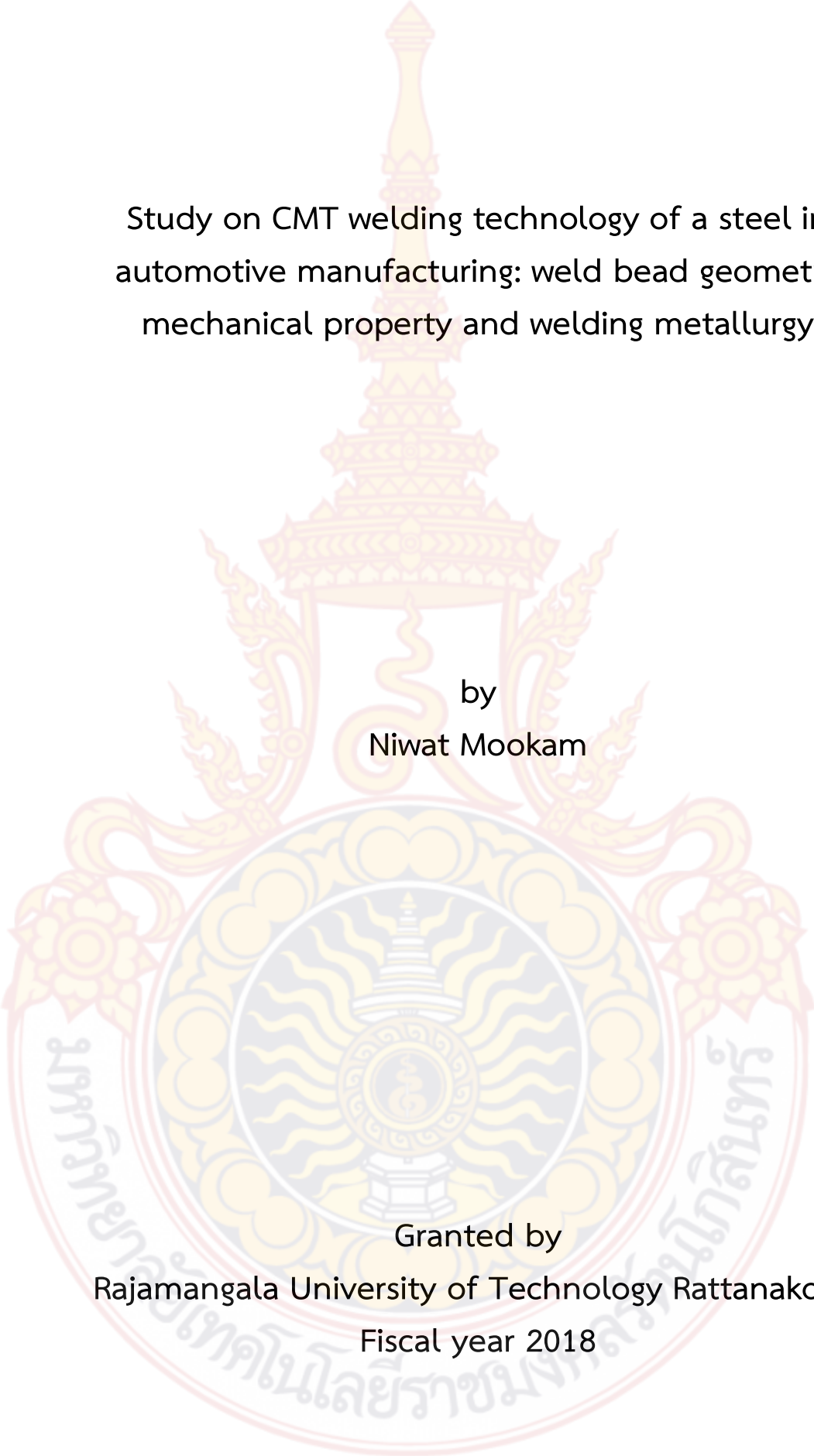




การศึกษาเทคโนโลยีการเชื่อม CMT ของเหล็กกล้าในการผลิต  
ชิ้นส่วนยานยนต์: รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม  
สมบัติทางกล และโลหะวิทยาการเชื่อม

โดย  
นิวัฒน์ มูแก้ม  
อุไรวรรณ พงสา  
ภูเมศวร์ แสงระยับ

สนับสนุนงบประมาณโดย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
ประจำปีงบประมาณ 2561



Study on CMT welding technology of a steel in  
automotive manufacturing: weld bead geometry  
mechanical property and welding metallurgy

by  
Niwat Mookam

Granted by  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
Fiscal year 2018

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาเทคโนโลยีการเชื่อม CMT ของเหล็กกล้าในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์: รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม สมบัติทางกล และโลหะวิทยาการเชื่อม มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษารูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อมจากการเชื่อม ได้แก่ ความสูง ความกว้างและการซึมลึก (2) ศึกษาสมบัติทางกลในแง่ ความต้านทานแรงดึง และความแข็งจุลภาค และ (3) ศึกษาโลหะวิทยาของรอยเชื่อมตลอดจนโครงสร้างผลึกและการจัดเรียงตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญด้านการเชื่อมโลหะในอุตสาหกรรมยานยนต์หรืออุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง สำหรับใช้เป็นแนวทางในการปรับตั้งเครื่องเชื่อม CMT และการใช้งานในกรณีประยุกต์ใช้สำหรับการเชื่อมโลหะแผ่นด้วยเทคโนโลยีการเชื่อมที่ทันสมัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

นิวัฒน์ มูเก็ม และคณะ

1 กันยายน 2561



## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : A-6/2561

ชื่อโครงการ : การศึกษาเทคโนโลยีการเชื่อม CMT ของเหล็กกล้าในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์:  
รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม สมบัติทางกล และโลหะวิทยาการเชื่อม

ชื่อนักวิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิวัฒน์ มูเก็ม ดร. อุไรวรรณ พงสา และนายภูเมศวร์ แสงระยับ

ในงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวัดรูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม สมบัติทางกลและโลหะวิทยาการเชื่อม เมื่อเหล็ก JIS G3113 เชื่อมด้วย CMT ในการศึกษาตัวแปรการเชื่อม ประกอบด้วย กระแสไฟฟ้า (10, 12, 14, 16, และ 18 V) และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม (25, 50, 75, 100, และ 125 mm/min) การทดลองดำเนินการโดยใช้เครื่องเชื่อม CMT ภายใต้บรรยากาศก๊าซคลูมอาร์กอน คุณภาพของชิ้นงานที่เชื่อมพิจารณาโดย ความสูง ความกว้าง การซึมลึก ความแข็งแรง และโครงสร้างจุลภาค

สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 12 V และความเร็วในการเชื่อมที่ 25 mm/min โดยสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมให้คุณภาพรูปทรงทางเรขาคณิตและและความแข็งแรงซึ่งผ่านข้อกำหนดของการผลิตและการตรวจสอบการเชื่อมเหล็กกล้าสำหรับยานยนต์ อย่างไรก็ตามความเร็วในการเชื่อมไม่มีอิทธิพลต่อรูปทรงทางเรขาคณิตขณะที่ความสูง ความกว้างและการซึมลึกมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน หลังการเชื่อมพบเฉพาสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_{0.9}Si_{0.1}$  ในโครงสร้างจุลภาค นอกจากนี้ลักษณะความขอบเรียงตัวของเกรนในระนาบเกิดขึ้นมากในระนาบ {100} พร้อมกับการเพิ่มความเค้นตกค้างในโครงสร้างจุลภาค

**คำสำคัญ:** การเชื่อม CMT/รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม/สมบัติทางกล/โลหะวิทยาการเชื่อม/  
องค์ประกอบทางเคมี

E-mail Address : niwat.moo@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ตุลาคม 2560 - 30 กันยายน 2561

## Abstract

**Code of project** : A-6/2561

**Project name** : Study on CMT welding technology of a steel in automotive manufacturing: weld bead geometry mechanical property and welding metallurgy

**Researcher name** : Asst. Prof. Niwat Mookam, Dr.Urainwan Pongsa and Mr.Phoometh Sangrayub

In this research, the objective was to investigate and measure the weld bead geometry, mechanical property, and welding metallurgy when JIS G3113 steel are welded using CMT. The study examines a number of welding variables, including weld current (10, 12, 14, 16, and 18 V), and weld travel speed (25, 50, 75, 100, and 125 mm/min). The experiment was run using a CMT welding machine under an argon atmosphere. The quality of welded specimens was determined by their weld bead height, bead width, penetration, strength and microstructure.

The optimal welding conditions were found to be 12 V of weld current and 25 mm/min of weld travel speed. The optimal welding conditions provided weld bead geometry and strength of quality which were able to pass the specifications of the making and inspecting welds on automotive steel. However, the welding travel speed no influence on the bead geometry, while the weld bead height, bead width and penetration exhibited a non-uniform pattern. After welding, only an  $Fe_{0.9}Si_{0.1}$  intermetallic compound was observed in the microstructures. In addition, the larger degree of preferred orientation was detected at the {100} plane with a increase residual strain in the microstructure.

**Keywords:** CMT welding/Weld bead geometry/Mechanical property/  
Welding metallurgy/Chemical composition

---

**E-mail Address** : niwat.moo@rmutr.ac.th

**Period of project** : 1 October 2017 – 30 September 2018

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญภาพ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	2
3. สมมติฐานของการวิจัย .....	2
4. ขอบเขตของโครงการวิจัย .....	3
5. นิยามศัพท์เฉพาะ .....	3
6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	4
7. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ .....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	5
1.1 การเชื่อม .....	5
1.2 การเชื่อมอาร์ก .....	5
1.3 การเชื่อมอาร์กโลหะกึ่งอัตโนมัติ .....	7
1.4 การถ่ายโอนโลหะ .....	8
1.5 กระแสเชื่อม .....	11
1.6 การเชื่อม CMT .....	12
1.7 หัวทูปเชื่อม.....	13
1.8 ลวดเชื่อม.....	13
1.9 การถ่ายโอนโลหะ.....	16
1.10 รอยต่อและรอยเชื่อม.....	20
1.11 โลหะวิทยาของรอยเชื่อม.....	20
1.12 คุณภาพของรอยเชื่อม .....	21
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	25
1. แผนการทดลองและลำดับการทดลอง .....	25
2. วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง.....	27

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. การตรวจสอบและการวัดผล .....	29
4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	34
1. รูปร่างของรอยเชื่อม .....	34
2. การตรวจสอบสมบัติเชิงกล.....	47
2.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึง.....	47
2.2 ความแข็งจุลภาค.....	50
2.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึก .....	51
2.4 โครงสร้างจุลภาคและการจัดเรียงตัวของผลึก.....	52
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	63
1. สรุปผลการวิจัย .....	63
2. ข้อเสนอแนะ .....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก .....	67
ประวัติผู้วิจัย.....	77



## สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
1 การเชื่อมอาร์ก.....	6
2 การเชื่อมอาร์กโลหะกึ่งอัตโนมัติ.....	8
3 การถ่ายโอนโลหะแบบต่างๆ.....	9
4 การถ่ายโอนโลหะแบบหยด.....	9
5 การถ่ายโอนแบบลัดวงจร.....	10
6 การถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์.....	11
7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับความเร็วในการป้อนลวด.....	11
8 รูปแบบของกระแสเชื่อมแบบพัลส์.....	12
9 เครื่องเชื่อม CMT.....	12
10 หัวเชื่อม.....	13
11 หัวทูปเชื่อม.....	13
12 ลวดเชื่อม.....	14
13 รูปร่างของรอยเชื่อมจากการใช้ก๊าซคลุมที่แตกต่างกัน.....	16
14 รอยต่อ.....	20
15 ลักษณะของรอยต่อที่ผ่านการเชื่อมแบบการเชื่อมหลอม.....	20
16 ประเภทของตำหนิในรอยต่อ.....	22
17 เหล็กกล้า JIS G3113.....	27
18 เครื่องเชื่อม CMT.....	27
19 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	28
20 เต้าเดินราง.....	28
21 ออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน.....	28
22 เครื่องสแกน 3 มิติ.....	29
23 เครื่อง Wire – EDM ยี่ห้อ Mitsubishi.....	29
24 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	29
25 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์.....	30
26 เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ.....	31
27 เครื่องขัดชิ้นงานทดสอบ.....	31
28 การกัดกรดผิวชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	32
29 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	32
30 เครื่องทดสอบความแข็ง.....	32
31 ตำแหน่งตรวจสอบความแข็งจุลภาค.....	33
32 เครื่อง XRD.....	33
33 ความสูงของแนวเชื่อม.....	45



## สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
34 ความกว้างของแนวเชื่อม .....	45
35 ความสูงของแนวเชื่อม .....	46
36 รูปร่างภาคตัดขวางและการซึมลึกของรอยเชื่อม .....	46
37 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง .....	47
38 ค่าความต้านทานแรงดึงที่กระแสไฟฟ้าและความเร็วในการเชื่อม .....	48
39 ผลการทดสอบชิ้นงานความต้านทานแรงดึงสูงสุด .....	48
40 ชิ้นงานความต้านทานแรงดึงสูงสุด .....	49
41 ผลการทดสอบชิ้นงานความต้านทานแรงดึงต่ำสุด .....	49
42 ชิ้นงานความต้านทานแรงดึงต่ำสุด .....	50
43 ผลการทดสอบความแข็งจุลภาคที่กระแสเชื่อม 10 V ชิ้นที่มีความต้านทานสูงสุด .....	50
44 ผลการทดสอบความแข็งที่กระแสเชื่อม 18 V ชิ้นที่มีความต้านทานต่ำสุด .....	51
45 ผลการตรวจสอบ XRD .....	51
46 โครงสร้างจุลภาค .....	52
47 บริเวณที่ตรวจสอบด้วย EBSD .....	52
48 รูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึกสำหรับแสดงในโครงสร้างจุลภาค .....	53
49 การจัดเรียงตัวของผลึก .....	53
50 IPF การจัดเรียงตัวและขององค์ประกอบทางเคมีในระนาบและแกนต่าง .....	59
51 การแปรรูปและเกิดผลึกใหม่ .....	60
52 ขอบเกรน .....	60
53 CSL .....	61
54 ความเครียดที่เกิดขึ้น .....	62
55 ความเครียดที่เกิดขึ้น .....	62

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 กลุ่มรหัสของลวดเชื่อมแต่ประเภทตามมาตรฐาน AWS.....	15
2 การอกรหัสเป็นทั้งตัวอักษร และที่เป็นแบบตัวเลข ควบคู่กัน .....	15
3 ข้อดีและข้อเสียของก๊าซอาร์กอนเมื่อเทียบกับก๊าซฮีเลียม .....	17
4 ข้อดีและข้อเสียของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ .....	18
5 การประยุกต์ใช้ก๊าซปกคลุมกับวัสดุแบบต่างๆ .....	19
6 ตัวแปรและระดับที่ใช้ในการทดลอง .....	25
7 ลำดับการทดลอง.....	26
8 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8-04.....	30
9 แนวเชื่อมจากการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อม CMT มีระดับและตัวแปรแตกต่างกัน .....	34
10 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมโดยเครื่องสแกน 3 มิติ .....	38
11 ผลของการสแกนตรวจสอบขนาดความสูงและความกว้างของรอยเชื่อม.....	42
12 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม .....	47
13 คิคุชิของชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและต่ำสุดของการจัดเรียงตัวในผลึก .....	54
14 PF ของตัวอย่าง .....	58



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมยานยนต์มีการพัฒนาด้านกระบวนการผลิตและวัสดุอย่างต่อเนื่อง จากการพัฒนาเทคโนโลยีและเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า อีกทั้งสำนักงานมาตรฐานแห่งชาติ (National Standards Setting Bodies; NSBs) มีการกำหนดระเบียบเกี่ยวกับการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง หรือเรียกว่า CAFE (Corporate Average Fuel Economy) และการลดปริมาณการปล่อยก๊าซที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกจากการใช้พลังงาน กับการกำหนดของ NSBs มีการมุ่งประเด็นที่แตกต่างกัน เช่น ในยุโรป มาตรฐาน DIN และ CEN (The French Creative Environmental Network) มุ่งประเด็นด้านระบบความปลอดภัยและมาตรฐานในรถยนต์ ขณะที่สหรัฐอเมริกา สำหรับ ANSI (American National Standards Institute) มุ่งประเด็นด้านสมรรถนะยานยนต์ เพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าวจึงผลิตรถยนต์ให้มีขนาดเล็กหรือมีการใช้วัสดุน้ำหนักเบาในยานพาหนะเพื่อนำไปสู่การประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง ลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้และการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์ [1] อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศจีนได้มีการกระตุ้นให้มีการพัฒนา วัสดุ เช่น เหล็ก พลาสติก ยางและวัสดุอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้น และการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงช่วยในการผลิตทั้งนี้ต้องคำนึงถึงการประหยัดพลังงานและการลดมลภาวะที่มีต่อสิ่งแวดล้อม [2] ดังนั้นสำหรับการผลิตรถยนต์หนึ่งคันมีปริมาณเหล็กกล้าประกอบอยู่มากและเพื่อลดน้ำหนักของรถยนต์ เหล็กกล้าแผ่นบางจึงใช้เป็นส่วนประกอบต่างๆในรถยนต์ ได้แก่ ประตู กระโปรงหน้ารถ หลังคา ตลอดจนชิ้นส่วนตกแต่งอื่นๆ เหตุผลสำคัญสำหรับการใช้เหล็กกล้าเป็นส่วนประกอบตลอดจนโครงสร้างของรถยนต์ เนื่องจากเหล็กกล้ามีความสามารถซึมซับพลังงานการกระแทกจากการชนของรถยนต์ได้ดี มีความแข็งแรง รวมกับความสามารถด้านการเชื่อมต่อ ตลอดจนการขึ้นรูปที่ดีและเหล็กกล้ามีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นจึงเป็นวัสดุตัวเลือกลำดับแรกสำหรับใช้ในรถยนต์ [3, 4]

กับการใช้เหล็กกล้าในรถยนต์ผนวกกับเทคโนโลยีการต่อวัสดุจึงเป็นสิ่งที่สำคัญกับอุตสาหกรรมยานยนต์เพื่อเชื่อมประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน การเชื่อมหลอม (Fusion welding) ใช้กันมากแต่เป็นวิธีที่กระทบกับเหล็กกล้ามากทำให้ประสิทธิภาพของรอยต่อที่หลอมละลายเสียหายได้เนื่องจากโครงสร้างเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงจากความร้อนและระหว่างกระบวนการเย็นตัว [5] การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมเป็นวิธีที่พบมากในอุตสาหกรรมยานยนต์สำหรับใช้เชื่อมต่อเหล็กกล้าชิ้นส่วนในโครงสร้างรถยนต์ [6] เช่น การเชื่อมมิก (MIG welding) สามารถเชื่อมโลหะแผ่นบางได้ดีแต่ยังคงมีอัตราการสะสมความร้อนสูง เนื่องจากพลังงานที่สูงระหว่างเชื่อมซึ่งสามารถทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพได้ เช่น การซึมลึก (Deep penetration) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ที่เกิดจากการสะสมความร้อน สำหรับการเชื่อมแบบ Cold metal transfer (CMT) เป็นเทคโนโลยีการเชื่อมดิจิทัลอินเวอร์เตอร์ที่พัฒนามาจากการเชื่อมมิกซึ่งมีการควบคุมการถ่ายโอนหยดของเหลวจากโลหะเติมที่ป้อนไปยังชิ้นงานเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆของการเชื่อมทำให้สามารถลดการเกิดความร้อนสะสมได้ดีกว่าการเชื่อมมิก ซึ่งพลังงานความร้อนที่ต่ำยังสามารถยับยั้งการเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่มี

ความเปราะได้ ระหว่างการเชื่อมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอยเชื่อมและโลหะที่สำคัญมีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวัสดุ ความเค้นตกค้าง (Residual stresses) ขนาดและรูปร่างจากการเชื่อม [7] เทคโนโลยีการเชื่อม CMT เป็นทางเลือกที่สามารถลดการเกิดตำหนิและให้คุณลักษณะของการเชื่อมที่ดี เช่น ไม่เกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) สารฝังใน (Solid inclusions) รอยร้าว (Crack) ช่องว่าง (Cavities) มีการหลอมเหลวที่สมบูรณ์ (Complete fusion) มีพลังงานความร้อนที่เสถียร สามารถควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดได้ดีและให้อัตราการผลิตสูง [7, 8]

ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอการใช้เทคโนโลยีการเชื่อมแบบ CMT สำหรับการเชื่อมโลหะแผ่นบางตามมาตรฐาน JIS G3113 พิจารณาด้านกระแสไฟฟ้าและความเร็วในการเชื่อม โดยวิเคราะห์และตรวจสอบ คือ (1) รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม (Weld bead geometry) ได้แก่ ความสูง (Bead height) ความกว้าง (Bead width) และการซึมลึก (Bead penetration) (2) สมบัติทางกล (Mechanical property) ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งจุลภาค (Microhardness) (3) โลหะวิทยาของรอยเชื่อม ประกอบด้วย โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึก เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนยานยนต์

## 2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

2.1 ศึกษารูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อมจากการเชื่อม CMT ได้แก่ ความสูง (Bead height) ความกว้าง (Bead width) และการซึมลึก (Bead penetration)

2.2 ศึกษาสมบัติทางกลในแง่ ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งจุลภาค (Microhardness)

2.3 ศึกษาโลหะวิทยาของรอยเชื่อม ได้แก่ โครงสร้างจุลภาค บริเวณหลอมเหลว (Fusion zone) บริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) และบริเวณโลหะพื้น (Base metal zone)

2.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบทางเคมีของรอยเชื่อม

## 3. สมมุติฐานของการวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตและประกอบชิ้นส่วนยานยนต์ได้มีการใช้วัสดุชนิดอื่นๆเพื่อทดแทนการใช้เหล็กกล้าในรถยนต์ เพื่อตอบสนองความต้องการการลดน้ำหนักของรถยนต์ซึ่งนำไปสู่การลดการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงของรถและลด CO<sub>2</sub> จากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามมีหลายส่วนประกอบที่ยังคงต้องใช้เหล็กเพื่อให้รถยนต์มีความแข็งแรงและความปลอดภัยกับผู้ขับขี่ โดยการใช้เหล็กแผ่นบางที่มีความแข็งแรง สำหรับยานพาหนะหนึ่งคันมีจุดเชื่อมประกอบมากกว่า 5,000 จุด จากการใช้เหล็กกล้า ซึ่งในการต่อจะเชื่อมโดยใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมในการเชื่อมจากการประยุกต์ใช้การเชื่อมมิกเดินแนวเชื่อม มีบริเวณกระทบร้อนที่กว้างและเกิดบริเวณกระทบร้อนกับรอยต่อซึ่งสามารถเกิดความเสียหายกับรอยเชื่อมต่อได้ [1, 2, 4] และเป็นที่ยอมรับสำหรับการเชื่อมหลอมแบบดั้งเดิมและการเชื่อมมิกอุณหภูมิที่สูงจากระบวนการนำไปสู่การขยายตัวจากความร้อน เกิดความเค้นภายใน และความร้อนมีผลกระทบต่อคุณลักษณะด้านรูปร่างและโลหะวิทยาจากการเชื่อม [3]

โดยในงานวิจัยของ Májlínger และคณะ [6] ได้แสดงให้เห็นการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม สำหรับใช้เชื่อมเหล็กกล้าชิ้นส่วนในรถยนต์ จากการเชื่อมทำให้เกิดบริเวณกระทบร้อนมีเกรนที่โต เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลในแง่ความต้านทานแรงดึง สำหรับ Talataeva และคณะ [7] ได้แสดงให้เห็นการเชื่อมทิก (TIG welding) จะให้อัตราการเชื่อมที่ช้ากว่าการเชื่อมมิก (MIG welding) ระหว่างการเชื่อมทั้งสองแบบเกิดช่องว่างขนาดเล็ก (Porosity) และการบิดเบี้ยวของชิ้นงานและแสดงให้เห็นถึงการเชื่อมโลหะแผ่นบางผลของกระแสไฟฟ้าและความเร็วในการเชื่อมเป็นปัจจัยที่สำคัญ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Vázquez และคณะ [8] แสดงให้เห็นถึงการได้รับผลกระทบจากความร้อนซึ่งเกิดจากการอาร์กโดยพลาสมาบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ทำให้บริเวณการเชื่อมเกิดโครงสร้างคาร์ไบด์ที่มีความแข็ง โดยความเร็วและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปล่อยล้าพลาสมาบนเหล็กกล้ามีผลต่อการหลอมละลายของชิ้นงานและให้รูปร่างจากการเชื่อมแตกต่างกันเช่น สำหรับความกว้าง ความสูงและการซึมลึกของรอยเชื่อมจะลดลงจากการเพิ่มความเร็วในการเชื่อม [9] ดังนั้นความร้อนในกระบวนการจะลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นการเชื่อมด้วยวิธีต่างๆ อิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ ขึ้นอยู่กับการปรับตั้งปัจจัยในการเชื่อม โดยเฉพาะความเร็วและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม ดังนั้นทั้งสองปัจจัยจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญกับภาคอุตสาหกรรมในการนำไปใช้งาน ซึ่งต้องมีการควบคุมความเร็วในการเดินเชื่อม เช่น ผ่านหุ่นยนต์อุตสาหกรรมหรือชุดเดินแนวอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามสำหรับปัจจัยอื่น ๆ ยังคงควบคุมผ่านเครื่องเชื่อม ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จึงให้ความสำคัญกับปัจจัยกระแสไฟฟ้าและความเร็วในการเดินเชื่อมซึ่งมักจะเป็นปัญหาที่สำคัญในภาคอุตสาหกรรมการผลิตเช่นกัน เพื่อศึกษาผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการ สำหรับเป็นองค์ความรู้และข้อมูลที่สำคัญกับภาคอุตสาหกรรมต่อไป ตลอดจนในงานวิจัยก่อนหน้านี้ยังไม่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความเร็วและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมที่มีต่อรูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม สมบัติทางกลและโลหะวิทยาการเชื่อมจากการใช้เทคโนโลยี CMT ในการเชื่อมเหล็กกล้าดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง กับภาคอุตสาหกรรม

#### 4. ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 4.1 ในการทดลองใช้เหล็กแผ่นตามมาตรฐาน JIS G3113 ขนาด 10x10x0.15 cm เป็นโลหะพื้น
- 4.2 ใช้โลหะเติมแบบลวดเปลือยตามมาตรฐาน AWS ER70-G3/4Si ขนาด 0.8 mm
- 4.3 ใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) ปกคลุมแนวเชื่อม
- 4.4 เดินเชื่อมแบบท่าราบและควบคุมการเดินเชื่อมด้วยชุดควบคุมอัตโนมัติ
- 4.5 ตรวจสอบและทดสอบรูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม สมบัติทางกลและโลหะวิทยาของรอยเชื่อม

#### 5. นิยามศัพท์เฉพาะ

- 5.1 การเชื่อม (Welding) คือ กระบวนการเชื่อมประสานวัสดุเข้าด้วยกัน โดยที่ชิ้นงานตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปถูกทำให้เป็นชิ้นเดียวกันที่ผิวสัมผัสโดยการใช้ความร้อน ความดันที่เหมาะสม

5.2 รอยต่อ (Joints) คือ จุดรวมของขอบหรือผิวภายนอกของชิ้นงานที่ถูกเชื่อมประสานเข้าด้วยกันโดยกระบวนการเชื่อมแบบใดแบบหนึ่ง

5.3 อิเล็กโทรดสิ้นเปลือง (Consumable electrodes) คือ อิเล็กโทรดที่มีการใช้แล้วหมดไประหว่างที่มีการอาร์ก หรือมีการเชื่อมเกิดขึ้นและตัวของอิเล็กโทรดก็จะถูกหลอมละลายรวมอยู่ในรอยเชื่อม

5.4 การเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม (Gas metal arc welding: GMAW) คือ การเชื่อมอาร์กใช้อิเล็กโทรดสิ้นเปลืองแบบลวดเปลือย ไม่ได้หุ้มด้วยสารเคมี การปกป้องรอยเชื่อมจะใช้ก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่ง ลวดเชื่อมจะถูกป้อนอย่างต่อเนื่องเข้าไปในรอยเชื่อมโดยเครื่องป้อนอัตโนมัติ

5.5 คุณภาพของรอยเชื่อม (Weld quality) คือ ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม

5.6 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) คือ โครงสร้างของวัสดุในระดับไมโครเมตร

## 6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

ผลงานวิจัยและองค์ความรู้ที่ได้สามารถนำมาตีพิมพ์เผยแพร่ได้ทั้งวารสารวิชาการทั้งในระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งผลการวิจัยจะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการพัฒนาการเชื่อมวัสดุ และเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญกับภาคอุตสาหกรรม ที่สำคัญองค์ความรู้จากงานวิจัย สามารถนำไปใช้กับการเรียนการสอนในราย วิชาวิศวกรรมกรรมการเชื่อม ทั้งภาคทฤษฎีและปฏิบัติที่ผู้วิจัยได้รับมอบหมายให้เป็นอาจารย์ประจำวิชา เพื่อผลิตบัณฑิตนักปฏิบัติด้านการต่อวัสดุและโลหะวิทยาการเชื่อมออกสู่สถานประกอบการ

## 7. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

หน่วยงานวิจัยที่นำไปใช้ประโยชน์ คือ ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์และการต่อวัสดุ เป็นต้น

อีกทั้งประโยชน์ที่ได้รับจากผลงานวิจัยและองค์ความรู้ที่ได้สามารถนำมาตีพิมพ์เผยแพร่ได้ทั้งการประชุมวิชาการ และวารสารวิชาการทั้งในระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งผลการวิจัยจะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการเชื่อมวัสดุ และเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญกับภาคอุตสาหกรรมสำหรับการพัฒนากระบวนการเชื่อม

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเนื้อหาส่วนนี้จะทำให้ทราบถึงทฤษฎีต่างๆที่นำมาใช้ประกอบการวิจัย ตลอดจนผลการวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

### 1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 1.1 การเชื่อม (Welding)

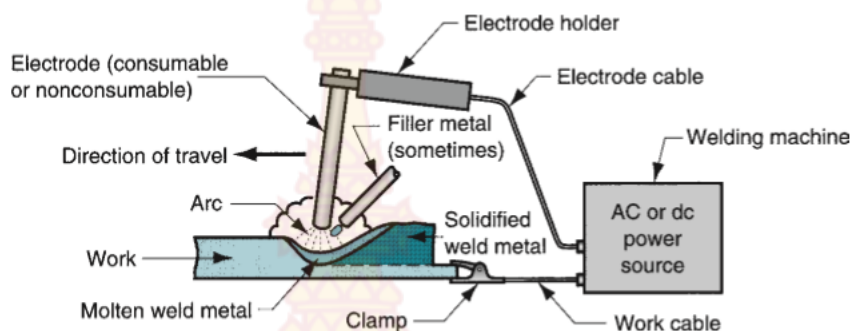
การเชื่อม หมายถึง กระบวนการเชื่อมประสานวัสดุเข้าด้วยกัน โดยที่ชิ้นงานตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปถูกทำให้เป็นชิ้นเดียวกันที่ผิวสัมผัสโดยการใช้ความร้อน ความดันที่หรือใช้ร่วมกัน ข้อดีของการเชื่อมมีหลายประการด้วยกัน เช่น ให้อายุต่อถาวรเนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมจะกลายเป็นชิ้นเดียวกัน รอยเชื่อมที่ได้อาจจะมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุที่เป็นชิ้นงานตั้งต้น (Parent materials) การเชื่อมเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายน้อยเนื่องจากวัสดุที่จำเป็นต้องใช้ในการเชื่อมมีปริมาณค่อนข้างน้อย และไม่จำกัดว่าจะต้องทำการเชื่อมภายในโรงงานเท่านั้น ส่วนข้อดีของการเชื่อมมีหลายประการด้วยกัน เช่น ถ้าเป็นการเชื่อมด้วยคนจำเป็นจะต้องใช้ช่างเชื่อมที่มีฝีมือ ซึ่งช่างเชื่อมที่มีฝีมือคืออาจมีค่าแรงสูงมาก การเชื่อมเป็นกระบวนการที่อันตรายเพราะใช้พลังงานสูง ภายหลังจากเชื่อมเกิดขึ้นแล้วเป็นการยากที่จะแยกชิ้นงานนั้นออกจากกันอีก และยากต่อการตรวจสอบหาความบกพร่องที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อม [10]

##### 1.1.1 ประเภทของกระบวนการเชื่อม

การเชื่อมสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่มด้วยกัน คือ (1) การเชื่อมหลอม (Fusion welding) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้ความร้อนทำให้ชิ้นงานโลหะที่เชื่อมเกิดการหลอมเหลวจะมีการเติมโลหะเติม (Filler metal) ลงไปในรอยเชื่อมด้วย และ (2) การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid-state welding) เป็นกระบวนการเชื่อมประสานวัสดุให้เป็นชิ้นเดียวกันโดยไม่เกิดการหลอมเหลวของชิ้นงาน และโดยปกติแล้วจะไม่ใช้โลหะเติมในการเชื่อมในสภาวะของแข็งประเภทต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ทดลองโดยใช้กระบวนการในกลุ่มแรก

#### 1.2 การเชื่อมอาร์ก

การเชื่อมอาร์ก (Arc welding) เป็นกระบวนการเชื่อมหลอมชนิดหนึ่งที่เกิดจากการเชื่อมกันของโลหะเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการอาร์กทางไฟฟ้า (Electric arc) ระหว่างอิเล็กโทรด (Electrode) และชิ้นงาน ซึ่งการอาร์กทางไฟฟ้า คือ การปลดปล่อย (Discharge) ของกระแสไฟฟ้าข้ามช่องว่างเล็กๆ ในวงจรไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าจากการอาร์กสามารถทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงถึง 5500 °C หรือสูงกว่านั้น ซึ่งเพียงพอสำหรับการหลอมละลายโลหะทุกชนิด โลหะเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมจะเกิดจากทั้งโลหะชิ้นงานและโลหะเติม (ถ้ามีการใช้งาน) การเติมโลหะเติมลงไปในรอยเชื่อมทำให้รอยเชื่อมนั้นมีปริมาตรและความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ภาพที่ 1 แสดงการเชื่อมอาร์ก



ภาพที่ 1 การเชื่อมอาร์ก [11]

การเชื่อมอาร์กสามารถทำได้โดยใช้คน (Manual) และใช้เครื่องจักร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิต (Productivity) ของการเชื่อมอาร์กเป็นอย่างมาก โดยที่อัตราการผลิตของการเชื่อมอาร์กจะวัดโดยตัวแปรที่เรียกว่า เวลาอาร์ก (Arc time) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างเวลาของการอาร์กทั้งหมดต่อเวลาการทำงานทั้งหมด โดยปกติแล้วถ้าเป็นการเชื่อมด้วยคน เวลาอาร์กจะมีค่าประมาณ 20% และถ้าเป็นการเชื่อมด้วยเครื่องจักร เวลาอาร์กจะมีค่าประมาณ 50%

### 1.2.1 องค์ประกอบของการเชื่อมอาร์ก

องค์ประกอบของการเชื่อมอาร์กที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งพลังงาน อิเล็กโทรด และการปกป้องการอาร์ก สำหรับแหล่งพลังงาน (Power source) พลังงานไฟฟ้าคือแหล่งพลังงานที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการเชื่อมอาร์ก ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แหล่งพลังงานที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะให้การอาร์กที่ดีกว่าแหล่งพลังงานที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังสามารถใช้เชื่อมโลหะได้ทุกชนิด ในขณะที่แหล่งพลังงานที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับใช้เชื่อมได้เฉพาะโลหะในกลุ่มเหล็ก (Ferrous metals) แต่จะมีราคาเครื่องจักรที่ต่ำกว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$H_{wr} = U_m A_w v = f_1 f_2 H_r \quad (1)$$

เมื่อ  $H_r = IE$  โดยที่  $I$  คือ กระแสไฟฟ้า และ  $E$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า

อิเล็กโทรด (Electrodes) มีการใช้งานอิเล็กโทรดในการเชื่อมอาร์กอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน คือ อิเล็กโทรดสิ้นเปลืองและอิเล็กโทรดไม่สิ้นเปลือง

อิเล็กโทรดสิ้นเปลือง (Consumable electrodes) หมายถึง อิเล็กโทรดที่มีการใช้แล้วหมดไประหว่างที่มีการอาร์ก หรือมีการเชื่อมเกิดขึ้นและตัวของอิเล็กโทรดก็จะถูกหลอมละลายรวมอยู่ในรอยเชื่อม ดังนั้นในกรณีนี้อิเล็กโทรดจึงทำหน้าที่เป็นโลหะเติมด้วย โดยทั่วไปแล้วอิเล็กโทรดชนิดนี้จะอยู่ในรูปของแท่ง (Rods หรือ Sticks) หรือลวด (Wire) แต่การใช้อิเล็กโทรดแบบแท่งจะให้อัตราการผลิตต่ำกว่าการใช้อิเล็กโทรดแบบลวดเนื่องจากต้องเสียเวลาในการเปลี่ยนแท่งอิเล็กโทรดใหม่บ่อยๆ ระหว่างการเชื่อม

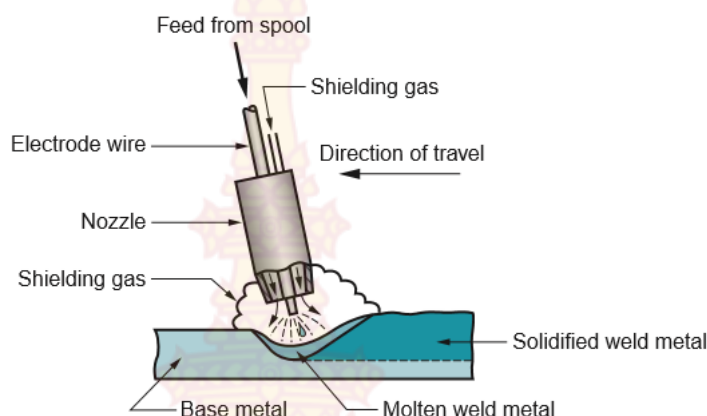


อิเล็กโทรดไม่สิ้นเปลือง (Non-consumable electrodes) โดยทั่วไปแล้ว อิเล็กโทรดชนิดนี้ทำมาจากทังสเตน (Tungsten) หรือในบางครั้งอาจพบว่าทำมาจากคาร์บอน (Carbon) ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดสามารถทนต่อการหลอมเหลวเนื่องจากการอาร์กได้ดี แต่ในทางปฏิบัติ อิเล็กโทรดชนิดนี้ก็มีกรสึกกร่อนไปตามอายุการใช้งานอย่างช้าๆ ระหว่างกระบวนการเชื่อม ซึ่งการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดชนิดนี้จะเกิดจากการระเหยกลายเป็นไอ ในการใช้อิเล็กโทรดชนิดนี้สามารถเติมโลหะเติมลงไปในรอบเชื่อมได้เช่นเดียวกัน ซึ่งปกติจะใช้โลหะเติมในรูปของลวดสำหรับกรณีนี้

การป้องกันการอาร์ก (Arc shielding) เนื่องจากการเชื่อมอาร์กเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นโลหะที่กำลังเชื่อมจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับ ออกซิเจน ไนโตรเจนและไฮโดรเจน ในอากาศได้ง่ายมาก ปฏิกิริยาทางเคมีเหล่านี้ทำให้คุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมลดต่ำลง จึงจำเป็นต้องป้องกันการอาร์กไม่ให้สัมผัสกับอากาศโดยปกคลุมปลายของอิเล็กโทรดส่วนที่กำลังอาร์กและรอยเชื่อมเหลวๆ ด้วยก๊าซบางชนิดหรือฟลักซ์ (Flux) หรือทั้งสองอย่างก๊าซที่ใช้ปกคลุม (Shielding gases) ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ อาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ส่วนฟลักซ์นั้นเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดออกไซด์ (Oxides) หรือสารปนเปื้อน (Contaminants) กับรอยเชื่อม หรือทำหน้าที่กำจัดสารเหล่านี้ออกไปจากรอยเชื่อมในระหว่างการเชื่อมฟลักซ์จะเกิดการหลอมละลายและปกคลุมรอยเชื่อมเอาไว้และเมื่ออุณหภูมิลดลงฟลักซ์ก็จะกลายเป็นของแข็งเกาะอยู่บนผิวหน้าของรอยเชื่อม โดยปกติแล้วฟลักซ์จะมีหน้าที่หลักๆ ดังนี้ (1) ปกป้องการเชื่อม (2) ทำให้อาร์กเสถียรขึ้น และ (3) ลดการกระเด็นของโลหะเหลว ในการเชื่อมอาร์กมีการใช้ฟลักซ์หลายวิธีด้วยกัน เช่น (1) เเทลงบนพื้นผิวที่ต้องการเชื่อม (2) พอกไว้บนอิเล็กโทรด และ (3) ทำเป็นไส้อิเล็กโทรด วัสดุที่ใช้ทำฟลักซ์ ได้แก่ ผงของเนื้อไม้ หรือ ฝ้าย และรวมกับสารเคมีอื่นๆ เช่น สารเคมีจำพวกคาร์บอเนต (Carbonate) หรือ ซิลิเกต (Silicate)

### 1.3 การเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม (Gas metal arc welding: GMAW)

การเชื่อมอาร์ก ชนิดนี้ใช้อิเล็กโทรดสิ้นเปลืองแบบลวดเปลือย ไม่ได้หุ้มด้วยสารเคมี การปกป้องรอยเชื่อมจะใช้ก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่ง ลวดเชื่อมจะถูกป้อนอย่างต่อเนื่องเข้าไปในรอยเชื่อมโดยเครื่องป้อนอัตโนมัติดังแสดงดังภาพที่ 2 ขนาดของลวดเชื่อมจะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานที่กำลังเชื่อมและอัตราในการเชื่อม ก๊าซที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่กำลังเชื่อม เช่น ถ้าเป็นการเชื่อมโลหะผสมของอลูมิเนียม (Aluminum alloys) หรือเหล็กกล้าไร้สนิม จะใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือฮีเลียม (He) ถ้าเป็นการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือคาร์บอนปานกลาง (Low carbon steels หรือ Medium carbon steels) ก็จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) การเชื่อมชนิดนี้อาจจะรู้จักกันในชื่ออื่นด้วย เช่น การเชื่อมมิก (Metal inert gas (MIG) welding) ซึ่งหมายถึง การเชื่อมที่ใช้กับอลูมิเนียมและใช้อาร์กอนในการปกป้องรอยเชื่อม หรือการเชื่อมคาร์บอนไดออกไซด์คลุม (CO<sub>2</sub> welding) ซึ่งหมายถึง การเชื่อมเหล็กกล้าโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการปกป้องรอยเชื่อม นอกจากนี้ก๊าซผสมระหว่างก๊าซดังกล่าวข้างต้นก็สามารถใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าได้ โดยทั่วไปแล้ว การเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุมจะใช้กับการเชื่อมโลหะทั้งในและนอกกลุ่มเหล็ก ใช้กับการเชื่อมเครื่องจักรได้ดี ให้อัตราผลิตสูง และให้รอยเชื่อมที่สะอาดเนื่องจากไม่มีการใช้ฟลักซ์

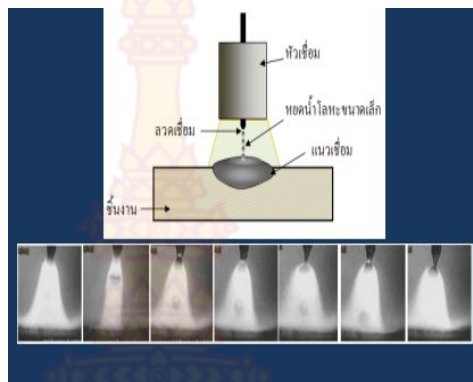


ภาพที่ 2 การเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซคลุม [11]

#### 1.4 การถ่ายโอนโลหะ (Metal Transfer)

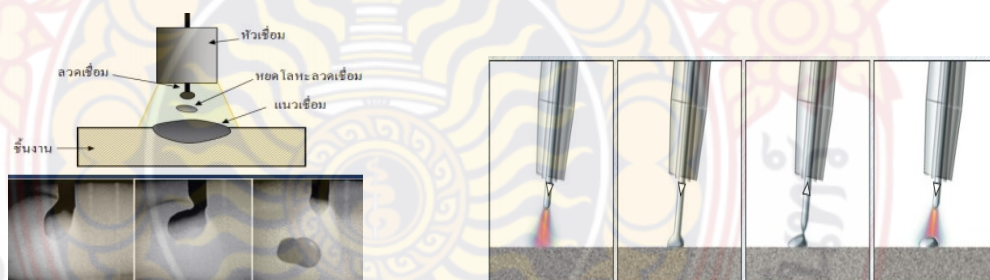
การถ่ายโอนโลหะ (Metal Transfer) หมายถึง การที่โลหะหลวดยึดเชื่อมหลอมเป็นหยดและหลุดออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านการอาร์คเข้าสู่บ่อหลอมละลายบนโลหะชิ้นงาน ซึ่งการถ่ายโอนให้ได้หยดของโลหะจะเกิดจากแรงที่กระทำต่อหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อมโดยปฏิกิริยาและขนาดของลวดเชื่อม (Plasma Arc) ความเร็ว (Velocity) แรงโน้มถ่วง (Gravity) แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Force) และพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการถ่ายโอนน้ำโลหะที่แตกต่างกันออกไปทำให้เกิดรูปแบบการถ่ายโอนโลหะลักษณะต่างๆ ดังนี้

การถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์ (Spray Transfer) กระบวนการแบบถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์ จะเกิดจากการหลอมของปลายลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะขนาดเล็ก การถ่ายโอนจะเริ่มขึ้นเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมละลายแล้วก่อตัวเป็นหยดโลหะขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม หยดโลหะจะเร็วเล็กน้อยตรงส่วนที่ต่ออยู่ระหว่างปลายลวดเชื่อมและหยดโลหะนี้จะถูกแยกตัวหรือถูกบีบให้หลุดออกจาก (Pinched-Off) ปลายลวดเชื่อมด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า หยดโลหะถูกถ่ายโอนอย่างรวดเร็วผ่านพลาสมาอาร์คลงสู่บ่อหลอมเหลวอย่างคงที่และต่อเนื่องตลอดเวลาที่กระแสเชื่อมยังไหลผ่านลวดเชื่อมอยู่ ปริมาณหยดโลหะที่ถ่ายโอนอาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าเป็นหลายร้อยหยดในเวลาหนึ่งวินาที กระบวนการถ่ายโอนแบบสเปรย์ต้องใช้ความเข้มของกระแสเชื่อมสูง เพื่อลวดเชื่อมจะได้หลอมเป็นหยดขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมอย่างรวดเร็ว หยดที่มีขนาดเล็กนี้จะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของการอาร์ค การไหลพุ่งของหยดโลหะจึงเป็นเส้นตรงจากศูนย์กลางปลายลวดเชื่อมสู่บ่อหลอมละลาย ทำให้กำหนดทิศทางการถ่ายโอนได้ตามต้องการ ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งานสูงแม้ลวดเชื่อมจะมีขนาดใหญ่ก็สามารถหลอมเป็นหยดขนาดเล็กได้ทำให้เกิดการหลอมลึกของแนวเชื่อมมากโดยการถ่ายโอนโลหะแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การถ่ายโอนโลหะแบบต่างๆ [12]

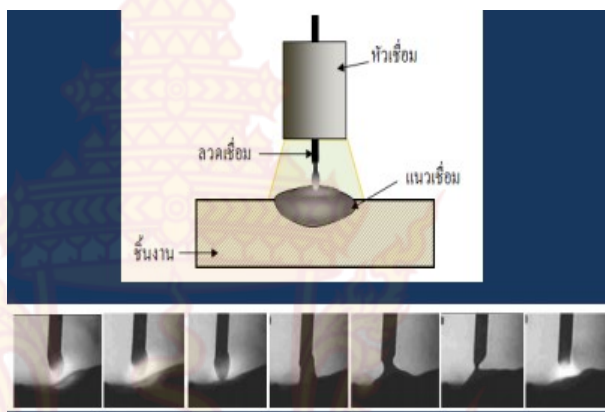
การถ่ายโอนโลหะแบบหยด (Globular Transfer) วงรอบของการถ่ายโอนจะเริ่มเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมเหลวให้เป็นหยดโลหะ จากนั้นเกิดการก่อตัวเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่า ก่อนจะหลุดจากปลายของลวดเชื่อมแล้วถ่ายโอนผ่านการอาร์คสู่บ่อหลอมละลายด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งจะทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะมากและมีความร้อนสูงกว่าการถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร การถ่ายโอนโลหะแบบหยดสู่บ่อหลอมเหลวจะใช้แรงโน้มถ่วงมากกว่าแรงที่เกิดจากการอาร์ค ดังนั้น กระบวนการถ่ายโอนแบบนี้จึงเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการงานเชื่อมคุณภาพสูง มีขอบเขตใช้งานจำกัดเพราะปริมาณความร้อนเข้างานต่ำ สามารถทำการเชื่อมได้ดีกับงานที่อยู่ในแนวราบและแนวระดับ ใช้ระดับกระแสเชื่อมและแรงดันสูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร สำหรับการถ่ายโอนโลหะแบบหยดแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การถ่ายโอนโลหะแบบหยด [12]

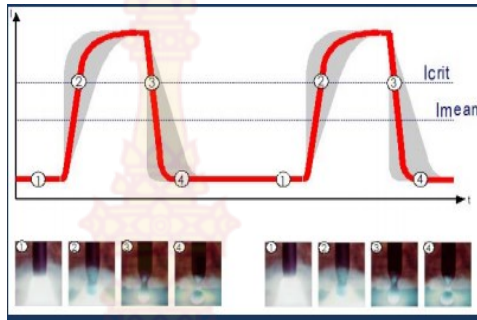
การถ่ายโอนแบบลัดวงจร (Short Circuit Transfer) วงรอบการถ่ายโอนจะเกิดขึ้นเมื่อปลายลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงานทำให้เกิดการอาร์คขึ้น และมีอุณหภูมิสูงพอที่จะหลอมปลายลวดเป็นหยดโลหะขนาดเล็ก ขณะเดียวกันลวดเชื่อมจะถูกป้อนเข้าสู่บ่อหลอมเหลวด้วยอัตราเร็วสูงทำให้หยดโลหะบนปลายลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมเหลวก่อนจะแยกออกจากปลายลวดเชื่อม ทำให้เกิดการลัดวงจรไฟฟ้า (Short Circuit) โดยที่การอาร์คจะดับไปชั่วขณะในจังหวะที่ลัดวงจรอยู่นี้ กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายลวดเชื่อมที่หลอมเป็นหยดจะถูกบีบรัดออกแล้วถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อมจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่าง

ช่องว่างปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมเหลว เมื่อหยุดโลหะหยุดแรกหลุดจากปลายลวดเชื่อมแล้วก็จะเริ่มต้นการอาร์คใหม่อีกครั้งหนึ่ง สภาวะอย่างนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปอย่างรวดเร็วมาก คือ มีความถี่ของการสั้ดวงจรราว 20 ถึง 200 times/sec กระแสเชื่อมและแรงดันจะตั้งอยู่ในช่วงต่ำจึงมีปริมาณความร้อนเข้าสู่งานน้อย สามารถใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กได้ งานเชื่อมบิตตัวน้อย รอยหลอมทะลุและประกายโลหะกระเด็นไม่มาก โดยการถ่ายโอนแบบสั้ดวงจรแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การถ่ายโอนแบบสั้ดวงจร [12]

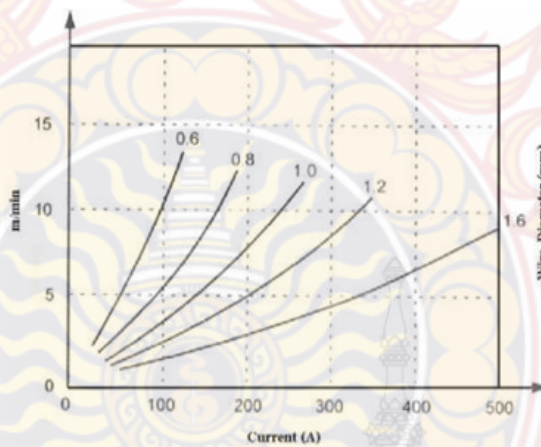
การถ่ายโอนแบบพัลส์ (Pulse Spray Transfer) เป็นกระบวนการที่พัฒนามาแทนการถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์เพราะมีข้อจำกัดการใช้งาน แต่ยังคงรักษาการถ่ายโอนที่เป็นลักษณะแบบสเปรย์อยู่ การพัลส์ของกระแสเชื่อมจากระดับสูงสุดที่ 60 Cycle/ Sec จึงหวนการพัลส์แต่ละครั้งจะทำให้ปลายลวดเชื่อมเป็นหยุดโลหะได้ 1 หยุด และจะการถ่ายโอนผ่านอาร์คสู่บ่อหลอมเหลวด้วยความถี่สม่ำเสมอต่อเนื่องกัน ระดับกระแสต่ำสุดจะตั้งในช่วงการถ่ายโอนแบบละอองการถ่ายโอนหยุดโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อกระแสพัลส์ถึงระดับสูงสุด หลังจากการถ่ายโอนหยุดโลหะแล้วกระแสเชื่อมจะลดลงต่ำสุดตามที่ตั้งไว้ กระแสเชื่อมต่ำจะช่วยให้การอาร์คเกิดอยู่ตลอดเวลา ช่วงจังหวะนี้การถ่ายโอนโลหะจะไม่เกิดขึ้น การพัลส์ของกระแสเชื่อมสูงแล้วต่ำลงจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนเข้าสู่งานเชื่อม โดยความร้อนเฉลี่ยจะต่ำกว่าการถ่ายโอนแบบละออง จึงเหมาะกับการเชื่อมงานในทุกตำแหน่งที่เชื่อม งานบิตตัวน้อย สามารถใช้ลวดเชื่อมขนาดใหญ่ได้ และการถ่ายโอนหยุดโลหะผ่านการอาร์คยังคงเป็นหยุดขนาดเล็กอยู่ จึงประหยัดกว่าการใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก โดยการถ่ายโอนแบบพัลส์แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์ [12]

### 1.5 กระแสเชื่อม

กระแสเชื่อม (Welding Current) คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องเชื่อมผลิตออกมา ซึ่งสามารถอ่านได้โดยตรงจากแอมป์มิเตอร์ของเครื่องเชื่อมในกระบวนการเชื่อมมิกแม็ก กระแสเชื่อมจะสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของการป้อนลวด (Wire Feeder) ถ้าป้อนลวดเร็วขึ้นกระแสเชื่อมที่ผลิตออกมาก็จะมากขึ้นด้วย แต่ถ้าป้อนลวดช้าลงกระแสเชื่อมก็ลดลงเช่นกัน ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ในกระบวนการเชื่อมดังกล่าว สามารถแบ่งชนิดของกระแสเชื่อมประเภทใหญ่ได้ 2 ประเภท



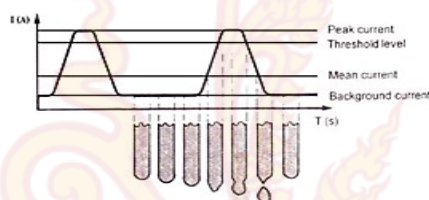
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับความเร็วในการป้อนลวด [13]

#### 1.5.1 กระแสเชื่อมแบบมาตรฐาน

กระแสเชื่อมแบบมาตรฐาน (Standard Arc Current) เป็นลักษณะของกระแสเชื่อมโดยทั่วไป ซึ่งกระแสในขณะที่เชื่อมโดยเฉลี่ยตลอดการเชื่อมจะมีค่าคงที่สำหรับกระบวนการเชื่อมแม็ก กระแสเชื่อมจากเครื่องเชื่อมจะถูกส่งไปสู่ท่อนำลวดภายในหัวเชื่อมผ่านไปยังลวดเชื่อมสู่ชิ้นงาน ซึ่งการกำหนดค่ากระแสในการเชื่อม ในทางปฏิบัติจะนิยมตั้งค่ากระแสเชื่อมโดยพิจารณาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่ใช้หรือความหนาของชิ้นงานเชื่อมเป็นหลัก

### 1.5.2 กระแสเชื่อมแบบพัลส์

กระแสเชื่อมแบบพัลส์ (Pulsed Arc Current) เป็นกระแสที่เกิดจากการเปิดปิด วงจร (Switching) ระหว่างกระแสต่ำสุดกับกระแสสูงสุด ดังนั้น ในเครื่องเชื่อมตัวเดียวจึงมีต้นกำเนิดแยกออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่ให้กระแสต่ำสุด (Background Current) และส่วนที่ให้กระแสสูงสุด (Peak Current) เพื่อให้ได้กระแสพัลส์ที่เหมาะสม การตั้งค่ากระแสในการเชื่อมจะต้องตั้งค่ากระแสสูงสุดให้สูงกว่าระดับกระแสช่วงเปลี่ยน (Threshold Level) ของการถ่ายโอนแบบล่องและค่าของกระแสต่ำสุดต้องตั้งในช่วงการถ่ายโอนแบบหยุดในขณะการอาร์คช่วงกระแสค่าสูงจะเป็นการถ่ายโอนน้ำโลหะให้พุ่งเข้าสู่บ่อหลอมละลาย โลหะถูกแรงบีบรัดแยกตัวออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านอาร์คสู่บ่อหลอมเหลวที่วงรอบพัลส์และเกิดขึ้นซ้ำๆกันอย่างต่อเนื่อง ในช่วงประมาณ 30-300 times/sec ลงสู่บ่อหลอมละลาย ส่วนช่วงกระแสค่าต่ำจะเป็นการรักษาการอาร์คให้คงที่และต่อเนื่อง ลักษณะของรูปแบบกระแสดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 รูปแบบของกระแสเชื่อมแบบพัลส์ [13]

### 1.6 การเชื่อม CMT

เครื่องเชื่อม CMT เป็นเครื่องเชื่อมไฟกระแสตรงต่อกลับขั้ว (DCRP) ชนิดแรงเคลื่อนคงที่ (Constant Voltage) สำหรับกระแสตรงต่อขั้วตรง (DCSP) อาจจะมีการใช้ไม่มากนักเนื่องจากเป็นกระแสไฟที่ทำให้การซึมลึกต่ำกว่า DCRP เครื่องเชื่อมแสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เครื่องเชื่อม CMT [13]

### 1.6.1 หัวเชื่อม CMT

หัวเชื่อม CMT แตกต่างกันจากหัวเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เนื่องจากหัวเชื่อม CMT ต้องจ่ายก๊าซปกคลุมบริเวณการอาร์ค และเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้ากับลวดเชื่อมสู่บริเวณอาร์ค หัวเชื่อมจะประกอบติดอยู่กับสายเชื่อมซึ่งสายเชื่อมนั้นจะเป็นทางผ่านแก๊สปกคลุมลวดเชื่อม และกระแสไฟฟ้าโดยภายในของสายเชื่อมที่ลวดผ่านจะทำด้วยเหล็กสปริงที่มีขนาดเป็นท่อและภายนอกจะหุ้มไว้ด้วยพลาสติกลักษณะของหัวเชื่อมมีทั้งชนิดตัวตรงและหัวโค้งแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 หัวเชื่อม [13]

### 1.7 หัวทูปเชื่อม

หัวทูปเชื่อม (Contact Tip) ทำมาจากทองแดงหรือทองแดงผสม ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของลวดเชื่อมไปยังหัวฉีด (Nozzle) นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับลวดเชื่อมด้วยคุณสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้า หัวทูปเชื่อมแสดงดังภาพที่ 11

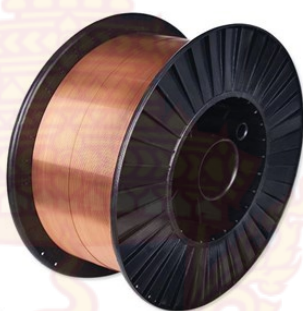


ภาพที่ 11 หัวทูปเชื่อม [13]

### 1.8 ลวดเชื่อม

ลวดเชื่อมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม ต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสม ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับวัสดุที่ทำการเชื่อม จึงจะให้แนวเชื่อมมีคุณภาพ และส่วนผสมทางเคมีบอกถึงค่าในการทดสอบที่ได้มาตรฐาน ลวดเชื่อมที่ใช้ในกระบวนการอาร์คโลหะก๊าซคลุมต้องมีความบริสุทธิ์ ลวดเชื่อมจะหลอมผ่านเปลวอาร์คไปยังบ่อหลอมเหลวเกิดเป็นแนวเชื่อม ซึ่งลวดเชื่อมที่ผ่าน

เปลวอาร์คนั้นจะทำปฏิกิริยากับก๊าซปกคลุม จึงทำให้ส่วนผสมของลวดเปลี่ยนไปและจะมีเป็นผลต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางกลของรอยเชื่อม สำหรับลวดจะเป็นแบบสิ้นเปลือง (Consumable Electrode) ลักษณะของลวดเชื่อมเป็นเส้นโลหะเหมือนเส้นลวดไม่มีสารพอกหุ้ม เรียกว่า ลวดเปลือย (Solid Wire) ลวดเชื่อมจะถูกขับออกมาจากอุปกรณ์ควบคุมในอัตราเร็วที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่อง ถูกผลิตเป็นเส้นยาวขดไว้ในม้วนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่นิยมใช้ตั้งแต่ 0.8-12 mm ลวดเชื่อมแสดงดังภาพที่ 12 [14]



ภาพที่ 12 ลวดเชื่อม [15]

การเลือกใช้ลวดเชื่อมต้องพิจารณาชนิดโลหะงานเชื่อม ส่วนผสมทางเคมีและคุณสมบัติทางกลเป็นตัวประกอบหลักการเลือกลวดเชื่อมถูกต้องเหมาะสมได้งานเชื่อมที่สมบูรณ์แบบ ถ้าไม่รู้ชนิดโลหะงานเชื่อมก็ใช้วิธีตรวจสอบด้วยตาเปล่า ชั่งน้ำหนัก การดูแม่เหล็ก ทดสอบด้วยสะเก็ดประกายไฟการแตกหักและทางเคมี ข้อพิจารณาในการเลือกใช้ลวดเชื่อมมีดังนี้

สมบัติทางกลของโลหะชิ้นงาน ลวดเชื่อมที่เลือกใช้ต้องมีความต้านแรงดึงที่เข้ากันได้กับโลหะชิ้นงาน

ส่วนผสมทางเคมีของโลหะชิ้นงาน ส่วนผสมทางเคมีของโลหะชิ้นงานต้องเหมาะสมกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะลวดเชื่อมและเข้ากันได้กับส่วนผสมของโลหะชิ้นงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน การนำความร้อนหรือไฟฟ้า วัสดุงานเชื่อมที่ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าเจือผสมอื่น ๆ ควรเลือกส่วนผสมทางเคมีที่เข้ากันได้

ความหนาและรูปร่างของโลหะชิ้นงาน งานเชื่อมที่มีความหนาและรูปร่างแตกต่างกันเมื่อนำมาเชื่อมต่อกันจำเป็นต้องความเหนียวสูงสุดเพื่อป้องกันงานเชื่อมเกิดรอยร้าวโลหะงานเชื่อมควรมีคุณสมบัติด้านความเหนียวที่มากพอและมีสมบัติด้านการยืดหยุ่นที่ดี เพื่อให้แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ด้านคุณภาพ

สภาพการใช้งานและข้อกำหนดรายละเอียด สภาพการใช้งานเชื่อม อาจแตกต่างกัน เช่น ที่อุณหภูมิต่ำ-สูง หรือรับแรงกระแทก ดังนั้นลวดเชื่อมต้องมีส่วนผสมที่เข้ากันได้กับโลหะงานเชื่อม ต้องเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีคุณสมบัติด้านความเหนียวและต้านทานต่อการกระแทก

ลวดเชื่อมกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม เป็นเส้นยาวทำเป็นม้วนหรือเพื่อใช้งานเชื่อมได้อย่างต่อเนื่อง ม้วนลวดจะมีน้ำหนักประมาณ 0.9 ถึง 27 kg ลวดเชื่อมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเมื่อเทียบกับลวดเชื่อมที่ใช้กระบวนการเชื่อมแบบอื่น โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.8 ถึง 1.6 mm (0.030



ถึง 1/16 inch) ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้กันแพร่หลาย และยังมีลวดเชื่อมขนาด 1.2 mm จึงต้องใช้กระแสเชื่อมสูง เพื่อให้อัตราการหลอมเหลวลวดเชื่อมอยู่ในช่วง 40 ถึง 255 mm/s (100 ถึง 600 in/s) ดังนั้นลวดเชื่อมต้องสะอาด ไม่เป็นสนิม ไม่มีฝุ่นละออง น้ำมันหรือสารมลทิน ซึ่งเกาะติดผิวลวดเชื่อม เพราะเป็นสาเหตุของการเกิดจุดบกพร่องในเนื้อโลหะเชื่อม เช่น ความพรุนและรอยร้าว และยังมีผลต่อปริมาณโลหะที่รับจากการหลอมเป็นสัดส่วนที่สูงสุดเท่าใด สำหรับกลุ่มรหัสของลวดเชื่อมแต่ประเภทตามมาตรฐาน AWS แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กลุ่มรหัสของลวดเชื่อมแต่ประเภทตามมาตรฐาน AWS [15]

AWS SPECIFICATION	โลหะ
A 5.9	เหล็กกล้าไร้สนิม
A 5.14	ไทเทเนียมและไทเทเนียมเจือ
A 5.16	เหล็กกล้าคาร์บอน
A 5.19	แมกนีเซียม
A 5.24	เซอร์โคเนียมและเซอร์โคเนียมเจือ
A 5.28	เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

การแบ่งชนิดลวดเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซปกคลุมจะอาศัยพื้นฐานด้านส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อมเป็นหลัก แต่ลวดเชื่อมเหล็กกล้าต้องมีข้อพิจารณาสองประการคือส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและคุณสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเชื่อม สำหรับลวดเชื่อมเหล็กกล้าต้นจะกำหนดรายละเอียดมาตรฐาน AWS 5.18 และ AWS 5.28 ซึ่งการอกรหัสเป็นทั้งตัวอักษรและตัวเลขควบคู่กันไปแสดงดังตารางที่ 2.6 [15]

การแบ่งชนิดลวดเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซปกคลุมตารางที่ 2 จะอาศัยพื้นฐานด้านส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมโลหะเป็นหลักแต่ลวดเชื่อมเหล็กกล้าต้องมีข้อพิจารณาสองประการ คือ ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเชื่อม สำหรับลวดเชื่อมเหล็กกล้าต้นจะกำหนดรายละเอียดตามมาตรฐาน AWS 5.18 และ AWS 5.28 ซึ่งการอกรหัสเป็นทั้งตัวอักษร และที่เป็นแบบตัวเลข ควบคู่กันดังนี้

ตารางที่ 2 การอกรหัสเป็นทั้งตัวอักษร และที่เป็นแบบตัวเลข ควบคู่กัน

รหัส	ความหมาย
E (Electrode)	หมายถึง ลวดเชื่อมอาร์คหรือลวดเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้การเชื่อมอาร์คโลหะ
R (Welding rod)	หมายถึง ลวดเชื่อมเติมได้เช่นเดียวกับลวดที่ใช้ในการเชื่อมทิก
XX	หมายถึง ตัวเลขที่บอกถึงความต้านทานแรงดึงของเนื้อโลหะเชื่อม
S (Solid wire)	หมายถึง ลวดตันถ้าอักษร T หมายถึงลวดไส้ฟลักซ์
X	หมายถึง ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม

ลวดเชื่อม AWS สามารถจำแนกการใช้งานดังนี้ [15]

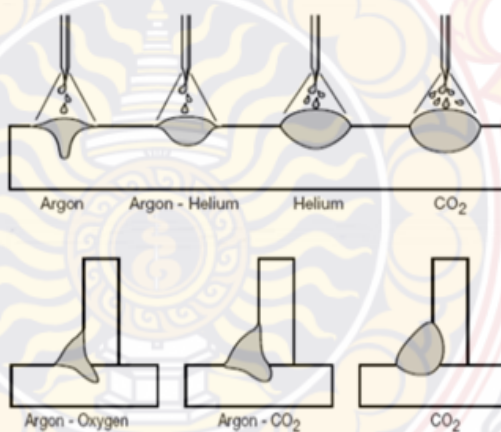
ER 70S-3 เป็นลวดเชื่อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดสำหรับการเชื่อมอาร์คโลหะปกคลุมคิดเป็นปริมาณถึง 2 ใน 3 ของลวดเชื่อมทั้งหมด ลวดเชื่อมชนิดนี้มีธาตุเจือที่เป็นตัว คือ ออกซิไดเซอร์เปอร์เซนต์ต่ำ ได้คุณภาพงานเชื่อมพอใช้ เมื่อใช้ก๊าซคลุมอาร์กอนผสมออกซิเจน หรือ อาร์กอนผสม คาร์บอนไดออกไซด์ งานเชื่อมคุณภาพดีเมื่อเชื่อมออกซิเจนต่ำและลวดเชื่อมมีออกซิไดเซอร์และใช้แก๊สคลุมอาร์กอนผสมออกซิเจน หรือ อาร์กอนผสมคาร์บอนไดออกไซด์

ER 70S-4 เป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุเจือซิลิกอนและแมงกานีสมากกว่าลวดเชื่อม ER 70S-3 ลวดเชื่อมนี้ให้ความต้านแรงดึงสูงและตะเข็บเชื่อมเรียบใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซคลุม หรือมีการใช้ตัวกำจัดออกซิเจนมากกว่าไม่เหมาะกับงานเชื่อมที่รับแรงกระแทก

ER 70S-G เป็นลวดเชื่อมที่ไม่กำหนดรายละเอียดของส่วนผสมทางเคมีใดๆ เพราะต้องการให้ผู้ซื้อและผู้ผลิตตกลงกันเป็นการเฉพาะว่าต้องการส่วนผสมทางเคมีอะไรบ้างและความต้านทานแรงดึงเท่าใด เป็นต้น

### 1.9 ชนิดของก๊าซคลุม

ชนิดของก๊าซคลุม (Type of Shielding Gas) ก๊าซนำมาปกคลุมโดยทั่วไปของกระบวนการเชื่อมแบบอาร์ค (Arc Welding) มีหลายกระบวนการเชื่อมที่ต้องใช้ก๊าซคลุมในขณะที่เชื่อม สำหรับก๊าซคลุมที่มีใช้ในเมืองไทยมีมากมายหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ได้เลือกใช้ก๊าซคลุมสำหรับการทดลอง 3 ชนิด ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 รูปร่างของรอยเชื่อมจากการใช้ก๊าซคลุมที่แตกต่างกัน [12]

ก๊าซอาร์กอน (Argon) มีความหนาแน่น  $1.665 \text{ kg/m}^3$  ผลิตได้จากอากาศที่อยู่ในบรรยากาศประมาณ 0.9 % ก๊าซอาร์กอนเป็นอีนอนไนส์ที่ดี มีน้ำหนักมากกว่าอากาศสามารถผลิตได้โดยการแยกอากาศเหลว ลักษณะก๊าซจะมีในรูปแบบของแก๊สเหลวและก๊าซถึง การเก็บก๊าซอาร์กอนเหลวจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $184 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เล็กน้อย สามารถใช้เป็นก๊าซคลุมได้ทั้งในสภาพบริสุทธิ์และผสมกับก๊าซ

อื่นๆ เพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการเหมาะสำหรับใช้เชื่อมโลหะเหล็กและโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ลักษณะของเปลวอาร์คที่เกิดขึ้นจะเรียบนิ่งและพุ่งเป็นลำตรงทำให้ได้แนวเชื่อมที่แคบแต่ลึก ใ้รูปปร่างการหลอมลึกเหมือนแกนวยแสดงในภาพที่ 2.6 ลักษณะการถ่ายโอนน้ำโลหะจะเป็นได้ทั้งแบบสเปร์รี่และแบบพัลส์ ดังนั้นจึงช่วยให้การเชื่อมไม่มีเม็ดโลหะกระเด็นและจะมีข้อดีและข้อเสียดังแสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ข้อดีและข้อเสียของก๊าซอาร์กอนเมื่อเทียบกับก๊าซฮีเลียม [16]

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. การอาร์คเสียงเงียบและสม่ำเสมอ</li> <li>2. เริ่มต้นอาร์คกระทำได้ง่าย มี Ionization Potential 15.7 eV</li> <li>3. ใช้แรงเคลื่อนอาร์คต่ำและระยะอาร์คสั้น ให้ผลดีกับการเชื่อมโลหะบาง</li> <li>4. ให้ปฏิกิริยาทำความสะอาดได้ดีซึ่งเหมาะที่จะนำไปเชื่อมโลหะประเภทอลูมิเนียมและแมกนีเซียม</li> <li>5. ใช้อัตราการไหลก๊าซต่ำเนื่องจากก๊าซหนักกว่าอากาศ 1.4 เท่า</li> <li>6. ราคาถูกและหาได้ง่าย</li> <li>7. มีความต้านทานต่อการเป่าของอากาศ</li> <li>8. เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะต่างชนิด</li> <li>9. ควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่ายเมื่อเชื่อมท่าเหนือศีรษะและท่าตั้ง</li> <li>10. ลดการเกิดโอโซนซึ่งเป็นมลพิษต่อสภาพแวดล้อม</li> </ol>	<p>ไม่เหมาะในการนำไปใช้สำหรับงานเชื่อมที่มีความหนาต่างๆ</p>

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) มีความหนาแน่น  $1.849 \text{ Kg/m}^3$  เป็นก๊าซที่ให้ความร้อนได้สูงมากในบริเวณขอบรอบนอกของเปลวอาร์ค เมื่อสัมผัสกับแกนนำของกระแสเชื่อมจะช่วยให้เกิดพลังที่เข้มข้นสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดการหลอมลึกได้สูง และจะเกิดการแตกตัวเมื่ออยู่ภายใต้เปลวอาร์คและถึงแม้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นแอคทีฟก๊าซที่ให้แก่สออกซิเจนแต่รอยเชื่อมที่ได้มีความสมบูรณ์ปราศจากรูพรุนและตำหนิโดยปกติก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะนิยมใช้ในการเชื่อมแบบแม็กซี (MAG-C) หรือใช้ผสมกับก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน เรียกว่าการเชื่อมแบบแม็กเอ็ม (MAG-M) เพื่อนำไปใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนผสมต่ำ เนื่องจากเป็นก๊าซที่หาง่าย ราคาถูกคุณภาพรอยเชื่อมดีและติดตั้งง่าย แต่ประสิทธิภาพของการเติมเนื้อโลหะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต่ำเพราะเกิดการสูญเสียไปเป็นเม็ดโลหะ ซึ่งส่งผลถึงต้นทุนราคารวมทั้งหมดเมื่อเชื่อมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับงานที่ต้องการสมบัติทนต่อแรงกระแทกสูงการใช้ก๊าซอาร์กอนผสมคาร์บอนไดออกไซด์จะเหมาะสมกว่าใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดเดียวและจะมีข้อดีและข้อเสียแสดงดังตารางที่ 4 [16]

ตารางที่ 4 ข้อดีและข้อเสียของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [16]

ข้อดี	ข้อเสีย
1 ให้การหลอมลึกของแนวเชื่อมดี	1 เกิด Oxidation ทำลายคุณสมบัติของแนวเชื่อมและไม่เหมาะสมสำหรับเชื่อมวัสดุที่นอกเหนือจากเหล็กกล้า
2 เชื่อมด้วยความเร็วสูงได้	2 เชื่อมค่อนข้างยากกว่าเมื่อเทียบกับก๊าซอาร์กอน
	3 เกิดเม็ดโลหะกระเด็นมากทำให้สิ้นเปลืองลวดเชื่อม
	4 มีผลต่อการเกิดไอโซน ซึ่งจะเป็นมลพิษต่อสภาพแวดล้อม

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติไม่ติดไฟไม่เป็นพิษไม่มีกลิ่นและไม่มีสี นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังหนักกว่าอากาศประมาณ 1.5 เท่า เกรดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังสามารถแบ่งออกได้หลายเกรดตามลักษณะส่วนประกอบและความบริสุทธิ์ ได้แก่ เกรดอาหาร เกรดการแพทย์ และเกรดอุตสาหกรรม การต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกใช้งานในแต่ละถังไม่ควรให้มีอัตราการไหลออกจากถังเกิน 25 C.F.H.(12 Lite/min) ถ้าหากมีความต้องการเกินกว่าที่กำหนด ควรใช้ระบบ Manifold หรือใช้ Flow Meter ให้ความร้อนได้เพราะถ้าหากอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไป ทำให้เกิดการแข็งตัวก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อุดตัน หรือดึงเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหลวออกมาจากถังบรรจุด้วย

ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้ก๊าซผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีจุดประสงค์สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กคาร์บอนผสมต่ำ เพื่อให้การอาร์คมีความร้อนสูงทำให้กินบริเวณกว้างขึ้น การหลอมลึกมากขึ้นและสามารถช่วยลดการเกิดเม็ดโลหะได้ดีกว่าการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนเล็กน้อยเข้าไปในก๊าซอาร์กอน ทำให้ได้คุณสมบัติของการถ่ายโอนแบบสเปรย์ที่เกิดขึ้นเหมือนกับการผสมด้วยแก๊สออกซิเจนลงในก๊าซอาร์กอนจำนวนเล็กน้อยในกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW ที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผสมเข้าไปในก๊าซชนิด เมื่อกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้นเล็กน้อยเกิดการถ่ายโอนแบบสเปรย์ที่สม่ำเสมอ การอาร์คนิ่ง ทำให้มีเม็ดโลหะกระเด็นและเขม่าควันที่เกิดขึ้นในขณะที่เชื่อมน้อยในการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกินกว่า 25% โดยประมาณ ได้การถ่ายแบบสเปรย์ที่ไม่สม่ำเสมอและอาจเกิดเป็นการถ่ายโอนแบบลัดวงจรหรือแบบหยุดแทน

อัตราการไหลของก๊าซคลุม อัตราการไหลของการคลุมจะต้องมากพอสำหรับคลุมการอาร์คและบ่อหลอมเหลวไว้ได้โดยไม่ให้บรรยากาศรอบนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับบ่อหลอมแต่ไม่ควรให้อัตราการไหลของแก๊สสูงเกินไปเพราะจะเกิดการปั่นป่วนของก๊าซในบ่อหลอมเหลวได้ อัตราการไหลเป็นตัวแปรปฐมภูมิที่ต้องเลือกก่อนปฏิบัติการเชื่อมซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซคลุมกระบวนการถ่ายโอนโลหะ วัสดุงานเชื่อม ขนาดลวดเชื่อม ตำแหน่งแนวเชื่อมและระยะไหลของลวดเชื่อม

อีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการเลือกใช้อัตราไหลของก๊าซคลุม คือ ระยะไหลลวด ถ้าระยะไหลมาก (หัวเชื่อมห่างจากผิวงาน) ลดประสิทธิภาพการคลุมของแก๊ส แต่ถ้าระยะไหลน้อยเกินไปเมื่อโลหะเชื่อมหลอมเหลวจะกระเด็นมากทำให้อายุการใช้งานหัวฉีดสั้น ก๊าซคลุมจะลอยหนีออกจากบ่อหลอมเหลวซึ่งเป็นตัวแปรที่ควรนำมาพิจารณาต่อการเลือกใช้อัตราการไหลของก๊าซคลุมด้วย หากก๊าซ

ไม่พอจะส่งผลต่อคุณภาพตะเข็บเชื่อมและเกิดรอยร้าวได้ การอาร์คจะมีเสียงดังเกิดความพรุณและประกายโลหะมาก [16] สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้ก๊าซปกคลุมกับวัสดุแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การประยุกต์ใช้ก๊าซปกคลุมกับวัสดุแบบต่างๆ [12]

ชนิดแก๊ส	พฤติกรรมทางเคมี	การนำไปใช้
Ar	Inert	ใช้กับโลหะทุกชนิดยกเว้นเหล็กกล้า
He	Inert	ใช้กับการเชื่อม Al, Mg และ Cu-alloys ให้ความร้อนเข้าสู่งานสูง (heat input) และลดการเกิดความพรุณ
Ar+He 20-30% ถึง 60-80%	Inert	ใช้ในการเชื่อม Al,Mg และ Cu-alloys ให้ความร้อนเข้าสู่งานสูง และลดการเกิดความพรุณ ลักษณะของการอาร์คจะดีกว่าการใช้ He 100%
N <sub>2</sub>	Unreactive	ให้ความร้อนสู่งานสูง เหมาะสำหรับเชื่อมทองแดง
Ar+1-2% O <sub>2</sub>	Slightly Oxidizing	ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าเจือ
Ar+3-5% O <sub>2</sub>	Oxidizing	ใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าเจือต่ำบางประเภท
Ar+20-50% CO <sub>2</sub>	Oxidizing	ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าได้หลายประเภท ส่วนมากใช้การถ่ายโอนแบบลัดวงจร
Ar+10%CO <sub>2</sub> +5% O <sub>2</sub>	Oxidizing	ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าได้เกือบทุกประเภทนิยมใช้ในยุโรป
CO <sub>2</sub> +20% O <sub>2</sub>	Oxidizing	
90% He+7.5% Ar+ 2.5%CO <sub>2</sub>	Slightly	ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อนที่ดี โดยใช้กับการถ่ายโอนแบบลัดวงจร

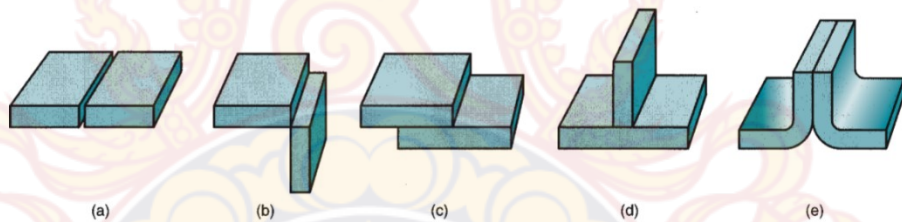
การเลือกก๊าซคลุมสำหรับโลหะงานเชื่อม มีหลากหลายชนิดการเลือกใช้มีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง คือ โลหะงานเชื่อม ราคาก๊าซคลุมและคุณภาพงานเชื่อม [16]

สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนให้ได้มีประสิทธิภาพสูงสุดควรเลือกวิธีการเชื่อมแบบการถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจรและแบบล่อง สำหรับการถ่ายโอนโลหะแบบล่อง ก๊าซคลุมน้อยเชื่อมจะเป็นก๊าซผสม คือ อาร์กอนกับออกซิเจน สาเหตุที่ต้องใช้ก๊าซผสมก็เพื่อทำให้เกิดการถ่ายโอนโลหะแบบล่องและออกซิเจน ยังช่วยให้การอาร์คมีความเสถียร มีรอยกินลึกข้างตะเข็บเชื่อมน้อยสามารถใช้อัตราเร็วเคลื่อนที่หัวเชื่อมสูง แต่การเชื่อมเหล็กกล้าส่วนมากใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนกับ

คาร์บอนไดออกไซด์ หรือคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเดียว เฉพาะงานที่ต้องการเชื่อมด้วยอัตราเร็วการเชื่อมสูงและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่ใช่กับกระบวนการถ้อยโลหะแบบละอองการเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าเจือต่ำที่ใช้การโอนแบบลัดวงจรนิยมใช้การเชื่อมแบบต่อหน้าฉากซึ่งเหมาะสมกับการเชื่อมเหล็กแผ่นบางที่มีความหนาตั้งแต่ 0.8-3.2 mm

### 1.10 รอยต่อและรอยเชื่อม

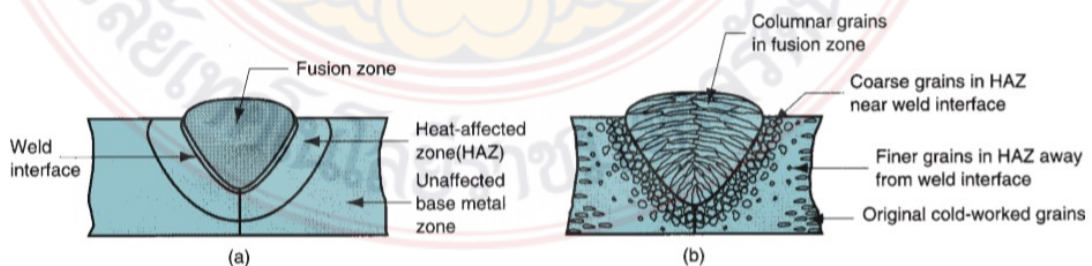
ในการเชื่อมแบบต่างๆ รอยต่อ (Joints) ของการเชื่อม หมายถึง จุดรวมของขอบหรือผิวภายนอกของชิ้นงานที่ถูกเชื่อมประสานเข้าด้วยกันโดยกระบวนการเชื่อมแบบใดแบบหนึ่ง ซึ่งประเภทของรอยต่อพื้นฐานมี 5 แบบ ได้แก่ รอยต่อชน (Butt joint) รอยต่อมุม (Corner joint) รอยต่อเกย (Lap joint) รอยต่อชนรูปตัวที (T-butt joint) และรอยต่อขอบ (Edge joint) ดังแสดงในภาพที่ 14 และลักษณะของรอยเชื่อมแบบต่างๆ มีหลายรูปแบบเช่นเดียวกัน ได้แก่ รอยเชื่อมมุม (Fillet weld) รอยเชื่อมร่อง (Groove weld) รอยเชื่อมอุด (Plug weld) รอยเชื่อมจุด (Spot weld) รอยเชื่อมตะเข็บ (Seam weld) รอยเชื่อมหน้าแปลน (Flange weld) และรอยเชื่อมพอก (Surfacing weld) เป็นต้น



ภาพที่ 14 รอยต่อ (a) รอยต่อชน (b) รอยต่อมุม (c) รอยต่อเกย (d) รอยต่อชนรูปตัวที และ (e) รอยต่อขอบ [11]

### 1.11 โลหะวิทยาของรอยเชื่อม (Metallurgy of welding)

สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมเท่านั้น ในบริเวณรอยต่อของชิ้นงานสามารถที่จะแบ่งออกได้ 3 ส่วน คือ 1) บริเวณหลอมเหลว (Fusion zone) 2) บริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) และ 3) บริเวณโลหะพื้นฐาน (Base metal zone) ดังแสดงในภาพที่ 15 (a)



ภาพที่ 15 ลักษณะของรอยต่อที่ผ่านการเชื่อมแบบการเชื่อมหลอม [11]

ส่วนของบริเวณหลอมเป็นส่วนที่เกิดการหลอมเหลวในขณะที่ทำการเชื่อม ถ้ามีการเติมโลหะเติมลงไปก็จะเกิดการผสมกันของโลหะทั้งสองชนิด ภายหลังจากการเชื่อมเมื่อเกิดการแข็งตัวของโลหะจะเกิดโครงสร้างของจุลภาคที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวๆ (Columnar grains) ซึ่งโครงสร้างชนิดนี้จะวางตัวไปในทิศทางเดียวกับการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมดังแสดงในภาพที่ 15 (b) โครงสร้างของเกรนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ มากมาย เช่น วิธีการเชื่อม โลหะที่ใช้เชื่อม โลหะเติมและอัตราการเชื่อม สำหรับในส่วนของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหลังการเชื่อมจะมีโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างไปจากโครงสร้างจุลภาคดั้งเดิมของชิ้นงานก่อนที่จะทำการเชื่อมเนื่องจากโลหะในส่วนของ HAZ จะได้รับความร้อนมาจากส่วนที่มีการหลอมเหลวทำให้อุณหภูมิของ HAZ สูงขึ้นและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยา เช่น เกิดการขยายขนาดของเกรนในส่วนนี้ ทำให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะในส่วนของ HAZ มีลักษณะเป็นเกรนขนาดใหญ่และค่อนข้างกลม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาที่เกิดขึ้นในส่วนของ HAZ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณของความร้อนที่ได้รับและระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ระยะห่างจากบริเวณที่เกิดการหลอมเหลว ระยะเวลาที่ได้รับความร้อน อัตราการลดลงของอุณหภูมิ และคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะดังกล่าว โดยทั่วไปแล้วการวิบัติ (Failure) ในชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมักจะเกิดขึ้นที่ HAZ มีความแข็งแรงลดลง

#### 1.12 คุณภาพของรอยเชื่อม (Weld quality)

คุณภาพของรอยเชื่อมเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม ในส่วนนี้จะกล่าวถึงคุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมอาร์กเป็นหลักเนื่องจากการเชื่อมที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โดยหัวข้อที่จะกล่าวถึงในแง่ของคุณภาพรอยเชื่อมมีดังนี้

ความเค้นตกค้างและการบิดเบี้ยว (Residual stress and distortion) ในระหว่างการเชื่อมมีการเพิ่มและลดอุณหภูมิของชิ้นงานบริเวณที่ถูกเชื่อมอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานซึ่งจะนำไปสู่ความเค้นตกค้างในรอยเชื่อมและชิ้นงาน และความเค้นตกค้างนี้ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน การลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้อุปกรณ์จับยึด (Fixtures) การใช้อุปกรณ์ระบายความร้อน (Heat sink) การเลือกตัวแปรในการเชื่อมที่จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวน้อยที่สุด การอุ่นชิ้นงาน (Preheat) ก่อนเชื่อม การนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปอบให้ความร้อนเพื่อลดความเค้น หรือการออกแบบชิ้นงานที่เชื่อมให้เหมาะสมเพื่อลดการเกิดการบิดเบี้ยว

รูปร่างไม่สมบูรณ์ (Imperfect shape) เป็นรอยเชื่อมที่มีรูปร่างต่างจากที่ต้องการ ภาพที่ 16 (a) แสดงตัวอย่างของรูปร่างรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ในรูปแบบ Undercut

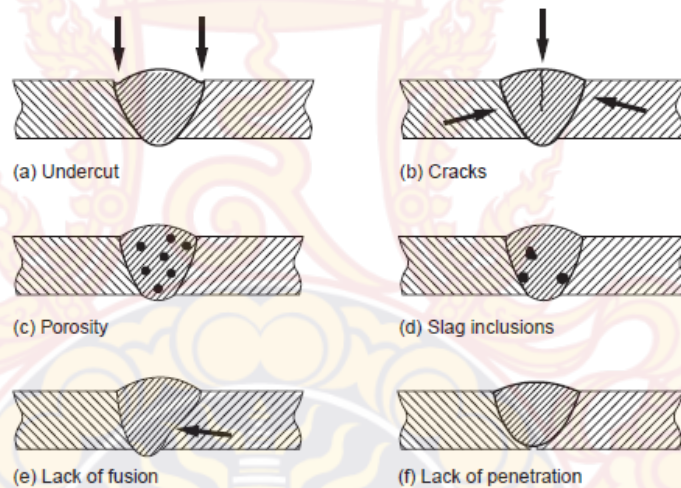
รอยร้าว (Cracks) ภาพที่ 16 (b) เป็นความบกพร่องที่เกิดขึ้นกับรอยเชื่อมหรือใกล้ๆ รอยเชื่อม โดยทั่วไปแล้วถ้าพบความบกพร่องชนิดนี้จะต้องทำการแก้ไข เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของเนื้อวัสดุที่เกิดจากรอยร้าวทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานหรือรอยเชื่อมลดลงเป็นอย่างมาก การเกิดขึ้นของรอยร้าวมีสาเหตุมาจากรอยเชื่อมหรือชิ้นงานมีความเปราะค่อนข้างสูงหรือไม่สามารถหดตัวได้อย่างอิสระระหว่างที่อุณหภูมิลดลง

ช่องว่าง (Cavities) เป็นความบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการที่อากาศหรือก๊าซถูกกักเอาไว้ในรอยเชื่อมในขณะที่รอยเชื่อมยังเป็นของเหลว หรือเป็นช่องว่างที่เกิดจากการหดตัวของเนื้อโลหะในขณะที่เปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็ง ทั้งนี้รวมถึงช่องว่างขนาดเล็ก (Porosity) ดังภาพที่ 16 (C)

สารฝังใน (Solid inclusions) เป็นความบกพร่องที่เกิดจากการที่มีของแข็งบางชนิดปรากฏอยู่ในรอยเชื่อม สารฝังในที่พบบ่อยที่สุด คือ สลากลฝังใน (Slag inclusions) ดังภาพที่ 16 (d) ซึ่งเกิดจากฟลักซ์จมลงในรอยเชื่อมขณะที่เป็นของเหลว หรือเป็นสารฝังในที่เกิดจากออกไซด์ของโลหะตกลงไปในรอยเชื่อม เช่น  $Al_2O_3$  ในการเชื่อมอลูมิเนียม

การหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ (Incomplete fusion) หรือ Lack of fusion เกิดขึ้นเนื่องจากการเชื่อมไม่สามารถทำให้เกิดการหลอมเหลวขึ้นทั่วทั้งหน้าตัดของรอยต่อที่ต้องการเชื่อมดังภาพที่ 16 (e) อีกกรณีหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายกัน คือ รอยเชื่อมตันเกินไป (Lack of penetration) รากของรอยเชื่อมไม่ลึกเท่ากับที่ต้องการดังภาพที่ 16 (f)

ความบกพร่องชนิดอื่นๆ ที่พบบ่อยๆ ได้แก่ รอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงานที่เกิดจากการอาร์กกับอิเล็กโทรดในขณะที่ทำการเชื่อม หรือเม็ดโลหะเล็กๆ ที่เกาะอยู่บนผิวชิ้นงานซึ่งเกิดจากการกระเด็นของโลหะเหลวในรอยเชื่อม



ภาพที่ 16 ประเภทของตำหนิในรอยต่อ [17]



## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการเชื่อมโลหะแบบก๊าซคลุม นอกจากสมบัติทางกลแล้ว รูปร่างทางเรขาคณิต (Bead geometry) ของรอยเชื่อมเป็นผลที่สำคัญเช่นกัน โดยรูปร่างทางเรขาคณิตขึ้นอยู่กับ การปรับตั้งหลายๆตัวแปรในกระบวนการเชื่อม เช่นจากงานวิจัยของ Shoeb และคณะ [18] พบว่า กระแสไฟฟ้า เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลทำให้รอยเชื่อมมีความกว้าง (Weld widths) ขณะที่ความเร็วมีความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นตรงกับความกว้างขอรอยเชื่อม สำหรับความสูงของรอยเชื่อม (Weld bead height) โดยส่วนใหญ่แล้วสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมความเร็วในการเดินเชื่อม (Travel speed) เนื่องจากทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน กระแสไฟฟ้าที่สูงและการเดินเชื่อมช้า ก็ยังมีผลกระทบกับขนาดบ่อหลอมละลาย (Weld pool) และความสูงของรอบเชื่อม

อย่างไรก็ตามในการเชื่อม MAG โดยใช้ก๊าซผสมที่มีอาร์กอน (Ar) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และออกซิเจน (O) กับปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่มีความเข้มข้น พื้นที่และช่วงการอาร์คในการเชื่อมจะลดลง เนื่องจากผลจากการอัดของคาร์บอนออกไซด์ขึ้น ดังนั้นการซึมลึก (Penetration) และความกว้างของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีแรงจากการอาร์คที่สูง ในขณะเดียวกันปฏิกิริยาออกซิเดชันบริเวณบ่อหลอมละลายจะทำให้ความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มองค์ประกอบของออกซิเจน ซึ่งทำให้อัตราการเย็นตัวสามารถเปลี่ยนสถานะโครงสร้างจากออสเตนไนท์ (Austenite) เป็นเพอร์ไลท์ (Pearlite) ได้ โดยผลดังกล่าวพบจากการเชื่อมเหล็กแผ่นความแข็งแรงสูงเกรด Q345E [19] ดังนั้นผลของตัวแปรในกระบวนการที่กล่าวไว้จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการเชื่อมโลหะ

สำหรับการเชื่อม CMT มีหลายปัจจัยต้องปรับตั้งเครื่องให้เหมาะสม เช่น ในงานวิจัยของ Ali และคณะ [20] พบว่าการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low-carbon steel) เกรด S355 การเพิ่มปริมาณการป้อนลวดพร้อมกับลดความเร็วในการเชื่อมทำให้รอยเชื่อมมีความกว้างมาก และขณะที่ลดความเร็วในการเชื่อมขนาดบ่อหลอมละลายจะเพิ่มขึ้นหรือนำไปสู่การซึมลึกได้ดี

ในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมือร้อน เช่น AISI H13 โครงสร้างจุลภาคเกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณกระทันร้อนผ่านเฟสของมาเทนไซด์ เนื่องจากเป็นเฟสที่มีความเปราะ และการแตกร้าวมักจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอุ่น (Preheat) หรือผ่านการอบอ่อน (Annealing) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมแบบ CMT และการเชื่อมอาร์คแบบดั้งเดิม เช่น MMAW GTAW GMAW มีความเป็นไปได้สำหรับการเชื่อมแบบ CMT ที่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาการเกิดขึ้นของรอยแตกร้าวในการเชื่อมได้ เนื่องจากกระบวนการมีพลังงานความร้อนที่ต่ำจึงสามารถลดการเกิดหรือขนาดของการแตกร้าวในโครงสร้างจุลภาคได้ [21] ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเชื่อมแบบ CMT มีการถ่ายโอนหยุดโลหะที่แตกต่างกับการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมแบบดั้งเดิม เช่น การเชื่อม GMAW ปกติการถ่ายโอนแบบลัดวงจร (Short circuit transfer) จะเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มอัตราการป้อนลวดเชื่อมและลดลงหลังถึงจุดสูงสุด รวมทั้งเวลาและกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีผลต่อการถ่ายโอนหยุดโลหะเหลวในกระบวนการ แต่ในการเชื่อม CMT อัตราการป้อนลวดไม่มีผลต่อการถ่ายโอนแบบลัดวงจร [22] ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการเชื่อม CMT เป็นกระบวนการเชื่อมอาร์คก๊าซคลุมที่ถูกปรับปรุงมาให้มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่า GMAW โดยการลดความร้อนในกระบวนการและปรับปรุงความเสถียรของการอาร์คในระหว่างการเชื่อม [23]

ดังนั้นในการเชื่อมด้วยวิธี CMT สามารถควบคุมการถ่ายโอนโลหะเหลวจากโลหะเติมบนพื้นผิวชิ้นงานได้ดี มีความร้อนไม่สูง (Low heat-input) และสามารถใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ได้ [24]



### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาเทคโนโลยีการเชื่อม CMT ของเหล็กกล้าในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์: รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม สมบัติทางกล และโลหะวิทยาการเชื่อมในงานวิจัยมีแผนการทดลอง ขั้นตอนการเตรียมวัสดุอุปกรณ์และเก็บผลการทดลองดังนี้

#### 1. แผนการทดลองและลำดับการทดลอง

ในการทดลองมีการกำหนดตัวแปรคงที่ ได้แก่ การป้อนลวดแบบอัตโนมัติในการเชื่อม กำหนดตัวแปรคงที่ได้ที่ 0.9 mm/min ซึ่งเป็นอ้างอิงจากรหัสโค้ดบนตัวเครื่องเมื่อเทียบกับความหนาของวัสดุที่ใช้ทดลอง สำหรับระยะห่างระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงานจึงกำหนดให้เท่ากันที่ 3 mm ทุกชิ้นในการทดลองและกำหนดมุมที่ใช้ในการเชื่อม  $90^{\circ}$  โดยตัวแปรที่ทำการศึกษากำหนดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมจากการสุ่มตัวแปรทั้งหมด 5 ระดับคือ 10, 12, 14, 16 และ 18 V ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำการสุ่มทดลองเชื่อมและสามารถเชื่อมได้ ควบคุมความเร็วในการเชื่อม 5 ระดับเช่นกัน คือ 25, 50, 75, 100 และ 125 mm/min แสดงข้อมูลดังตารางที่ 6 จากตัวแปรและระดับที่เลือกใช้ในการทดลองสามารถนำมาเขียนแผนการทดลองได้ตามลำดับการทดลองที่แสดงได้ดังตารางที่ 7 ซึ่งในการทดลองได้แบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 ชุด ชุดละ 25 ชิ้น

ตารางที่ 6 ตัวแปรและระดับที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	ระดับ				
		1	2	3	4	5
1. กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม	V	10	12	14	16	18
2. ความเร็วในการเชื่อม	mm/min	25	50	75	100	125

ตารางที่ 7 ลำดับการทดลอง

ลำดับที่	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (V)
1	25	10.0
2		12.0
3		14.0
4		16.0
5		18.0
6	50	10.0
7		12.0
8		14.0
9		16.0
10		18.0
11	75	10.0
12		12.0
13		14.0
14		16.0
15		18.0
16	100	10.0
17		12.0
18		14.0
19		16.0
20		18.0
21	125	10.0
22		12.0
23		14.0

ตารางที่ 7 ลำดับการทดลอง (ต่อ)

ลำดับที่	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (V)
24	125	16.0
25		18.0

2. วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

ในการทดลองใช้เหล็กกล้าตามมาตรฐาน JIS G3113 โดยตัดเตรียมชิ้นงานทดลองให้ได้ขนาด 100 x 100 x 1.5 mm สำหรับใช้เป็นโลหะพื้นแสดงดังภาพที่ 17 หลังจากเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามกำหนดแล้วจึงนำมาทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) และนำมาเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อม CMT ยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPuls Synergic 2700 Cold Metal Transfer แสดงดังภาพที่ 18

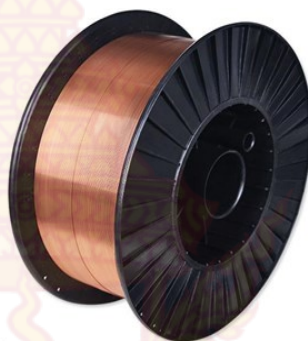


ภาพที่ 17 เหล็กกล้า JIS G3113



ภาพที่ 18 เครื่องเชื่อม CMT

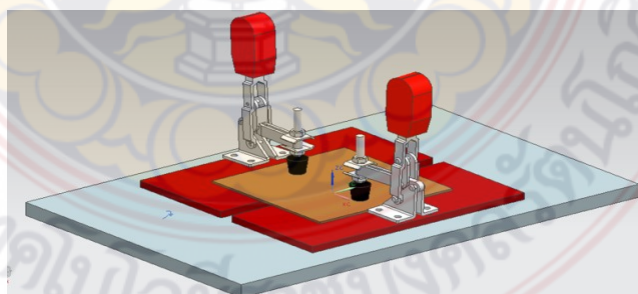
ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมทดลอง เป็นลวดเชื่อมประเภทเปลือยตัน (Solid Wire) สำหรับเชื่อมเหล็กกล้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm แสดงดังภาพที่ 19 และใช้เตาเดินราง ยี่ห้อ Gazcut รุ่น Straight line cutting machine Kc-12 Max 3 แสดงดังภาพที่ 20 ควบคุมความเร็วในการเดินเชื่อม ระหว่างการเชื่อมใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อไม่ให้ชิ้นงานโก่งงอขณะทำการเชื่อม เนื่องจากความร้อนจากการเชื่อม โดยได้ออกแบบอุปกรณ์จับยึดที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 19 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 20 เต้าเดินราง



ภาพที่ 21 ออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

### 3. การตรวจสอบและการวัดผล

หลังการเชื่อมนำชิ้นงานตัวอย่างมาตรวจสอบรูปร่างและขนาดที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความสูงและความกว้างของรอยเชื่อมและการจำลองในรูปแบบ 3 มิติ ด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ (3D Laser Scan) รุ่น ATOSCORE 300 ยี่ห้อ GOM แสดงดังภาพที่ 22

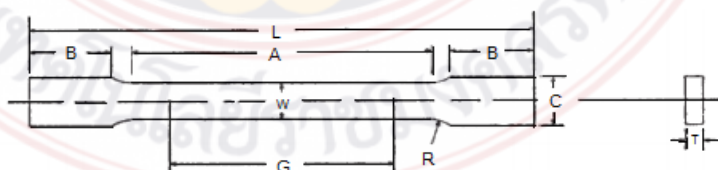


ภาพที่ 22 เครื่องสแกน 3 มิติ

ในการตรวจสอบสมบัติทางกลด้วยการทดสอบแรงดึง ตัดชิ้นงานที่สแกนเก็บข้อมูลแล้วด้วยเครื่องตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดหรือ Wire-EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FA20S Advance แสดงดังรูปที่ 23 ตัดชิ้นงานหลังเชื่อมให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8-04 แสดงดังภาพที่ 24 และมีขนาดในแต่ละส่วนตามตารางที่ 8



ภาพที่ 23 เครื่อง Wire - EDM ยี่ห้อ Mitsubishi



ภาพที่ 24 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 8 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8-04

Symbol	Dimension (mm)
T	2
C	10
W	6
G	30
A	48
L	100
R	2
B	25

หลังการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่ใช้ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z020 ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งจุลภาคใช้ชิ้นงานชุดเดียวกัน การเตรียมนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมมาตัดชิ้นงานให้เหมาะสมโดยใช้เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบยี่ห้อ Bestek รุ่น TT-201A แสดงดังภาพที่ 26





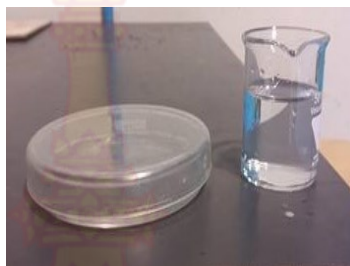
ภาพที่ 26 เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ

หลังการตัดเตรียมชิ้นงานนำไปหล่อในเรซินด้วยวิธีการขึ้นรูปตัวเรือนแบบเย็น และการขัดผิวขึ้นโดยใช้เครื่องขัด ยี่ห้อ Strues รุ่น Dap-7 แสดงดังภาพที่ 27 ทำการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 100 จนถึงเบอร์ 1,000 ตามลำดับ จากนั้นขัดผิวชิ้นงานด้วยผงขัดที่ทำมาจากอลูมินา (Alumina Oxide;  $Al_2O_3$ ) โดยผงขัดใช้ขนาด  $0.3 \mu m$  บนผ้าสักหลาด

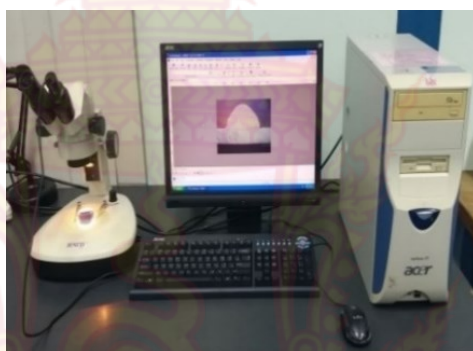


ภาพที่ 27 เครื่องขัดชิ้นงานทดสอบ

การกัดกรด (Etching) ชิ้นงานตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนำมาล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปกัดด้วยน้ำยาซึ่งใช้กรดไนตริกร้อยละ 2.5 ผสมกับแอลกอฮอล์ หลังจากการกัดกร่อนนำไปล้างด้วยน้ำและเป่าให้แห้งแล้วแสดงในภาพที่ 28 หลังจากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในระดับมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ ยี่ห้อ JENCO™ USA รุ่น V203410 แสดงดังภาพที่ 29



ภาพที่ 28 การกัดกรดผิวชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

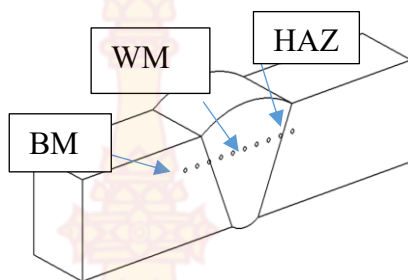


ภาพที่ 29 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ค่าความแข็งจุลภาคของชิ้นงานทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ (MicroVickers) โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคอเนกประสงค์ยี่ห้อ (Wilson Hardness) รุ่น TUKON 1102 แสดงดังภาพที่ 30 วัดความแข็งจุลภาคใช้หัวเพชรที่มีลักษณะเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมหัวกดเพชรมีลักษณะฐานสี่เหลี่ยมที่ปลายหัวกดทำมุม  $136^\circ$  ใช้แรงกด 10 Kgf กดแช่เป็นเวลา 5 s ในเบื้องต้นกำหนดตำแหน่งตรวจสอบบริเวณรอยเชื่อม (WM) บริเวณกระหนาบร้อน (HAZ) และวัสดุพื้น (BM) โดยแสดงดังภาพที่ 31 โดยกำหนดระยะห่างระหว่างจุดตำแหน่งจุดกดที่ 0.5 mm



ภาพที่ 30 เครื่องทดสอบความแข็ง



ภาพที่ 31 ตำแหน่งตรวจสอบความแข็งจุลภาค

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและสารประกอบเชิงโลหะทำการวัดค่าความเข้มข้นของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8-Discover แสดงดังภาพที่ 32 และตรวจสอบการจัดเรียงตัวในโครงสร้างผลึกโดย Electron backscatter diffraction (EBSD) ตีเทคเตอร์ที่ติดอยู่กับเครื่อง Emission scanning electron microscope (FESEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น SU8230



ภาพที่ 32 เครื่อง XRD





## บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองได้กำหนดตัวแปรที่สำคัญไว้ 2 ตัวแปร ได้แก่ กระแสไฟฟ้าและความเร็วในการเชื่อม เพื่อศึกษาผลที่มีต่อรูปร่างจากการเชื่อมและสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึงและความแข็งจุลภาคตลอดจนโครงสร้างจุลภาคสามารถแสดงผลไว้ดังนี้

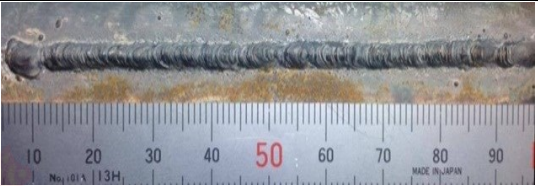

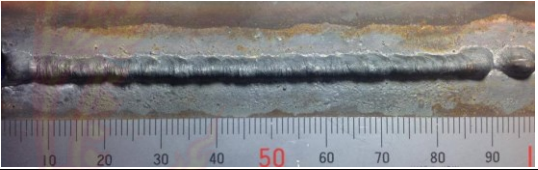
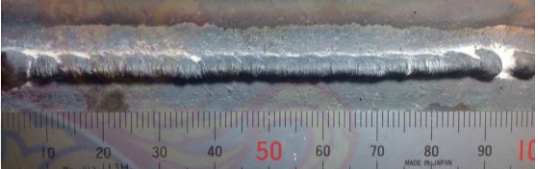
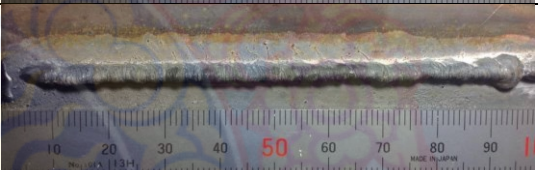



### 1. รูปร่างของรอยเชื่อม

จากการกำหนดตัวแปรต่างๆตามแผนการทดลองชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้วแสดงดังตารางที่ 9 โดยกำหนดตัวแปรคงที่คือ อัตราป้อนโลหะเติม 0.9 mm/min ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ช 3 mm และมุมที่ใช้ในการเชื่อม  $90^\circ$  เท่ากันทุกการทดลอง






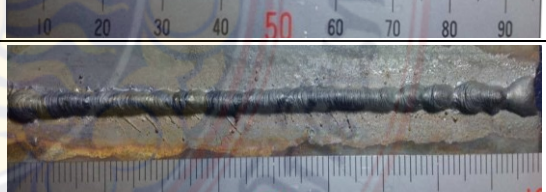

ตารางที่ 9 แนวเชื่อมจากการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อม CMT มีระดับและตัวแปรแตกต่างกัน

ลำดับที่	กระแสไฟฟ้า (V) ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	ภาพถ่ายแนวเชื่อม
1	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 25 mm/min	
2	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 25 mm/min	
3	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 25 mm/min	
4	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 25 mm/min	





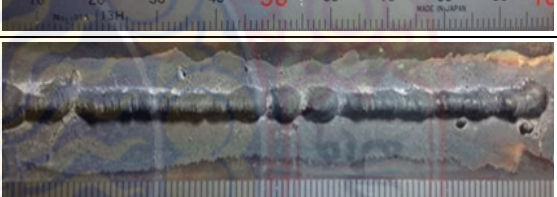

ตารางที่ 9 แนวเชื่อมจากการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อม CMT มีระดับและตัวแปรแตกต่างกัน (ต่อ)

ลำดับที่	กระแสไฟฟ้า (V) ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	ภาพถ่ายแนวเชื่อม
5	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 25 mm/min	
6	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 50 mm/min	
7	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 50 mm/min	
8	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 50 mm/min	
9	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 50 mm/min	
10	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 50 mm/min	
11	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 75 mm/min	
12	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 75 mm/min	

ตารางที่ 9 แนวเชื่อมจากการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อม CMT ระดับและตัวแปรแตกต่างกัน (ต่อ)

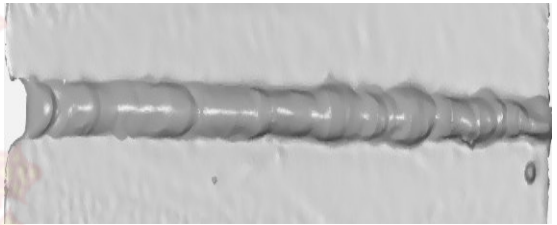
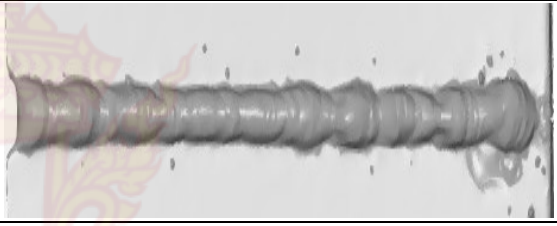



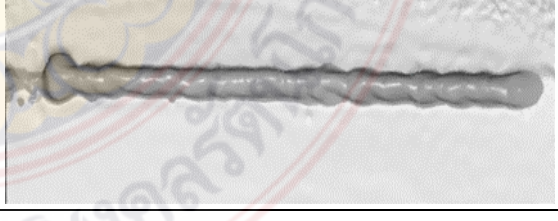
ลำดับที่	กระแสไฟฟ้า (V) ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	ภาพถ่ายแนวเชื่อม
13	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 75 mm/min	
14	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 75 mm/min	
15	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 75 mm/min	
16	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 100 mm/min	
17	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 100 mm/min	
18	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 100 mm/min	
19	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 100 mm/min	

ตารางที่ 9 แนวเชื่อมจากการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อม CMT มีระดับและตัวแปรแตกต่างกัน (ต่อ)

ลำดับที่	กระแสไฟฟ้า (V) ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	ภาพถ่ายแนวเชื่อม
20	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 100 mm/min	
21	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 125 mm/min	
22	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 125 mm/min	
23	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 125 mm/min	
24	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 125 mm/min	
25	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 125 mm/min	

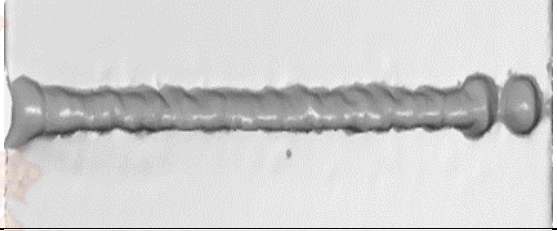
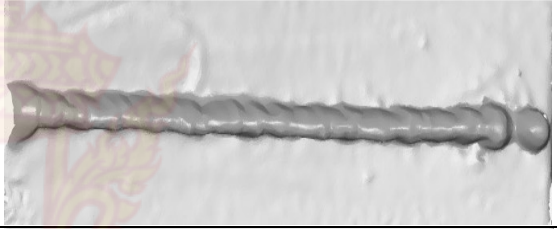


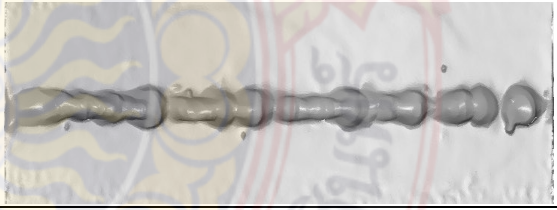
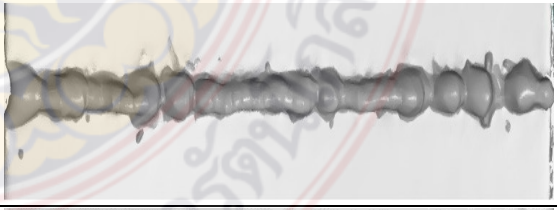

จากตารางที่ 9 เมื่อนำแนวเชื่อมมาสแกน (3D Laser Scan) สามารถแสดงให้เห็นลักษณะข้อบกพร่องของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันชัดเจนขึ้น เช่น ตำแหน่งที่ไม่สมบูรณ์ตลอดจนตำหนิจากสเก็ดเชื่อมโดยผลสแกนแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมโดยเครื่องสแกน 3 มิติ

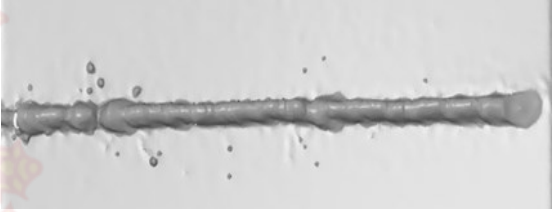
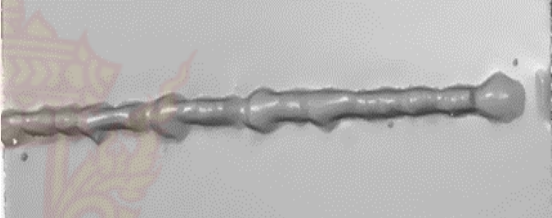


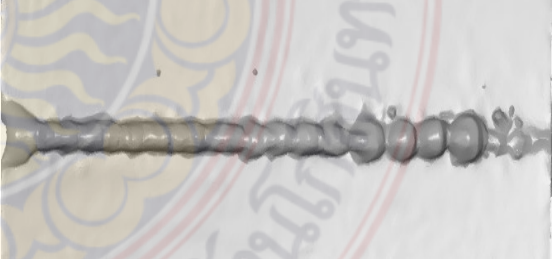
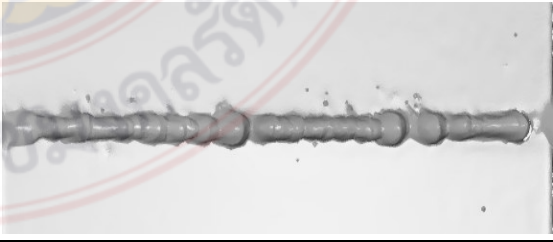
ลำดับที่	กระแสไฟฟ้า (V) ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	พื้นผิวจากการสแกน
1	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 25 mm/min	
2	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 25 mm/min	
3	กระแสไฟฟ้า 14V ความเร็ว 25 mm/min	
4	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 25 mm/min	
5	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 25 mm/min	
6	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 50 mm/min	



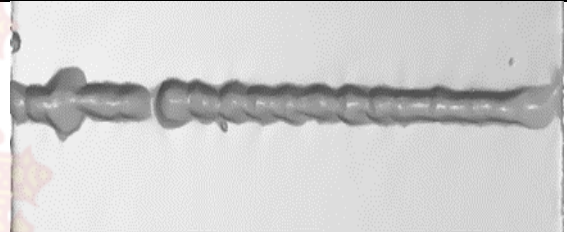
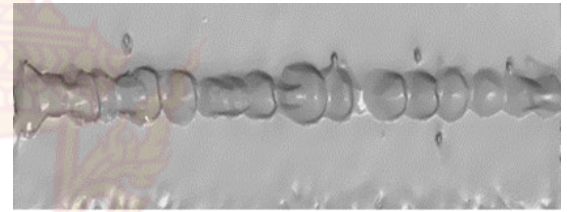

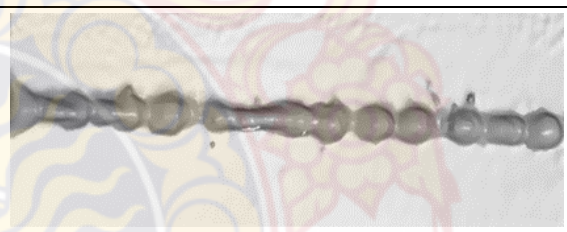
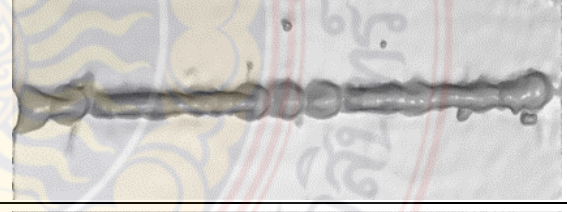
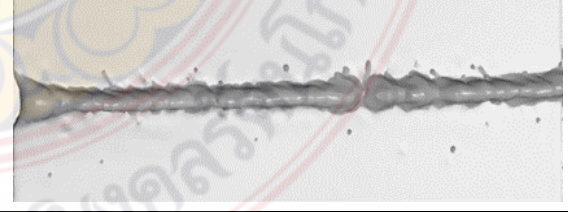
ตารางที่ 10 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมโดยเครื่องสแกน 3 มิติ (ต่อ)

ลำดับที่	กระแสไฟฟ้า (V) ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	พื้นผิวจากการสแกน
7	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 50 mm/min	
8	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 50 mm/min	
9	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 50 mm/min	
10	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 50 mm/min	
11	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 75 mm/min	
12	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 75 mm/min	
13	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 75 mm/min	

ตารางที่ 10 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมโดยเครื่องสแกน 3 มิติ (ต่อ)

ลำดับที่	กระแสไฟฟ้า (V) ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	พื้นผิวจากการสแกน
14	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 75 mm/min	
15	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 75 mm/min	
16	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 100 mm/min	
17	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 100 mm/min	
18	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 100 mm/min	
19	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 100 mm/min	

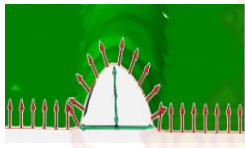
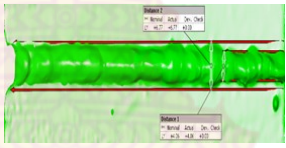
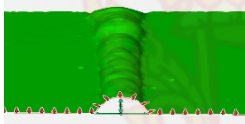
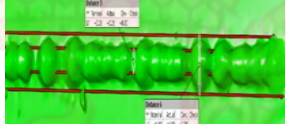
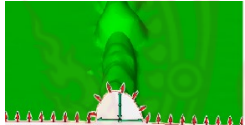
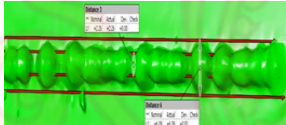
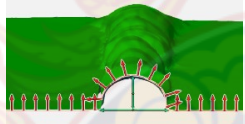
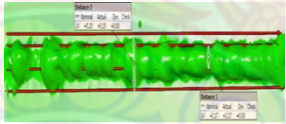
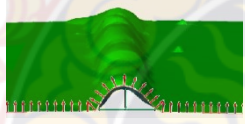

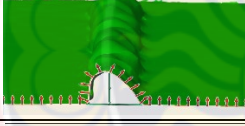
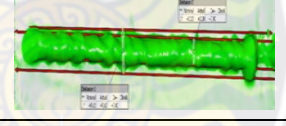
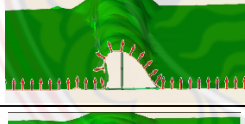
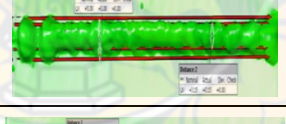



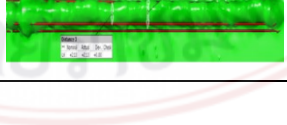
ตารางที่ 10 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมโดยเครื่องสแกน 3 มิติ (ต่อ)

ลำดับที่	กระแสไฟฟ้า (V) ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	พื้นผิวจากการสแกน
20	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 100 mm/min	
21	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 125 mm/min	
22	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 125 mm/min	
23	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 125 mm/min	
24	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 125 mm/min	
25	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 125 mm/min	

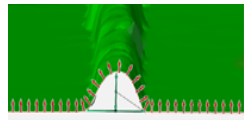
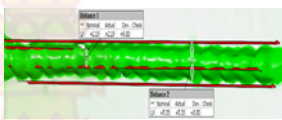
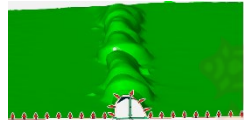
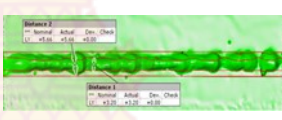
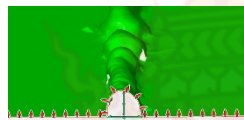
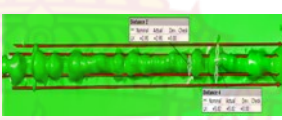
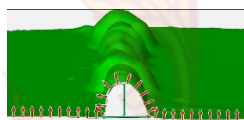


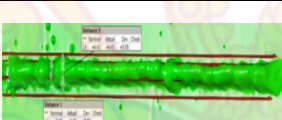
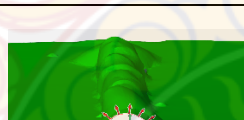
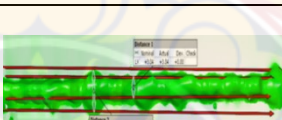
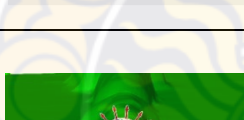
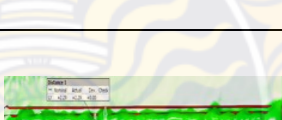

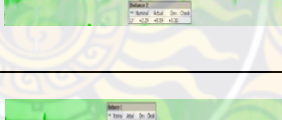
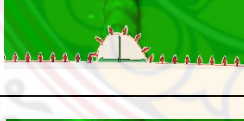
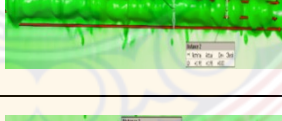

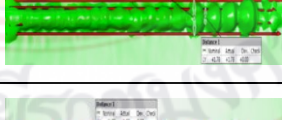
ผลจากการสแกนแสดงให้เห็นตำหนิที่เกิดขึ้นจากการเชื่อม แลพยสะกัดจากการเชื่อมเกิดขึ้นมากกับชั้นที่ 22 ซึ่งมีการใช้กระแสไฟฟ้าที่ 12 V ความเร็วในการเชื่อมสูงสุดที่ 125 mm/min

ตลอดจนมีแนวเชื่อมที่ไม่ต่อเนื่อง และมีลักษณะแนวเชื่อมไม่เต็ม (Under Fill) ผลการสแกนแนวเชื่อมเมื่อนำมาวัดขนาดความกว้างและความสูงของรอยเชื่อมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 11

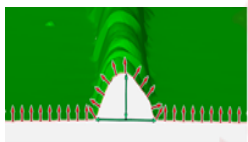
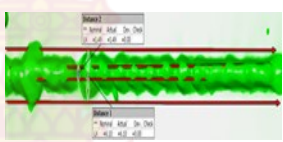
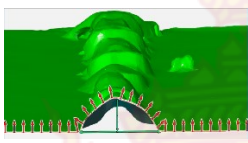
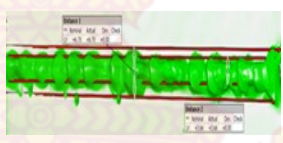
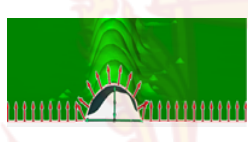
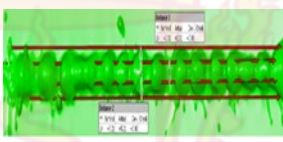
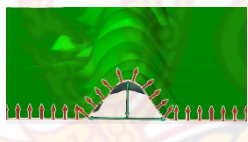
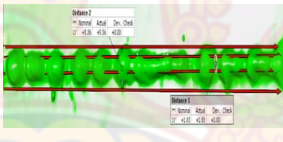

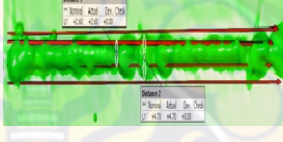

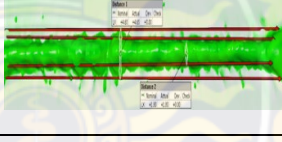
ตารางที่ 11 ผลของการสแกนตรวจสอบขนาดความสูงและความกว้างของรอยเชื่อม

ลำดับที่	ผลของการสแกนตรวจสอบขนาด		ค่าความสูง (mm)	ค่าความกว้าง (mm)
	ความสูง	ความกว้าง		
1			2.44	5.41
2			3.13	4.95
3			2.79	4.18
4			2.46	3.71
5			2.32	3.43
6			2.61	3.91
7			2.72	4.12
8			2.85	3.78
9			2.55	2.85

ตารางที่ 11 ผลของการสแกนตรวจสอบขนาดความสูงและความกว้างของรอยเชื่อม (ต่อ)

ลำดับที่	ผลของการสแกนตรวจสอบขนาด		ค่าความสูง (mm)	ค่าความกว้าง (mm)
	ความสูง	ความกว้าง		
10			1.90	3.76
11			2.26	4.43
12			2.83	4.38
13			2.65	4.05
14			2.43	3.24
15			1.98	4.52
16			1.95	3.94
17			1.66	3.08
18			2.00	3.17
19			2.13	3.03

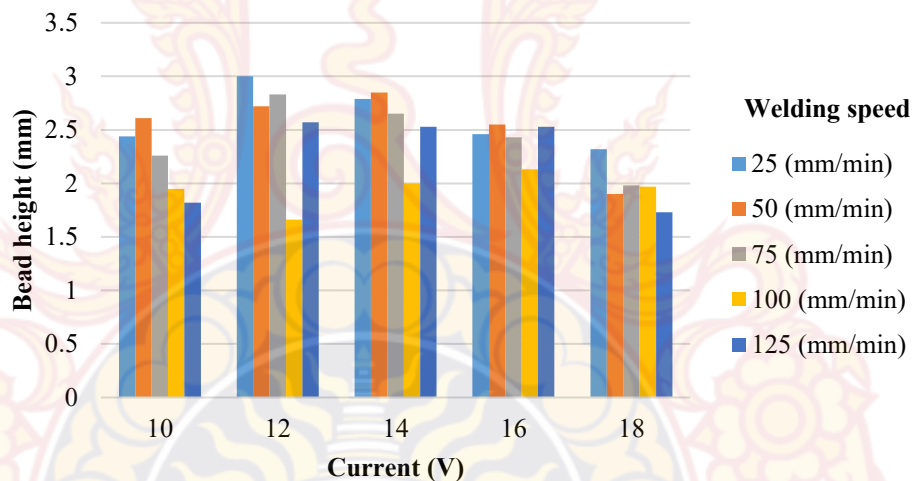
ตารางที่ 11 ผลของการสแกนตรวจสอบขนาดความสูงและความกว้างของรอยเชื่อม (ต่อ)

ลำดับที่	ผลของการสแกนตรวจสอบขนาด		ค่าความสูง (mm)	ค่าความกว้าง (mm)
	ความสูง	ความกว้าง		
20			1.97	3.79
21			1.82	5.21
22			2.57	3.61
23			2.53	3.75
24			2.53	3.69
25			1.73	3.22

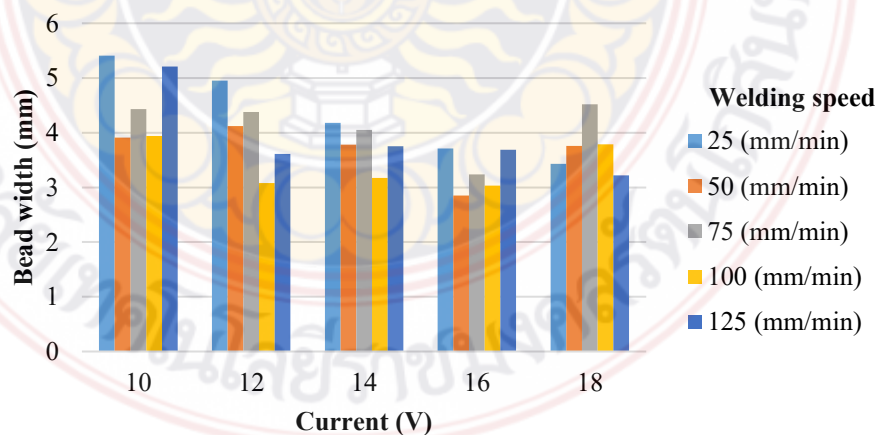
ผลการสแกนและการตรวจสอบขนาดความสูงตลอดจนความกว้างของรอยเชื่อม แสดงดังภาพที่ 33 และ 34 พบว่า ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมส่งผลให้ขนาดรอยเชื่อมมีขนาดแตกต่างกัน ตัวแปรที่ทำให้รอยเชื่อมมีความสูงมากที่สุดคือ การกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ 12 V และความเร็วการเชื่อมที่ 25 mm/min (ขั้นที่ 2) มีความสูงเท่ากับ 3.0 mm สำหรับการใช้กระแสไฟฟ้าน้อยๆ (10 V) ความสูงลดลงเมื่อความเร็วการเชื่อมเพิ่มขึ้นแต่มีรูปแบบการกระจายตัวของโลหะเติมและมีความกว้างของรอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอ โดยรวมจากการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าที่ 12-18V แนวน้อยความสูงของแนวเชื่อมลดลงเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า สำหรับความกว้างของรอยเชื่อมมีแนวโน้มคงที่เมื่อใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่า 12 V แต่อย่างไรก็ตามความเร็วในการเชื่อมทำให้ความกว้างและความสูงของแนวเชื่อมมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ด้วยความเร็วการเชื่อมที่สูงทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของบริเวณหลอมเหลวและผลทำให้ความสูงและความกว้างของรอยเชื่อมลดลงได้ ดังนั้นการลดลงของความสูงเป็นผลมาจากขนาด

บริเวณหลอมเหลวหรือบ่อหลอมละลายที่ได้รับผลกระทบจากอัตราการเย็นตัว [25] นอกจากนี้ กระแสไฟฟ้าที่สูงและการเดินเชื่อมซ้ำ ก็ยังมีผลกระทบกับขนาดบ่อหลอมละลาย (Weld pool) และความสูงของรอบเชื่อมได้เช่นกัน [18]

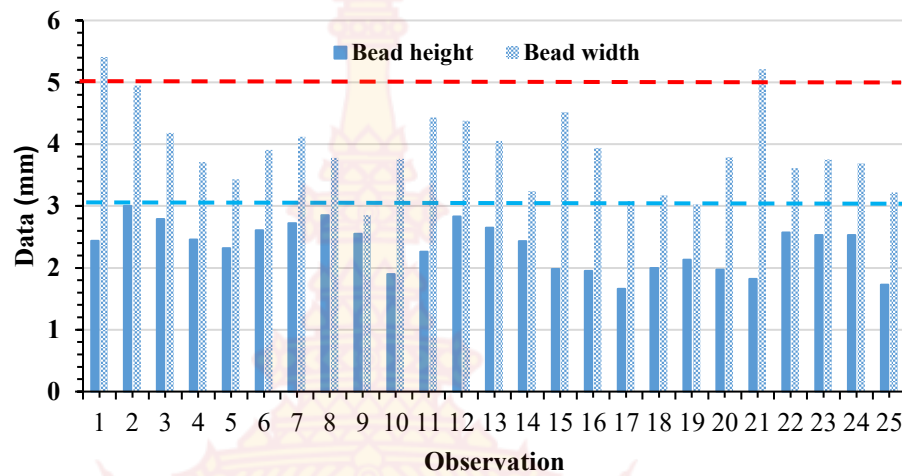
เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานการเชื่อม MIG สำหรับเหล็กในรถยนต์ที่มีความหนา 1.5 mm [26] ซึ่งมีการกำหนดว่าชิ้นงานที่มีความกว้างของรอยเชื่อมอยู่ในช่วง 5-10 mm และมีความสูงไม่ควรเกิน 3 mm จะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ จากภาพที่ 35 พบว่า ความกว้างของชิ้นงานที่ยอมรับได้มี 3 ชั้น คือ ชั้นที่ 1, 2 และ 21 เมื่อพิจารณาพร้อมกับความสูงพบว่า ส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดไว้ยกเว้นชั้นที่ 14, 17 และ 20-25 จากการพิจารณาผลของการซึมลึกภายในรอยเชื่อมพบว่า การซึมลึกเกิดขึ้นกับบางตัวแปรที่ใช้ในการทดลองซึ่งชิ้นงานที่แสดงรายละเอียดของรอยเชื่อมและการซึมลึกแสดงดังภาพที่ 36 โดยชั้นที่ 21 ไม่แสดงการซึมลึกเช่นกัน ดังนั้นชิ้นงานที่เหมาะสมจึงมีแต่ชั้นที่ 1 และ 2 เท่านั้น



ภาพที่ 33 ความสูงของแนวเชื่อม



ภาพที่ 34 ความกว้างของแนวเชื่อม



ภาพที่ 35 ความสูงของแนวเชื่อม



ภาพที่ 36 รูปร่างภาคตัดขวางและการซึมลึกของรอยเชื่อม

## 2. การตรวจสอบสมบัติเชิงกล

### 2.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมแสดงดังภาพที่

37 และผลการเก็บข้อมูลแสดงข้อมูลดังตารางที่ 12





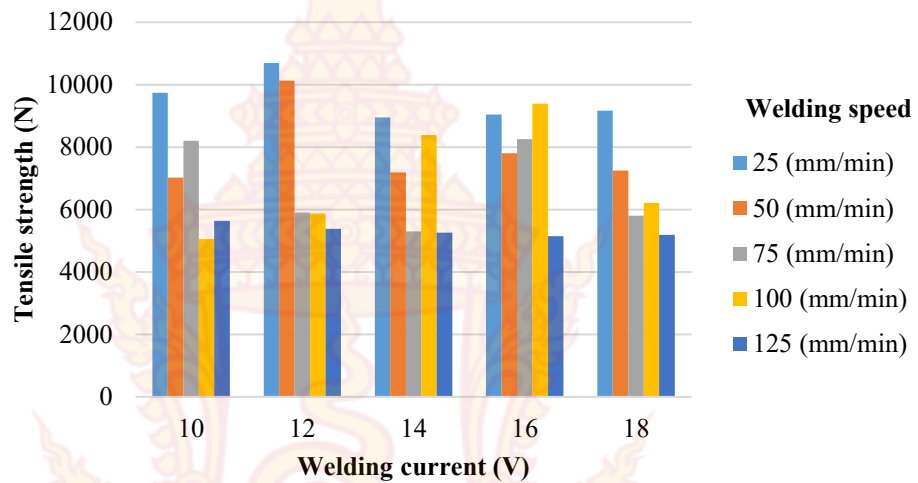
ภาพที่ 37 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม

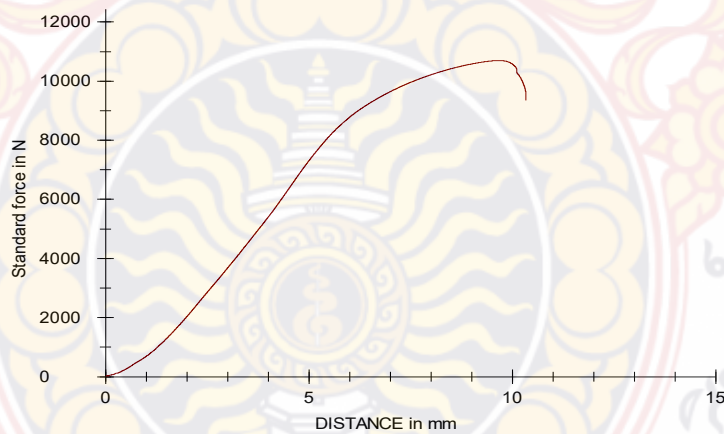
ลำดับที่	ตัวแปร	ความต้านทานแรงดึง (N)
1	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 25 mm/min	9740.85
2	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 25 mm/min	10,695.04
3	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 25 mm/min	8944.98
4	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 25 mm/min	9038.57
5	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 25 mm/min	9162.39
6	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 50 mm/min	7022.19
7	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 50 mm/min	10125.95
8	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 50 mm/min	7183.73
9	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 50 mm/min	7797.34
10	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 50 mm/min	7251.38
11	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 75 mm/min	8200.12
12	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 75 mm/min	5900.34
13	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 75 mm/min	5300.60
14	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 75 mm/min	8250.03
15	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 75 mm/min	5800.40
16	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 100 mm/min	5049.19
17	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 100 mm/min	5875.82
18	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 100 mm/min	8387.01
19	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 100 mm/min	9389.11
20	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 100 mm/min	6214.05
21	กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็ว 125 mm/min	5634.14
22	กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็ว 125 mm/min	5383.78
23	กระแสไฟฟ้า 14 V ความเร็ว 125 mm/min	5258.49
24	กระแสไฟฟ้า 16 V ความเร็ว 125 mm/min	5143.60
25	กระแสไฟฟ้า 18 V ความเร็ว 125 mm/min	5191.05

จากการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมในแต่ละการทดลองแสดงดังภาพที่ 38 พบว่า ชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุด ได้แก่ ชิ้นงานทดสอบลำดับที่ 2 ซึ่งเชื่อมด้วย

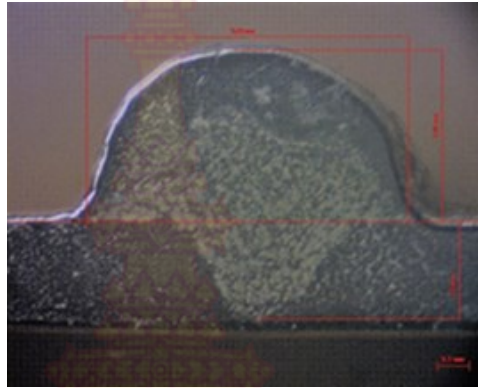
กระแสไฟฟ้า 12 V ความเร็วในการเชื่อมที่ 25 mm/min ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ คือ ที่ตัวแปรดังกล่าวมีความเหมาะสมที่สุด โดยรอยเชื่อมมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดคือ 10,695.04 N ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 39 และจากการตรวจสอบการซึมลึกของแนวเชื่อมแสดงดังภาพที่ 40 พบว่าแนวเชื่อมมีการซึมลึกมากจึงเป็นสาเหตุทำให้มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดเช่นกัน



ภาพที่ 38 ค่าความต้านทานแรงดึงที่กระแสไฟฟ้าและความเร็วในการเชื่อม

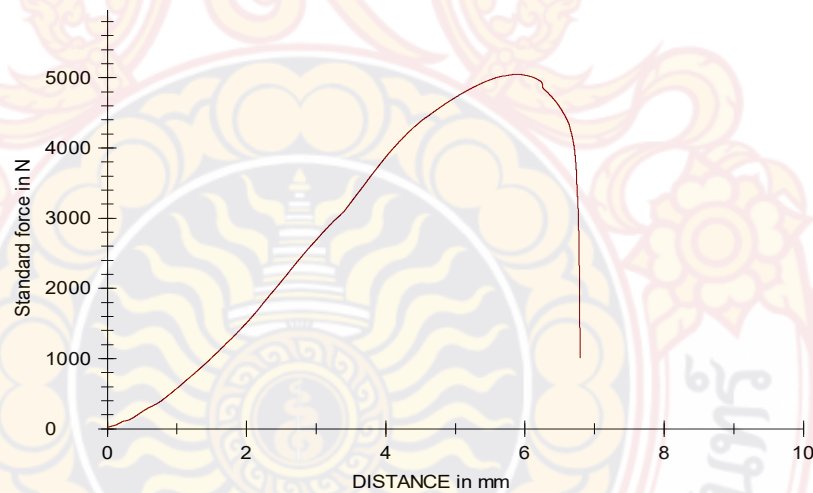


ภาพที่ 39 ผลการทดสอบชิ้นงานความต้านทานแรงดึงสูงสุด

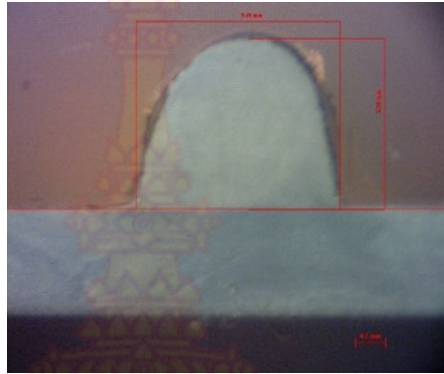


ภาพที่ 40 ชิ้นงานความต้านทานแรงดึงสูงสุด

สำหรับชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงต่ำสุด ได้แก่ ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็วในการเชื่อมที่ 100 mm/min (ชิ้นงานทดสอบลำดับที่ 16) โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 5,049.19 N ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 41 และจากการตรวจสอบการซึมลึกแสดงดังภาพที่ 42 พบว่า ชิ้นงานไม่แสดงให้เห็นถึงการซึมลึกจึงทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงน้อย



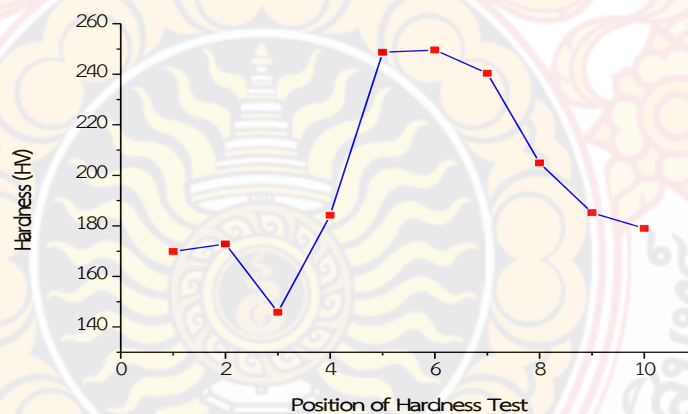
ภาพที่ 41 ผลการทดสอบชิ้นงานความต้านทานแรงดึงต่ำสุด



ภาพที่ 42 ชิ้นงานความต้านทานแรงดึงต่ำสุด

## 2.2 ความแข็งจุลภาค

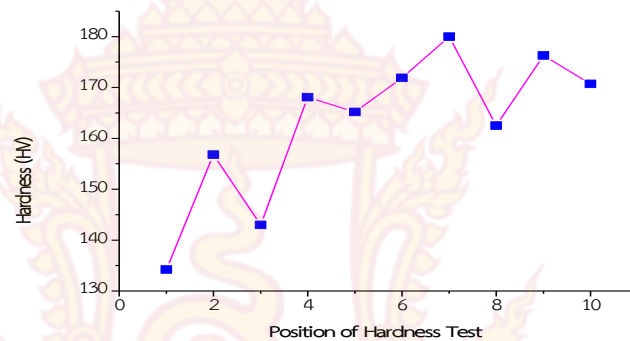
การวัดความแข็งจุลภาคแต่ละบริเวณพบว่าเนื้อโลหะ (BM) จะมีความแข็งจุลภาคต่ำกว่าบริเวณเนื้อเชื่อม (WM) ส่วนบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ) มีค่าความแข็งจุลภาคต่ำกว่า WM แต่จะสูงกว่า BM ดังนั้นเมื่อได้รับอิทธิพลความร้อนในขณะที่เชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจึงทำให้ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งจุลภาคเช่นกัน โดยลักษณะของผลจากการทดสอบความแข็งจุลภาคแสดงดังภาพที่ 43 และ 44 สำหรับชิ้นงานมีความแข็งจุลภาคสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ



ภาพที่ 43 ผลการทดสอบความแข็งจุลภาคที่กระแสเชื่อม 10 V ชิ้นที่มีความต้านทานสูงสุด

ภาพที่ 43 แสดงผลการทดสอบความแข็งจุลภาคจากการเชื่อมที่กระแสไฟฟ้า 10 V ความเร็วในการเชื่อมที่ 25 mm/min จากการวิเคราะห์ผลในการเชื่อมพบว่า ค่าความแข็งจุลภาคของแนวเชื่อมมีค่ามากที่สุดที่ 250 HV และบริเวณรอยเชื่อม (WM) มีค่าความแข็งจุลภาคของแนวเชื่อมสูงสุด ภาพที่ 44 จากการใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 18 V ความเร็วในการเชื่อม 125 mm/min จะให้ค่าความแข็งจุลภาคของแนวเชื่อมที่ต่ำสุดที่ 176 HV อย่างไรก็ตามแนวโน้มความแข็งจุลภาคที่พบในงานวิจัยแสดงให้เห็นรอยเชื่อมมีความแข็งแรงสูงกว่าบริเวณกระทบร้อนและวัสดุพื้นสอดคล้อง

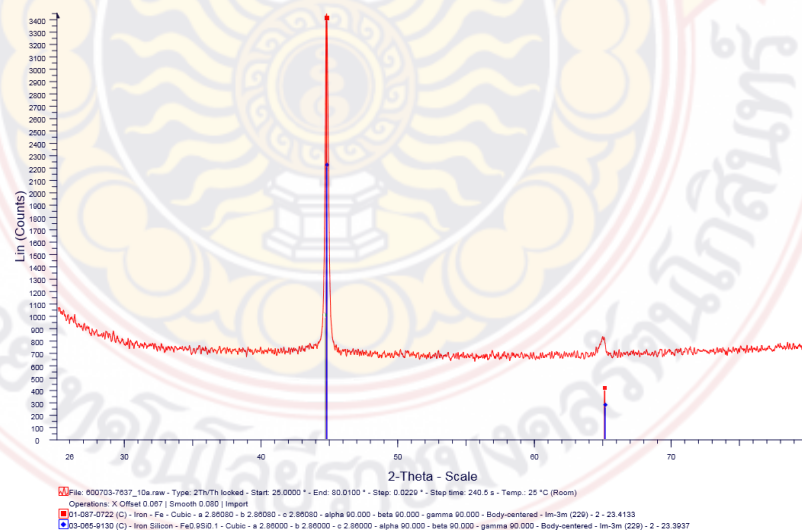
กับงานวิจัยของ Gu'ral และคณะ [27] โดยที่ภายในรอยเชื่อมง่ายต่อการเกิดเฟสของมาเทนไซต์ (Martensite) เพราะในการเชื่อมเหล็กมีปริมาณคาร์บอนที่สูงจะทำให้มีความแข็งสูงที่บริเวณดังกล่าวเช่นกัน ดังนั้นความแข็งที่ลดลงที่บริเวณกระแทกร้อนเนื่องจากการลดลงของการเกิดมาเทนไซต์ อย่างไรก็ตามความแข็งจุลภาคในรอยเชื่อมที่สูงจากงานวิจัยของ Boumerzoug [28] และคณะพบว่า มีหลายปัจจัยและปัจจัยหนึ่งที่สำคัญได้แก่ ปริมาณความเค้นตกค้างซึ่งเกิดขึ้นในรอยเชื่อม สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ KAM อธิบายผล ซึ่งจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไปเพื่อแสดงให้เห็นแนวโน้มของความเครียดตกค้าง (Residual strain) ที่มีอยู่ในชิ้นงาน



ภาพที่ 44 ผลการทดสอบความแข็งที่กระแสนเชื่อม 18 V ชั้นที่มีความต้านทานต่ำสุด

### 2.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึก

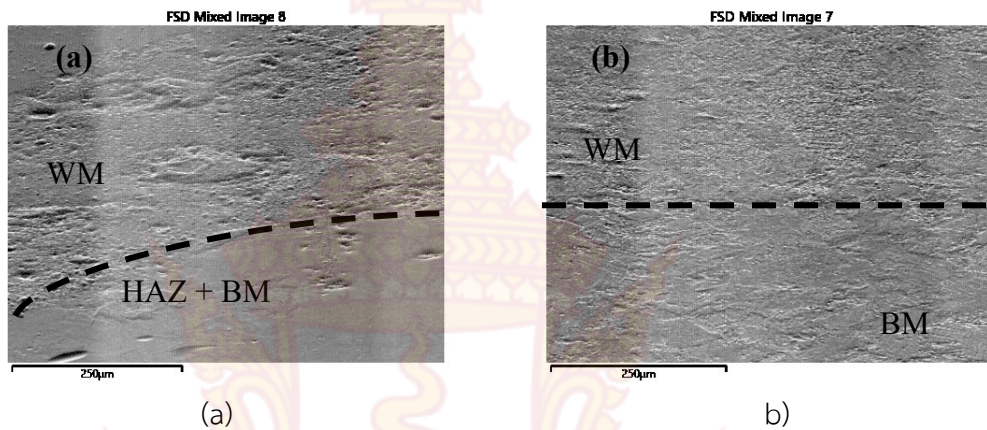
จากผลการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ( X-Ray Diffraction; XRD) บริเวณรอยเชื่อมสามารถแสดงผลได้ดังภาพที่ 45 จะพบว่าบริเวณรอยเชื่อมปรากฏสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_{0.9}Si_{0.1}$  มีโครงสร้างผลึกแบบ Body-Centered Cubic และมีค่าคงที่แลตติส a, b และ c เท่ากับ  $2.86000 \text{ \AA}$



ภาพที่ 45 ผลการตรวจสอบ XRD

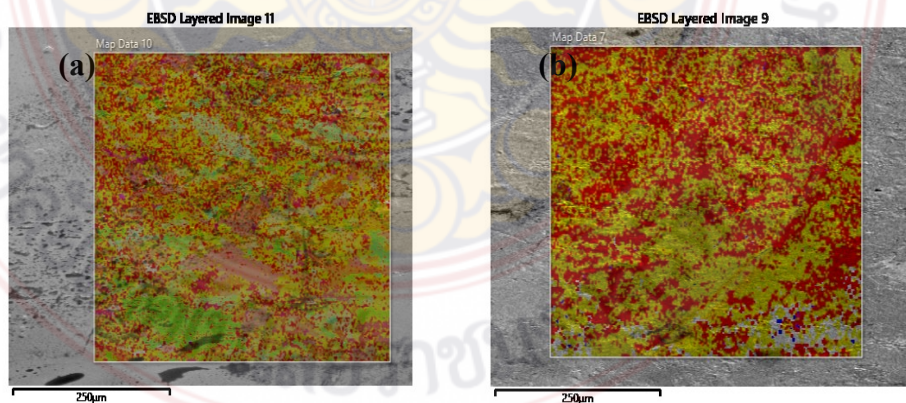
#### 2.4 โครงสร้างจุลภาคและการจัดเรียงตัวของผลึก

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูงจากการทำ SEM ของชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและต่ำสุดแสดงดังภาพที่ 46 โดยแบ่งบริเวณหลอมละลาย บริเวณกระแทกร้อน และวัสดุพื้นโดยใช้เส้นประ ในขณะที่ภาพที่ 46 (b) ไม่ปรากฏการซึมลึกในโลหะพื้นจากการเชื่อม

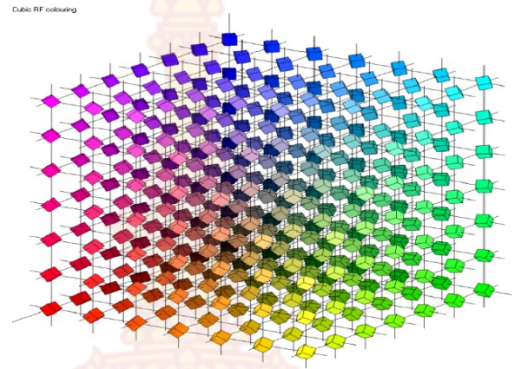


ภาพที่ 46 โครงสร้างจุลภาค (a) ตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ (b) ต่ำสุด

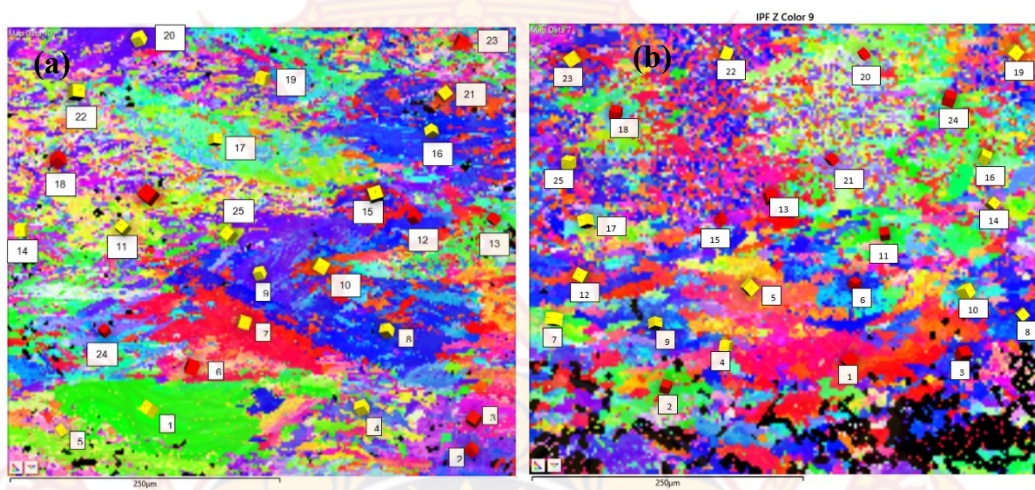
เมื่อตรวจสอบตัวอย่างโดยใช้ EBSD แสดงผลดังภาพที่ 47 พื้นที่ตรวจสอบมีสัดส่วนเฟส (Phase Fraction) ของ Fe 30.45 %, Si 68.10 %, Mn 0.07 % และ FeSi 0.11% สำหรับภาพที่ 47 (a) ขณะที่ (b) ประกอบด้วย Fe 40.05 %, Si 52.30 %, Mn 0.05 % และ FeSi 0.29% โดยที่ เหลือคือ Zero Solutions ที่เกิดขึ้นจากการตรวจสอบ ภาพที่ 48 แสดงรูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึกที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันในโครงสร้างจุลภาค เมื่อผลการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันของโครงสร้างจุลภาคแสดงได้ดังภาพที่ 49 และหมายเลขที่แสดงไว้ใน (กล่อง) ลูกซาค์ จะนำไปใช้แสดงผลของคิกุชิ (Kikuchi pattern) ของการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน โดยผลของคิกุชิแสดงไว้ดังตารางที่ 13 ซึ่งพบว่า โครงสร้างจุลภาคและผลึกมีการจัดเรียงตัวจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 47 บริเวณที่ตรวจสอบด้วย EBSD (a) ตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ (b) ต่ำสุด



ภาพที่ 48 รูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึกสำหรับแสดงในโครงสร้างจุลภาค



ภาพที่ 49 การจัดเรียงตัวของผลึก (a) ตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ (b) ต่ำสุด

ตารางที่ 13 คิคุชิของชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและต่ำสุดของการจัดเรียงตัวในผลึก

No.	High strength	Low strength
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		



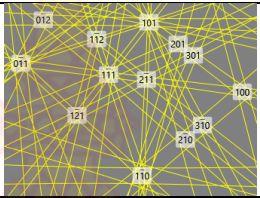
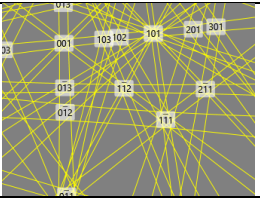
ตารางที่ 13 คิคุชิของชั้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและต่ำสุดของการจัดเรียงตัวในผลึก (ต่อ)

No.	High strength	Low strength
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		

ตารางที่ 13 คิวซีของชั้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและต่ำสุดของการจัดเรียงตัวในผลึก (ต่อ)

No.	High strength	Low strength
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		

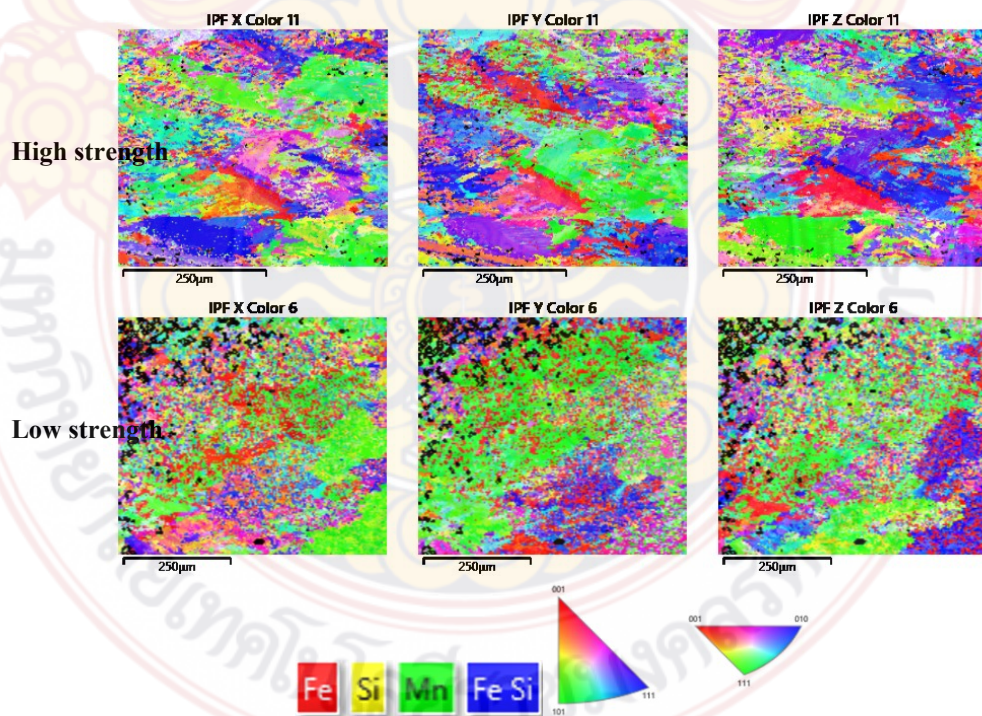
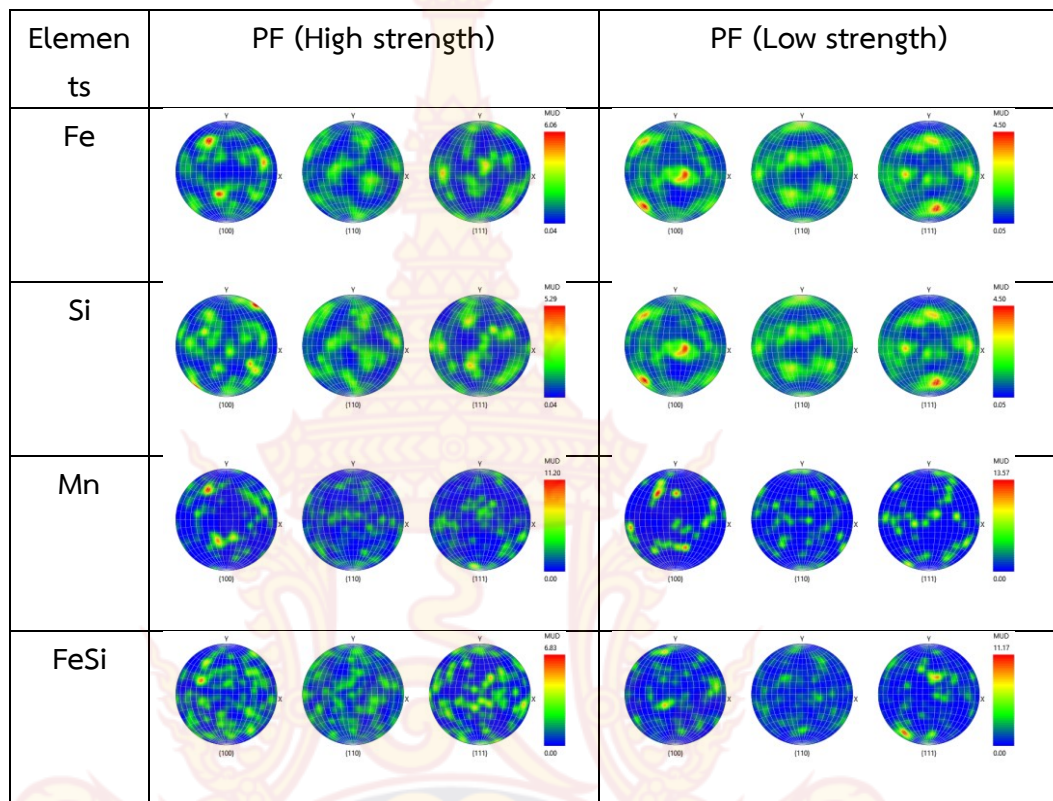
ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	High strength	Low strength
25		

สำหรับข้อมูลจากแผนภาพโพล (Pole figure; PF) ของแต่ละองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 14 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการกระจายตัวในระนาบและในเทอมของค่า Multiples of uniform distribution (MUD) ในระนาบต่างๆ เช่น  $\{100\}$   $\{110\}$  และ  $\{111\}$  โดย MUD เป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis) ของเท็กซ์เจอร์ (Texture) ในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งการเพิ่มปริมาณ MUD ที่สูงจึงแสดงให้เห็นถึงลักษณะความชอบเรียงตัวของเกรนในระนาบหรือทิศทางใดทิศทางหนึ่งที่มีระดับสูง (Larger degrees of preferential orientation) [29] ดังนั้นจากการตรวจสอบ Fe และ Si ของตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงมีค่า MUD มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงต่ำ แต่สำหรับ Mn และสารประกอบของ FeSi มีค่า MUD สูงในชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงต่ำ อย่างไรก็ตามลักษณะความชอบเรียงตัวของเกรนในระนาบของตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงพบมากในระนาบ  $\{100\}$  แต่สำหรับชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงน้อยจะพบทั้งในระนาบ  $\{100\}$  และ  $\{111\}$  ยกเว้น Mn ซึ่งมีค่า MUD สูงเฉพาะระนาบ  $\{100\}$  เท่านั้น

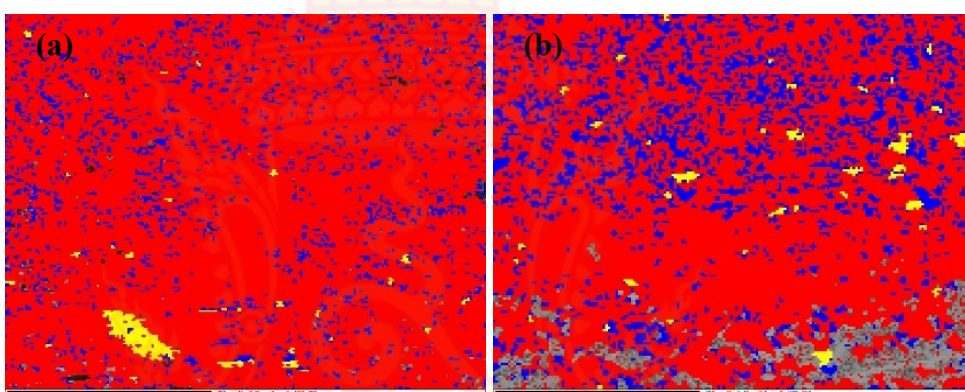
ภาพที่ 50 บริเวณหลอมละลายและกระทบร้อนของตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดพบสารประกอบเชิงโลหะ FeSi มีขนาดใหญ่กับชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงต่ำ โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะปกติมีความแข็ง จึงเป็นการเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม และสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นและมีการจัดเรียงตัวในทิศทางระนาบ (111) และ (010) เมื่อพิจารณาพร้อมกับแผนภาพโพลย้อนกลับ (Inverse pole figure; PF)

ตารางที่ 14 PF ของตัวอย่าง



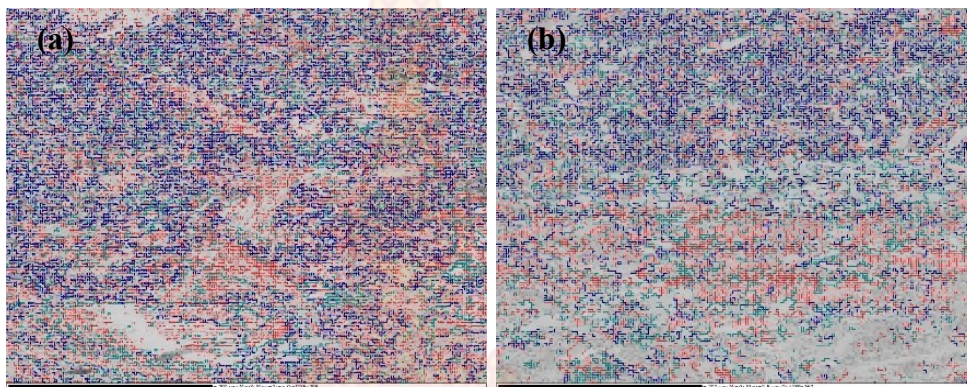
ภาพที่ 50 IPF การจัดเรียงตัวและขององค์ประกอบทางเคมีในระนาบและแกนต่าง

การแปรรูปและการเกิดผลึกใหม่ระหว่างกระบวนการเชื่อมแสดงได้ดังภาพที่ 51 โดยพื้นที่สีแดงแสดงการแปรรูป (Deformation) สีน้ำเงินแสดงการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และสีเหลืองแสดงโครงสร้างเดิมของวัสดุ ตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดพบการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นน้อยกว่าชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงต่ำ (พื้นที่สีน้ำเงิน) ซึ่งการเกิดผลึกใหม่กระจายอยู่ทั่วบริเวณที่มีการแปรรูป (บริเวณรอยเชื่อม) หรือพบมากบริเวณโลหะเดิมสำหรับตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงต่ำ ซึ่ง Liu และคณะ [30] รายงานว่า การคืนตัวและการเกิดผลึกใหม่เป็นกลไกของการอ่อนตัว (Softening mechanism) ของเฟสโดยส่วนใหญ่เกิดตามขอบเกรนที่มีการซ้อนทับของอะตอมเกิดขึ้นน้อยหรือขอบเกรนที่มีค่า  $\Sigma$  CSL ต่ำ (Low- $\Sigma$  CSL grain boundary)



ภาพที่ 51 การแปรรูปและเกิดผลึกใหม่ (a) ตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ (b) ต่ำสุด

เมื่อพิจารณาประเภทของขอบเกรนตามแกนและมุมการจัดเรียงตัวของผลึกสามารถแบ่งขอบเกรนได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ (1) บริเวณขอบเกรนที่ทิศทางการเรียงตัวของผลึกในเกรนที่อยู่ติดกันทำมุมแตกต่างกันไม่เกิน 15 องศา เรียกขอบเกรนกลุ่มนี้ว่า ขอบเกรนมุมต่ำ (Low angle grain boundary; LAGB) และ (2) บริเวณขอบเกรนที่ทิศทางการเรียงตัวของผลึกในเกรนที่อยู่ติดกันทำมุมแตกต่างกันมากกว่า 15 องศา เรียกขอบเกรนกลุ่มนี้ว่า ขอบเกรนมุมสูง (High angle grain boundary; HAGB) จากภาพที่ 52 สีแดงและสีน้ำเงินแสดงขอบเกรนมุมต่ำและขอบเกรนมุมสูงตามลำดับ ซึ่งขนาดมุมขอบเกรนที่พบสำหรับ LAGB สีแดงมีมุมน้อยกว่า  $5^\circ$  ขณะที่ HAGB สีเขียวมีมุมอยู่ในช่วง  $10^\circ - 50^\circ$  และ HAGB สีน้ำเงินมีมุมมากกว่า  $50^\circ$  อย่างไรก็ตามพลังงานขอบเกรนเพิ่มขึ้นกับการลดลงของ LAGB [31] ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดมี LAGB มากดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่มีพลังงานขอบเกรนสูง ซึ่งพลังงานภายในที่เกิดขึ้นจะยับยั้งผลโดยใช้การวิเคราะห์ KAM ต่อไปเพื่อแสดงให้เห็นถึงพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นภายใน



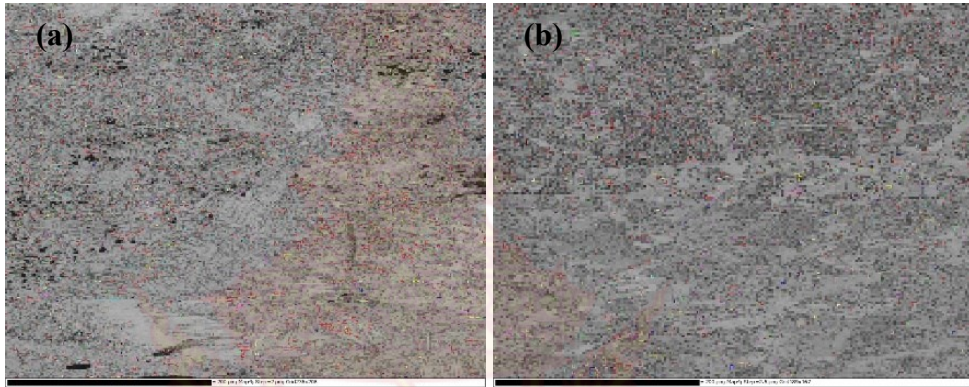
ภาพที่ 52 ขอบเกรน (a) ตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ (b) ต่ำสุด

อย่างไรก็ตามมีขอบเกรนพิเศษบางชนิดที่อยู่ในกลุ่มของขอบเกรนมุมสูงโดยมีการจัดเรียงตัวของผลึกในเกรนที่ติดกัน ซึ่งระนาบขอบเกรนทำมุมเฉพาะบางมุมระหว่างเกรนนำไปสู่การซ้อนทับกันของตำแหน่งอะตอม (Coincidence point) เกิดเป็นซูเปอร์แลตทิซ (Super lattice) เรียกขอบเกรนประเภทนี้ว่า Coincidence site lattice boundaries (CSLBs) สามารถแทนด้วยสัญลักษณ์  $\Sigma$  สำหรับขอบเกรนชนิด CSL ที่มีพลังงานอิสระ (Free energy) ต่ำกว่าขอบเกรนมุมสูงจะส่งผลทำให้ขอบเกรนชนิดนี้มีค่าพลังงานต่ำและมีเสถียรภาพสูง เรียกขอบเกรนชนิด CSL กลุ่มนี้ว่า ขอบเกรนพิเศษ (Special grain boundaries) ได้แก่ ขอบเกรนชนิด  $3 \leq \Sigma \leq 29$  โดยขอบเกรนแบบพิเศษแสดงโดยเส้นสีน้ำเงิน พบมากในโครงสร้างของชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูง และเกิดขึ้นน้อยบริเวณวัสดุพื้น ซึ่งมีมุมตั้งแต่  $50^\circ$  ขึ้นไปดังนั้นจึงแสดงให้เห็นขอบเกรนมุมสูงที่เกิดขึ้นเพิ่มความแข็งแรงให้กับรอยเชื่อมและขอบเกรนแบบนี้เกิดขึ้นบริเวณที่มีการหลอมละลายมากกว่าบริเวณโลหะพื้น สำหรับค่าที่มากของ  $\Sigma$  สามารถมีได้มากกว่าหนึ่ง Misorientation สำหรับสัดส่วนที่เหมือนกันการซ้อนทับกันของตำแหน่งอะตอม (Coincidence point) [32] นอกจากนั้นขอบเกรนชนิด CSL สำหรับ Misorientation มีทั้งขอบที่เอียง (Tilt) และบิด (Twists) ประกอบกันอยู่ [33]

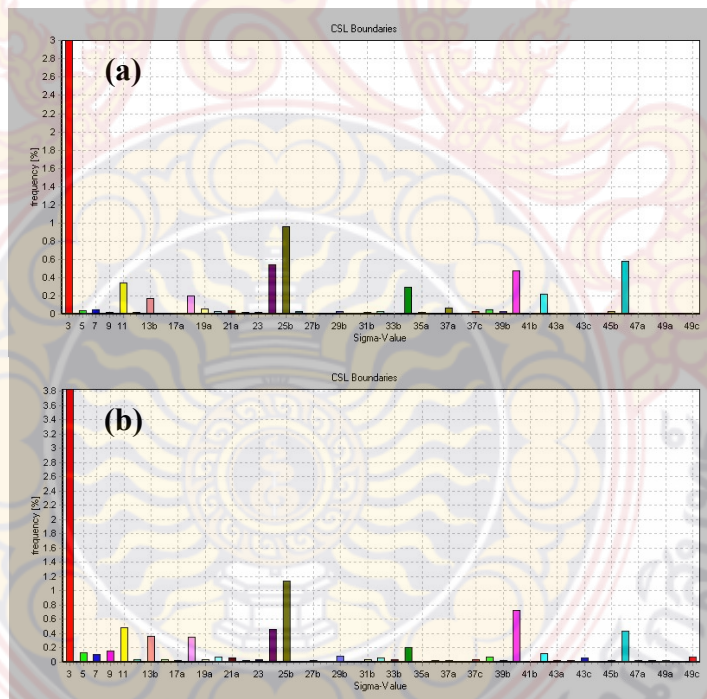
การมีอยู่ของเกรนชนิด CSL แบบต่างๆในโครงสร้างจุลภาคแสดงได้ดังภาพที่ 53 และเมื่อเปรียบเทียบในเชิงปริมาณแสดงดังภาพที่ 54 ขอบเกรนแบบทวิน  $\Sigma 3$  พบมากในตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงต่ำเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูง ดังนั้นจึงทำให้มีการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นได้ง่ายในโครงสร้างที่มีเกรนแบบทวิน  $\Sigma 3$  ผลมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามสำหรับมุมการจัดเรียงตัวที่น้อยทำให้มีค่าที่มากของ  $\Sigma$  และค่าที่มากของ  $\Sigma$  แสดงถึงการมีพื้นที่ขอบเกรนมากเช่นกัน [34]

อย่างไรก็ตามในกระบวนการเชื่อมเป็นการรวมกันของกระบวนการทางความร้อนที่เกิดขึ้นพร้อมกันกับความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ความเค้นเนื่องจากความร้อน (Thermal stress) และการเปลี่ยนแปลงเฟสเนื่องจากความเค้น (Phase transformation stress) เป็นต้น ดังนั้นพลังงานความร้อนที่สูงในการเชื่อมและผลจากการเย็นตัวจึงมีผลกับพลังงานความเค้นและความเครียดตกค้าง [35] จากภาพที่ 55 แสดงแนวโน้มพลังงานความเครียดตกค้างในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งบริเวณสีเขียวแสดงถึงการมีความเครียดตกค้างที่สูง ดังนั้นพลังงานความเครียดตกค้างลดลงกับโครงสร้าง

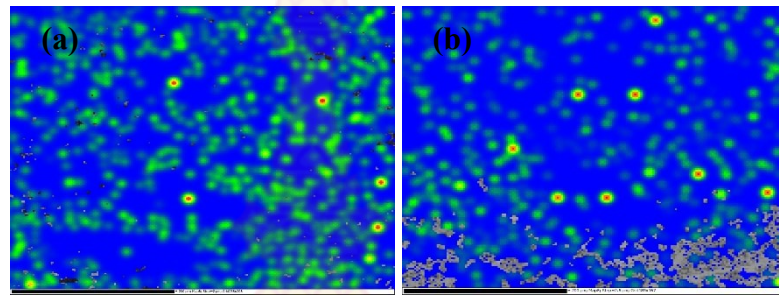
จุลภาคที่มีการซ้อนทับของอะตอมเกิดขึ้นน้อยหรือขอบเกรนที่มีค่า  $\Sigma$  CSL ต่ำ และการเกิดผลึกใหม่ในปริมาณที่มาก จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคในแบบดังกล่าวมีความต้านทานแรงดึงและความแข็งแรงสูง จุลภาคลดลงเช่นกัน



ภาพที่ 53 CSL (a) ตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ (b) ต่ำสุด



ภาพที่ 54 ความเครียดที่เกิดขึ้น (a) ตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ (b) ต่ำสุด



ภาพที่ 55 ความเครียดที่เกิดขึ้น (a) ตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและ (b) ต่ำสุด





## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเทคโนโลยีการเชื่อม CMT ของเหล็กกล้าในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์: รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม สมบัติทางกลและโลหะวิทยาการเชื่อมสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1. สรุปผลการวิจัย

ผลจากการวิจัยการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าที่มากกว่า 10 V ความสูงของแนวเชื่อมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า ขณะที่ความกว้างของรอยเชื่อมมีแนวโน้มคงที่เมื่อใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่า 12 V สำหรับความเร็วในการเชื่อมไม่มีผลกระทบต่ออย่างมีนัยยะสำคัญกับความสูงและความกว้างของรอยเชื่อมเนื่องจากข้อมูลมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนเมื่อเปลี่ยนความเร็วในการเชื่อม อย่างไรก็ตามสภาวะการเชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้า 12 V และความเร็วในการเชื่อม 25 mm/min รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อมได้แก่ ความสูง กว้าง และการซึมลึกเป็นไปตามมาตรฐาน ตลอดจนมีสมบัติทางกลในแง่ความต้านทานแรงดึงและความแข็งจุลภาคที่สูง โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 10,695.04 N มีการซึมลึกของแนวเชื่อมที่มาก และกรณีที่ไม่เกิดการซึมลึกทำให้ทั้งความต้านทานแรงดึงและความแข็งจุลภาคลดลงเช่นกัน

สำหรับโลหะวิทยาการเชื่อมพบสารประกอบเชิงโลหะ  $Fe_{0.9}Si_{0.1}$  มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ในรอยเชื่อมและลักษณะความชอบเรียงตัวของเกรนในระนาบของตัวอย่างที่มีความต้านทานแรงดึงสูงพบมากในระนาบ {100} โครงสร้างจุลภาคมีเฟสสารประกอบเชิงโลหะที่โต มีปริมาณการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นน้อยและมีความเครียดตกค้างอยู่ในโครงสร้างจุลภาคในปริมาณที่มาก

#### 2. ข้อเสนอแนะ

2.1 ผลจากการวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กับภาคอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องสามารถนำองค์ความรู้จากการศึกษาไปใช้เป็นแนวทางในการเชื่อมประกอบชิ้นส่วน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการปรับตั้งเครื่องเชื่อม CMT เพื่อให้ได้รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยเชื่อม สมบัติทางกลและโลหะวิทยาของรอยเชื่อมที่ดีที่สุด

2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับตั้งตัวแปรในการเชื่อมอื่นๆ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ไม่ได้ศึกษา ซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อผลการทดลองได้เช่นกัน

**บรรณานุกรม**

- [1] Mohammad A. Omar. Concept in Automotive Manufacturing: A System-based Manufacturing. Clemson University-International Centre for Automotive Research CU-ICAR USA.
- [2] Yijie Liu, Yi Liu, Jining Chen. The impact of the Chinese automotive industry: scenarios based on the national environmental goals. *Journal of Cleaner Production* 96 (2015) 102-109.
- [3] Mohammed A. Omar. *The Automotive Body Manufacturing Systems and Processes*. 2011, John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Elaheh Ghassemieh. *Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects*. University of Sheffield, UK. <http://cdn.intechweb.org/pdfs/13343.pdf>.
- [5] Qian Sun, Hong-Shuang Di, Jun-Chen Li, Bao-Qiang Wu, R.D.K. Misra. A comparative study of the microstructure and properties of 800 MPa microalloyed C-Mn steel welded joints by laser and gas metal arc welding. *Materials Science & Engineering A* 669 (2016) 150–158.
- [6] Kornél Májlínger, Eszter Kalácska, Pasquale Russo Spena. Gas metal arc welding of dissimilar AHSS sheets. *Materials and Design* 109 (2016) 615–621.
- [7] Robert Talalaeva, Renno Veinthala, Andres Laansoo and Martinš Sarkansb. Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products. *Estonian Journal of Engineering*, 2012, 18, 3, 243–250.
- [8] F. García-Vázquez, A. Aguirre, A. Arizmendi, H. M. Hernández-García, L. Santiago-Bautista, J. Acevedo, and B. Vargas-Arista. Analysis of weld bead parameters of overlay deposited on D2 steel components by plasma transferred arc (PTA) process. *Materials Science Forum* Vol. 755 (2013) pp. 39-45.
- [9] M. Nouri, A. Abdollah-zadeh, F. Malek. Effect of Welding Parameters on Dilution and Weld Bead Geometry in Cladding. *Mater. Sci. Technol.*, Vol.23 No.6, 2007, 817 – 822.
- [10] Groover, M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing Engineering Material Processes, and System*, 4<sup>th</sup> Edition. 2010, John Wiley & Sons, Inc.
- [11] Groover, M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing Engineering Material Processes, and System*, 4<sup>th</sup> Edition. 2010, John Wiley & Sons, Inc.
- [12] มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร 2542. คู่มือการเชื่อมแบบมิก-แม็ค <http://koha.library.tu.ac.th>
- [13] งานเชื่อมโลหะ 1, [www.sstc.ac.th](http://www.sstc.ac.th),
- [14] สมบูรณ์ เต็งหงส์เจริญ. 2553. ลวดเชื่อม <http://www.chulabook.com>
- [15] มนัส สกริจิน 2538 เหล็กกล้า (STEEL) <http://koha.library.tu.ac.th>,

**บรรณานุกรม (ต่อ)**

- [16] ยงยุทธ ดุลยกุล, ประภาศ เมืองจันทร์บุรี ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระแสในการเชื่อมและส่วนผสมของแก๊สคลุมที่แตกต่างกัน <http://www.doc2.clib.psu.ac.th>
- [17] Khan Ibrahim, Md., Welding science and technology. 2007, New Age International.
- [18] MOHD. SHOEB. Effect of MIG welding input process parameters on weld bead geometry on HSLA steel. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). Vol. 5 No.01 January 2013.200-212.
- [19] Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel
- [20] Y. Ali, P. Henckell, J. Hildebrand, J. Reimann, J.P. Wire Arc Additive Manufacturing of Hot Work Tool Steel with CMT Process. Journal of Materials Processing Technology. Volume 269, July 2019, Pages 109-116
- [21] G.P. Rajeev, M. Kamaraj, Srinivasa R. Bakshi. Hardfacing of AISI H13 tool steel with Stellite 21 alloy using cold metal transfer welding process. Surface & Coatings Technology. Volume 326, Part A, 15 October 2017, Pages 63-71.
- [22] Maoai Chena, Dong Zhang, Chuansong Wu. Current waveform effects on CMT welding of mild steel. Journal of Materials Processing Technology 243 (2017) 395–404.
- [23] Chen Zhou, Hongliang Wang, Thomas A. Perry, James G. Schroth. Procedia Manufacturing 10 ( 2017 ) 694 – 707
- [24] S. Selvi, A. Vishvakshnan, E. Rajasekar Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. Defence Technology 14 (2018) 28-44.
- [25] P. Kumari, K. Archana and R.S. Parmar. Effect of Welding Parameters on Weld Bead Geometry in MIG Welding of Low Carbon Steel. International Journal of Applied Engineering Research. Volume 6, Number 2 (2011) pp. 249–258.
- [26] WE11A GMA (MIG) Fillet Weld - I-Car RTS. <https://rts.i-car.com/images/pdf/upcr/we11a.pdf>
- [27] A. Gu'ral, B. Bostan, A.T. O' zdemir. Heat treatment in two phase region and its effect on microstructure and mechanical strength after welding of a low carbon steel. Materials and Design 28 (2007) 897–903.

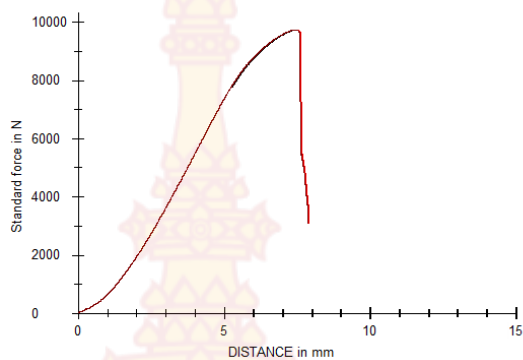
- [28] Zakaria Boumerzoug, Chemseddine Derfouf<sup>1</sup>, Thierry Baudin. Effect of Welding on Microstructure and Mechanical Properties of an Industrial Low Carbon Steel. *Engineering*, 2010, 2, 502-506.
- [29] James B. Marro, Chukwudi A. Okoro, Yaw S. Obeng, Kathleen C. Richardson. The Impact of Organic Additives on Copper Trench Microstructure. *Journal of The Electrochemical Society*, 164 (9) D543-D550 (2017)
- [30] Effect of hot deformation mode on the microstructure evolution of lean duplex stainless steel 2101.
- [31] Chun-Ming Lin, Hsien-Lung Tsai, Chun-Der Cheng, Cheng Yang. Effect of repeated weld-repairs on microstructure, texture, impact properties and corrosion properties of AISI 304L stainless steel. *Engineering Failure Analysis* 21 (2012) 9–20.
- [32] Thomas Nørbygaard. Studies of Grain Boundaries in Materials Subjected to Diffusional Creep. [http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:139516/datastreams/file\\_bd68275b-2769-4112-a184-725c6983adcd/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:139516/datastreams/file_bd68275b-2769-4112-a184-725c6983adcd/content).
- [33] N. Sakaguchi, Y. Ohguchi, T. Shibayama, S. Watanabe, H. Kinoshita. Surface Cracking on  $\Sigma 3$ ,  $\Sigma 9$  CSL and Random Grain Boundaries in Helium Implanted 316L Austenitic Stainless Steel. <https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/52690/1/JNM-D-12-00519-2.pdf>
- [34] Zhiqiang Zhang, Hongyang Jinga, Liyong Xu, Yongdian Han, Zhanqi Gao, Lei Zhao, Jianli Zhang. Microstructural characterization and electron backscatter diffraction analysis across the welding interface of duplex stainless steel, *Applied Surface Science* 413 (2017) 327–343.
- [35] Yu Hu, Yonghua Shi, Kun Sun, Xiaoqin Shen. Microstructure evolution and mechanical performance of underwater local dry welded DSS metals at various simulated water depths. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 264:366-376.



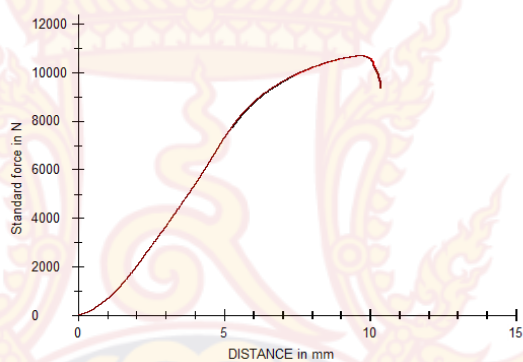
ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง

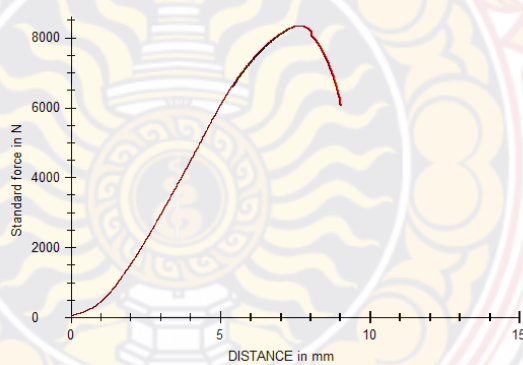
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



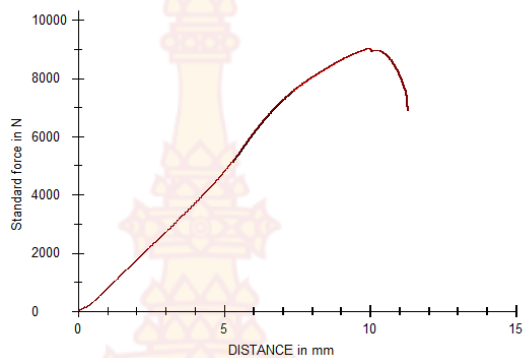
ภาพที่ ก-1 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 10 V และความเร็ว 25 mm/min



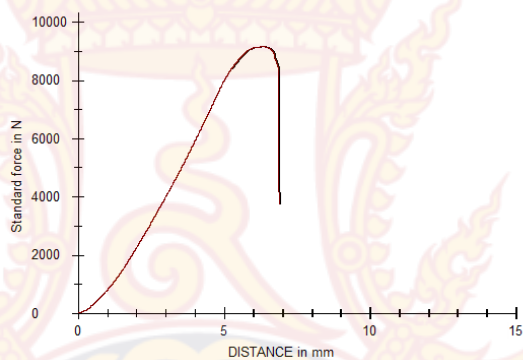
ภาพที่ ก-2 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 12 V และความเร็ว 25 mm/min



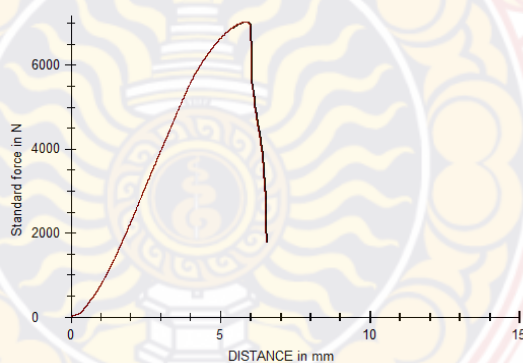
ภาพที่ ก-3 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 14 V และความเร็ว 25 mm/min



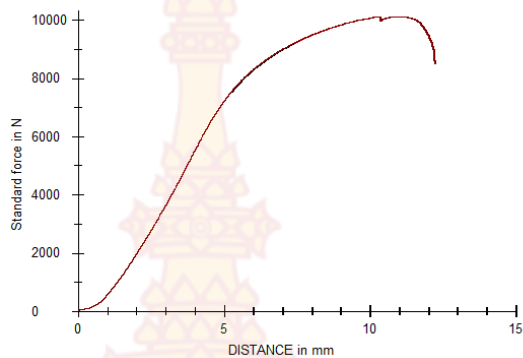
ภาพที่ ก-4 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 16 V และความเร็ว 25 mm/min



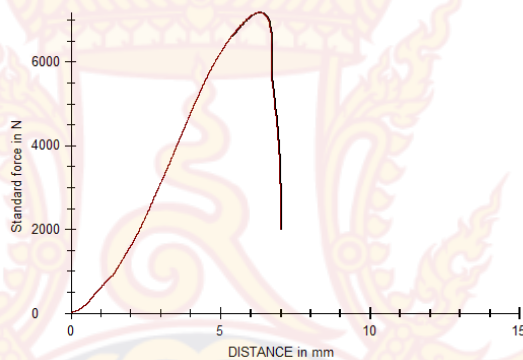
ภาพที่ ก-5 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 18 V และความเร็ว 25 mm/min



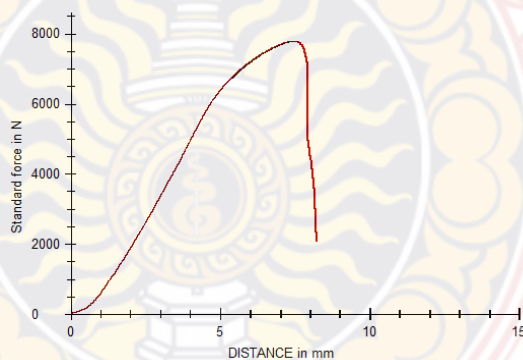
ภาพที่ ก-6 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 10 V และความเร็ว 50 mm/min



ภาพที่ ก-7 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 12 V และความเร็ว 50 mm/min

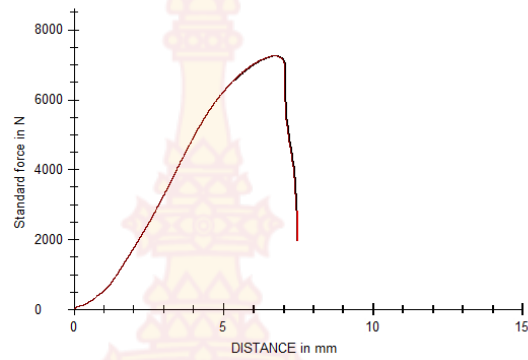


ภาพที่ ก-8 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 14 V และความเร็ว 50 mm/min

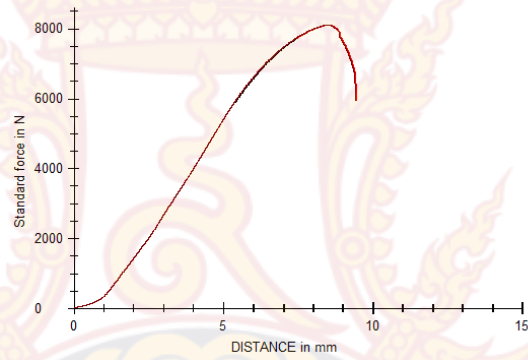


ภาพที่ ก-9 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 16 V และความเร็ว 50 mm/min

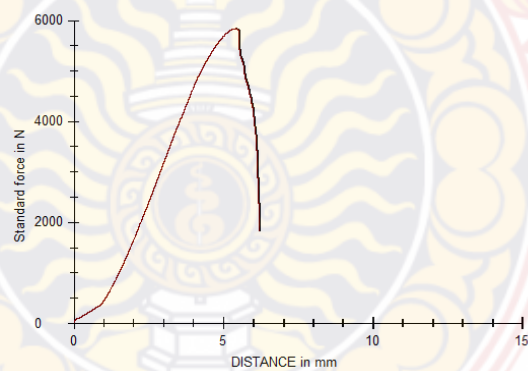




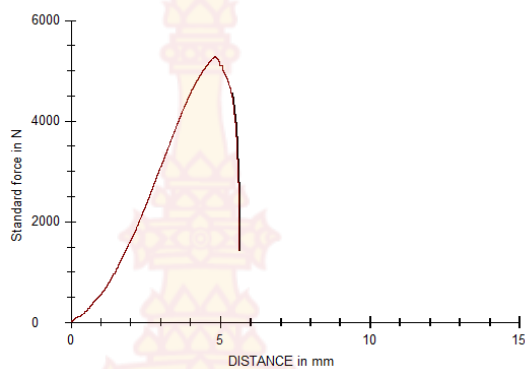
ภาพที่ ก-10 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 18V และความเร็ว 50 mm/min



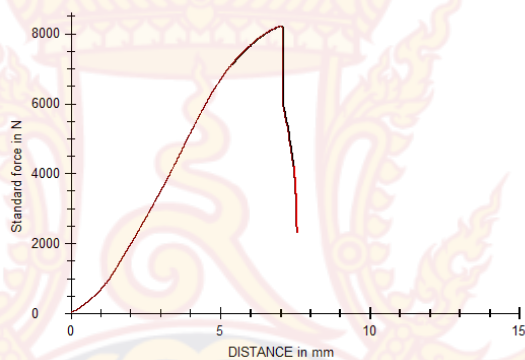
ภาพที่ ก-11 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 10 V และความเร็ว 75 mm/min



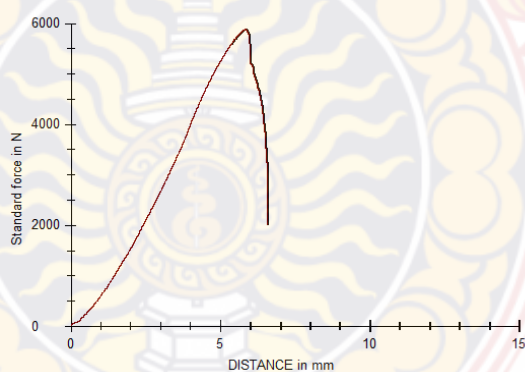
ภาพที่ ก-12 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 12 V และความเร็ว 75 mm/min



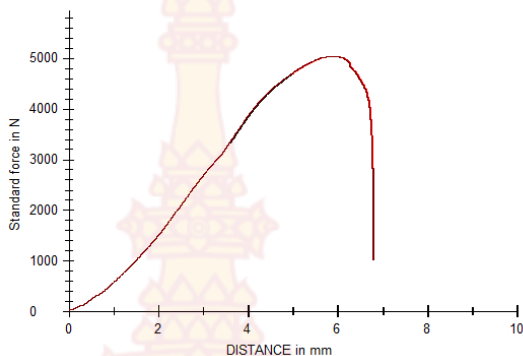
ภาพที่ ก-13 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 14 V และความเร็ว 75 mm/min



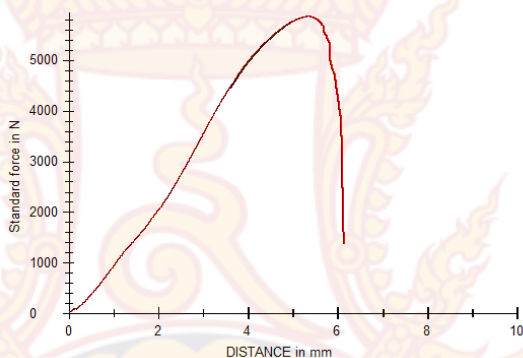
ภาพที่ ก-14 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 16 V และความเร็ว 75 mm/min



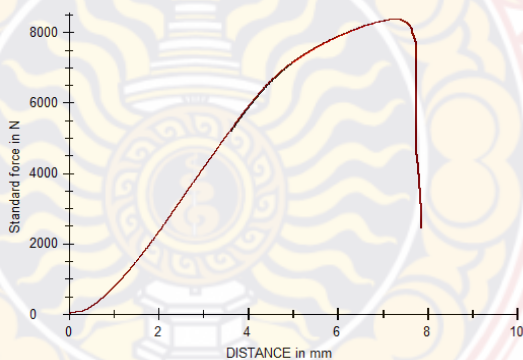
ภาพที่ ก-15 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 18 V และความเร็ว 75 mm/min



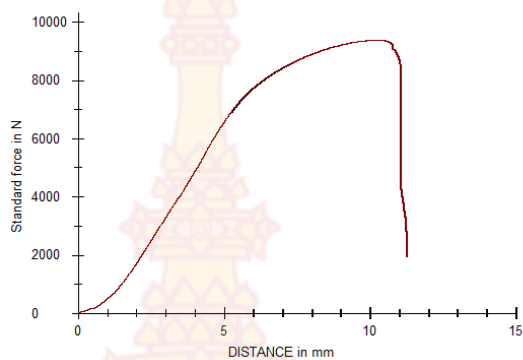
ภาพที่ ก-16 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 10 V และความเร็ว 100 mm/min



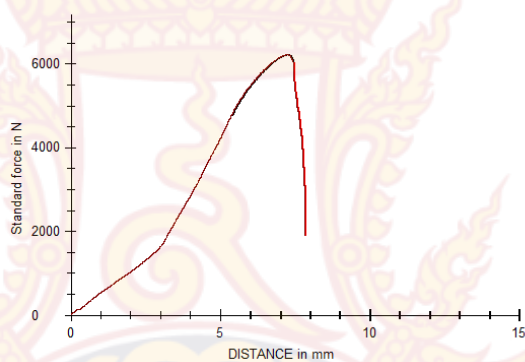
ภาพที่ ก-17 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 12 V และความเร็ว 100 mm/min



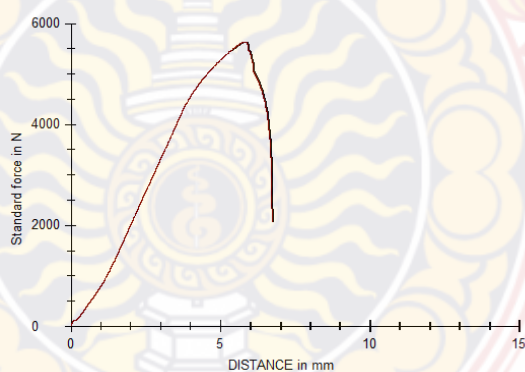
ภาพที่ ก-18 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 14V และความเร็ว 100 mm/min



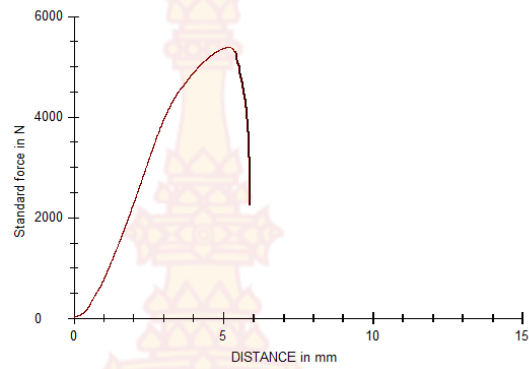
ภาพที่ ก-19 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 16 V และความเร็ว 100 mm/min



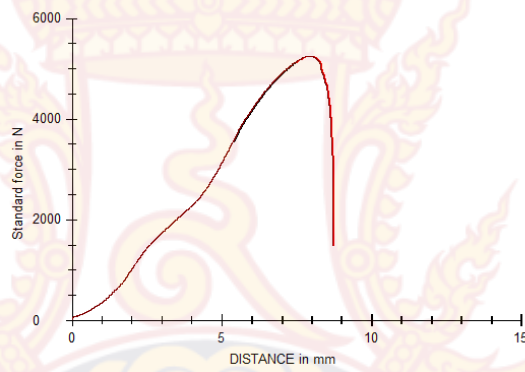
ภาพที่ ก-20 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 18 V และความเร็ว 100 mm/min



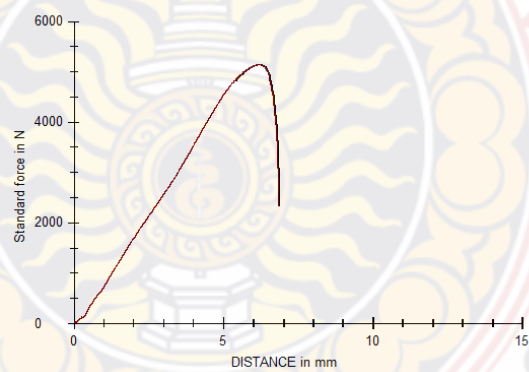
ภาพที่ ก-21 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 10 V และความเร็ว 125 mm/min



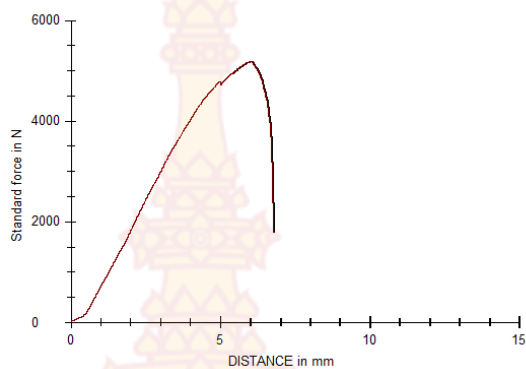
ภาพที่ ก-22 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 12 V และความเร็ว 125 mm/min



ภาพที่ ก-23 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 14 V และความเร็ว 125 mm/min



ภาพที่ ก-24 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 16 V และความเร็ว 125 mm/min



ภาพที่ ก-25 ความต้านทานแรงดึงจากการใช้กระแสไฟฟ้า 18 V และความเร็ว 125 mm/min





ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิวัฒน์ มูแก้ม
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
4. ประวัติการศึกษา
  - 2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
  - 2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
  - Joining of Materials (Welding, Soldering and Brazing).
  - Non-Traditional Manufacturing Processes.
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย
  - Mookam, N. and Kanlayasiri, K. Effect of soldering condition on formation of intermetallic phases developed between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver lead-free solder and Cu substrate. Journal of Alloys and Compounds, 2011; 509: 6276-6279.
  - Mookam, N. and Kanlayasiri, K. Evolution of Intermetallic Compounds between Sn-0.3Ag-0.7Cu Low-silver Lead-free Solder and Cu Substrate during Thermal Aging. Journal of Materials Science & Technology. 2012; 28: 53-59.
  - นิวัฒน์ มูแก้ม. ผลกระทบของสภาวะการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึกและชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และ Sn-0.3Ag-0.7Cu กับโลหะพื้นทองแดง. การประชุมข่างานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2554, 20-21 ตุลาคม 2554.
  - นิวัฒน์ มูแก้ม, ชิตพัทธ์ ลิ้มกุล และ กรรณชัย กัลยาศิริ. การเกิดปฏิกิริยารอยต่อระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่ม SnAgCu และโลหะพื้นทองแดง. วารสารการเชื่อมไทย, ฉบับที่ 54 มกราคม-เมษายน 2554. หน้า 36-46.
  - นิวัฒน์ มูแก้ม และ ปิยะวรรณ สุนาสวน. อิทธิพลของตัวแปรในการตัดด้วยวิธี EDM ต่อลักษณะเฉพาะของการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 61 การประชุมข่างานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2555, 17-19 ตุลาคม 2555.
  - นิวัฒน์ มูแก้ม. การศึกษาผลกระทบของสภาวะการเย็นตัวที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็งจุลภาคและความต้านทานแรงดึงของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu. วารสารสมาคมส่งเสริมวิจัย. ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2556.



- นิวัฒน์ มูแก้ม และ อรจิตร แจ่มแสง. การศึกษาการเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และโลหะพื้นต่างชนิดโดยการบัดกรีแบบรีโฟลว์. การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการประจำปี 2555, 30-31 ตุลาคม 2557.
- Mookam, N. Using Grey Relational Analysis in Wire-Cutting of Titanium. The Journal of Industrial Technology, Vol. 10, No. 2, May – August, 2014.
- Mookam, N. A study on Influence of MIG Brazing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties in Joining of Al to AHSS for Applications in Automobile Industry. Naresuan University Engineering Journal (NUEJ), Vol. 10, No. 1, January – June, 2015.
- อรจิตร แจ่มแสง, ปิยะวรรณ สุนาสวน, นิวัฒน์ มูแก้ม. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), ปีที่ 7 ฉบับที่ 14, พ.ศ. 2558 หน้า 87-96.
- ปิยะวรรณ สุนาสวน และนิวัฒน์ มูแก้ม. การประยุกต์ใช้วัสดุผงสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D2 ด้วยวิธี EDM. วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 33, ฉบับที่ 4 (2559) 16-23.
- นิวัฒน์ มูแก้ม และ ปิยะวรรณ สุนาสวน. การต่อวัสดุต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียม 1100 และเหล็กเคลือบสังกะสีโดยการเชื่อมประสานแบบมิก. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ 24, ฉบับที่ 1 (2559) 110-118.
- ทิพสุดา รักเพ็ชร, วิชุดาพร นามเวช, สุเมธ ภูมิอภิรดี, ฉวีวรรณ พูนธนานิวัฒน์กุล, นิวัฒน์ มูแก้ม. การบัดกรีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และ Sn-1.0Cu กับแผ่นทองแดงที่มีต่อความสามารถในการบัดกรีโครงสร้างจุลภาคโลหะพื้นและการเกิดขึ้นสารประกอบเชิงโลหะ. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ ๙ (9th RMUTNC). 7-9 สิงหาคม 2560.
- นิวัฒน์ มูแก้ม. การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาครอยต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ปีที่ 25 ฉบับที่ 1 (2561) 234-243.
- อรจิตร แจ่มแสง และ นิวัฒน์ มูแก้ม. การแก้ปัญหาผลตอบแทนหลายอย่างของการตัดเลเซอร์สำหรับเหล็ก SM490 โดยใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 (2561) 132-143.
- Orajit Jaemsang, Parinya Kaweegitbundit, Niwat Mookam. Optimization of Laser Cutting Parameters on 700MC Steel using Grey Relational Analysis. International Conference on Engineering and Computing Technology (ICECT) 31 March-1 April, 2018, Kuala Terengganu, Malaysia