหล็ก หรือเศษเหล็กบนผิวอลูมิเนียม อย่างไรก็ตามการตรวจสอบที่ กำลังขยายสูง เช่น ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope: SEM) และการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณรอยพังทลายอาจต้องมีการตรวจสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองต่อไป

รูปที่ 3 (ข) และ (ค) แสดงผิวรอยพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 และ 95 kA เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวการพังทลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 85 kA พบว่ารูปการพังทลายของรอยต่อที่กระแสไฟเชื่อมทั้งสองมีความแตกต่างจากกระแสไฟเชื่อม 85 kA อย่างชัดเจน กล่าวคือ การกระจายตัวของเศษอลูมิเนียมบนแผ่นเหล็กที่กระจายตัวบริเวณรอบๆ แนวเชื่อม มีปริมาณลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น

อลูมิเนียมที่กระจายออกมานั้นแสดงการกระจายตัวสูงเมื่อใช้กระแสไฟเชื่อม 95 kA ซึ่งเป็นกระแสไฟเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดในการทดลองนี้ การยึดติดของอลูมิเนียมและเหล็กมีการยึดติดที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับจากส่วนของอลูมิเนียมที่ติดบนแผ่นเหล็กดังแสดงด้วยลูกศร I ในรูปที่ 3 (ข) และ (ค) ผิวของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA แสดงผิวเชื่อมที่มีค วามขรุขระมากกว่าอันเกิดจากกระแสไฟเชื่อมที่สูงกว่าทำให้เกิดความร้อนที่มากกว่าในการหลอมวัสดุเข้าด้วยกัน ตำแหน่งการพังทลายของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 และ 95 kA มีการพังทลายเนื่องจากแรงดึงเชื่อมรอบๆ บริเวณพื้นที่การยึดติดของอลูมิเนียมและเหล็กดังแสดง ด้วยลูกศร II ในรูปที่ 3 (ข) และ (ค) โดยตำแหน่งการฉีกขาดเกิดที่เนื้ออลูมิเนียมรอบๆ พื้นที่การเชื่อมที่ด้านอลูมิเนียม โดยสามารถยืนยันการฉีกขาดบนแผ่นอลูมิเนียมได้ดังแสดงด้วยลูกศร III ในรูปที่ (ข) และ (ข) และพบว่าแนวเชื่อมของอลูมิเนียมและเหล็กมีความแข็งแรงสูง กว่าแผ่นวัสดุอลูมิเนียม เนื่องจากวัสดุเกิดการฉีกขาดที่แผ่นรอยต่อเกยด้านอลูมิเนียมและไม่เกิดการพังทลายที่อินเทอร์เฟซของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) และ (ข) ในการศึกษาทดลองนี้รอยต่อที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA แสดงความแข็งแรงดึงเชื่อมสูงสุดที่ค่าประมาณ 2165 N ความแข็งแรงที่สูงกว่าของรอยต่อเมื่อเปรียบเทียบกับกับความแข็งแรงของรอยต่อเกยที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 90 kA เมื่อพิจารณาจากรอยพังทลายพบว่า พื้นที่การฉีกขาดรอบรอยต่อด้านแผ่นอลูมิเนียมของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA มีค่ามากกว่าจึงสามารถรับแรงได้ดีกว่า

รูปที่ 3 (ง) และ (ฉ) แสดงรอยการฉีกขาดของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแส 100 kA ด้านเหล็ก

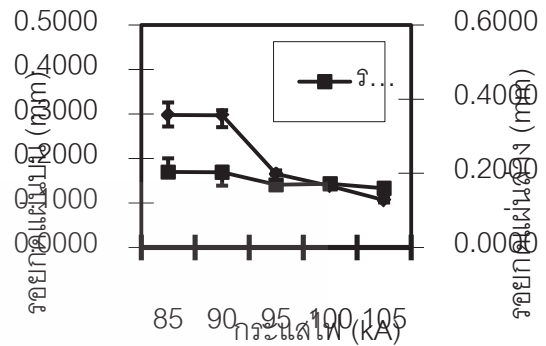
และอุณหภูมิเนี่ยมตามลำดับ พบว่าแนวเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำกว่ากระแสไฟเชื่อม 95 kA แนวการฉีกขาดแตกต่างออกไป กล่าวคือ การฉีกขาดไม่ได้เกิดขึ้นรอบๆ พื้นที่การเชื่อมแต่เกิดสลับกันไปในพื้นที่การเชื่อมที่แสดงทั้งพื้นที่การเชื่อมที่เกิดจากการกดของอิเล็กโทรดตังแสดงด้วยลูกศร I และพื้นที่ที่เกิดการฉีกขาดบนส่วนของแผ่นอุณหภูมิเนี่ยมตังแสดงด้วยลูกศร II หากเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่ใช้กระแสไฟเชื่อม 95 kA แล้วสาเหตุที่รอยต่อมีความแข็งแรงต่ำกว่า คือ พื้นที่การรับแรงของรอยต่อมีค่าน้อยกว่า อันเกิดจากอุณหภูมิเนี่ยมที่ถูกทำให้กระจายออกด้านนอก รอบข้างแนวเชื่อมที่มากกว่า อย่างไรก็ตามรอยเชื่อมที่กระแสไฟนี้แสดงค่าที่มีความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกับความแข็งแรงของแผ่นอุณหภูมิเนี่ยมเพราะแสดงการฉีกขาดในเนื้อของอุณหภูมิเนี่ยมตังแสดงด้วยลูกศร III การเพิ่มกระแสไฟเชื่อมมีค่าเท่ากับ 105 kA พบว่ารอยฉีกขาดมีรูปแบบใกล้เคียงกับรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 95 kA คือ มีการฉีกขาดรอบๆ แนวเชื่อมบริเวณแผ่นอุณหภูมิเนี่ยม แต่พื้นที่การฉีกขาด หรือพื้นที่รับแรงมีค่าน้อยกว่า จึงเป็นสาเหตุทำให้รอยต่อแสดงค่าต่ำกว่า



รูปที่ 4 ตำแหน่งและระยะการวัดรอยกด

รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งและระยะสำคัญของการวัดรอยเชื่อมด้านทานแบบจุดตาม มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น หมายเลข JIS Z31339 (JSA, 1978) โดยมีค่าสำคัญที่ต้องวัดคือ ความลึกของรอยกดด้านบน (a) ความลึกของรอยกดด้านล่าง อัตราส่วน (b) อัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยกด

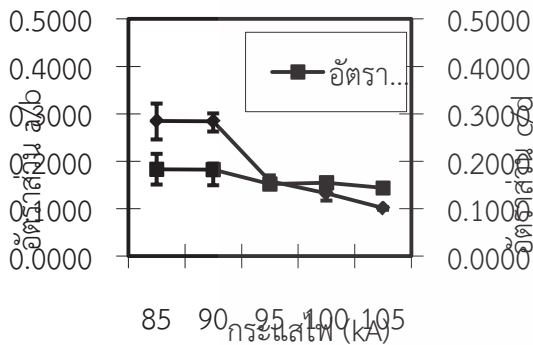
และความหนาแผ่นบน (a/b) และอัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยกดและความหนาแผ่นล่าง (c/d) ผลการตรวจสอบมีดังนี้



รูปที่ 5 ความลึกของรอยกด

รูปที่ 5 แสดงความลึกของรอยกดอิเล็กโทรดการเชื่อมด้านทานแบบจุดบนผิวรอยต่อภายใต้กระแสไฟต่างๆ พบว่ารอยกดที่เกิดขึ้นมีความลึกเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้น ความลึกของรอยกดที่เกิดขึ้นบนผิวของแผ่นเหล็กที่ถูกกำหนดไว้ด้านบนมีค่าประมาณ 0.1800 - 0.1200 มิลลิเมตร และมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 85 ถึง 105 kA เมื่อนำค่าความลึกของรอยกดไปเปรียบเทียบกับความลึกของรอยกดด้านแผ่นอุณหภูมิเนี่ยมที่ถูกกำหนดไว้ที่ด้านล่าง พบว่า ความลึกของรอยกดมีค่าสูงประมาณ 3.5000 - 3.6000 มิลลิเมตร ในการเชื่อมที่กระแสไฟ 85-90 kA ความลึกมีค่าของรอยกดมีค่าลดลงเมื่อ กระแสไฟเชื่อมมีค่าลดลงเช่นเดียวกันกับด้านแผ่นเหล็ก ผลความลึกของรอยกดที่วัดได้นี้เมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับค่าคุณภาพแนวเชื่อมด้านทานแบบจุดของผลิตภัณฑ์ยานยนต์ตาม มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น หมายเลข JIS Z31339 (JSA, 1978) พบว่าความลึกของรอยกดการเชื่อมด้านแผ่นอุณหภูมิเนี่ยมของกระแสไฟเชื่อม 85 และ 90 kA นั้นไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเนื่องจาก ความลึกของรอยกดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์การยอมรับ

ขณะที่ความลึกของรอยกุดของรอยต่อที่เชื่อมด้วย กระแสไฟ 95-105 kA นั้นมีค่าความลึกอยู่ในช่วง ระดับ C มีค่าความลึกของรอยกุดอยู่ที่ 0.1-0.3 มิลลิเมตร ผิวลักษณะนี้เป็นผิวรอยเชื่อมที่มีคุณภาพ ปานกลาง ต้องการการตกแต่งผิวก่อนสามารถ นำไปใช้งานได้เนื่องจากไม่พบการเกิดการแตกร้าว (Crack) ขึ้นในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม



รูปที่ 6 อัตราส่วนความลึกของรอยกุดบนผิวรอยต่อ เกยต่อความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่ กระแสไฟต่างๆ

ความลึกของรอยกุดของอิเล็กโทรดบนผิว รอยต่อเกยนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความ หนาของแผ่นวัสดุ เนื่องจากหากความลึกของรอยกุด มีค่ามากอาจทำให้แผ่นงานมีพื้นที่ในการรับแรง ลดลงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่าอัตราส่วนระหว่าง รอยกุดของอิเล็กโทรดบนผิวรอยต่อเกยต่อความหนา ของแผ่นโลหะ โดยกำหนดไว้ตาม JIS Z31339 ว่า อัตราส่วนนี้ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.3 รอยต่อเกยจึง สามารถนำไปใช้งานในระดับคุณภาพแนวเชื่อมที่ ยอมรับได้ ค่าอัตราส่วนอัตราส่วนระหว่างรอยกุด ของอิเล็กโทรดบนผิวรอยต่อเกยต่อความหนาของ แผ่นโลหะของการศึกษาครั้งนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 6 อัตราส่วนความลึกของรอยกุดบนผิวรอยต่อเกยต่อ ความหนาแผ่นโลหะของรอยต่อเกยที่กระแสไฟต่างๆ ที่พบว่าค่า อัตราส่วนความลึกของรอยกุดบนผิว รอยต่อเกยต่อความหนาแผ่นโลหะ มีค่าลดลงเมื่อ

กระแสไฟเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่กระแสไฟ 85 kA ควรหลีกเลี่ยงนำไปใช้งาน เนื่องจากค่า อัตราส่วน ความลึกของรอยกุดบนผิวรอยต่อเกยต่อความหนา แผ่นโลหะมีค่าใกล้เคียงค่าขีดจำกัดการยอมรับมาก เกินไป

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเชื่อมด้านทานแบบจุด

รอยต่อเกยระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1100 และ เหล็กกล้าเคลือบสังกะสีเกรด SGACD โดย ทำการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟที่มีผลต่อสมบัติ ของรอยต่อ ผลการศึกษาสำคัญมีดังนี้

- 1) การเชื่อมด้านทานแบบจุดสามารถทำให้เกิด รอยต่อเกยที่มีความสมบูรณ์
- 2) การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟเชื่อมทำให้ค่าความ แข็งแรงดึงเฉือนและการยึดตัวของรอยต่อ เกยมีค่าเพิ่มขึ้น
- 3) สภาพการเชื่อมที่แสดงค่าความแข็งแรงเฉือน สูงสุดประมาณ 2200 N และการยึดตัวของ รอยต่อเกย 2.8 มิลลิเมตร คือ กระแสไฟเชื่อม 95 kA เวลาเชื่อม 10 รอบ และแรงกด 0.1 MPa
- 4) ความลึกรอยกุดของอิเล็กโทรดการเชื่อม ด้านทานแบบจุดบนผิวหน้ารอยต่อเกยมีค่าลดลง เมื่อกระแสไฟมีค่าเพิ่มขึ้น
- 5) อัตราส่วนอัตราส่วนรอยกุดต่อความหนาของ แผ่นโลหะมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนงบประมาณ ประจำปี 2555 ในการดำเนินการวิจัย และ ขอขอบคุณ คุณอุบลวรรณ สุขไชย คุณเบญจพร เทว จินดา และคุณนัฐกาญจน์ คุ่มสุข สำหรับความ ช่วยเหลือทางเทคนิค

- Askeland, D.A. and Phule, P.P. 2006. **The Science and Engineering of Materials**. Singapore: Thomson Learning.
- Japanese Standard Association. 1978. **JIS Handbook: Welding 1**. Tokyo: Japanese Standard Association.
- Qiu, R., Shi, H., Zhang, K., Tu, Y., Iwamoto, C. and Satonaka, S. 2010. "Inter-facial characterization of joint bet-ween mild steel and aluminum alloy Welded by resistance spot welding." **Materials Characterization**. 61, 684-688.
- Qiu, R, Iwamoto, C. and Satonaka, S. 2009. "The Influence of reaction layer on the strength of aluminum/steel joint Welded by resistance spot welding." **Materials Characterization**. 60: 156-159.
- Qiu, R, Iwamoto, C. and Satonaka, S. 2009. "Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy joints Welded by resistance spot welding with cover plate." **J. of Materials Processing Technology**. 209, 4186-4193.
- Sun, X., Stephens, E.V., Khaleel, M.A., Shao, H. and Kimchi, M. 2004. "Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Materials-From Process to Performance-Part I: Experimental Study." **Welding Journal**. 84-6, 188s-195s.
- Vural, M., Akkus, A. and Eryurek, B. 2006. "Effect of Welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets." **J. of Materials Processing Technology**. 176, 127-132.