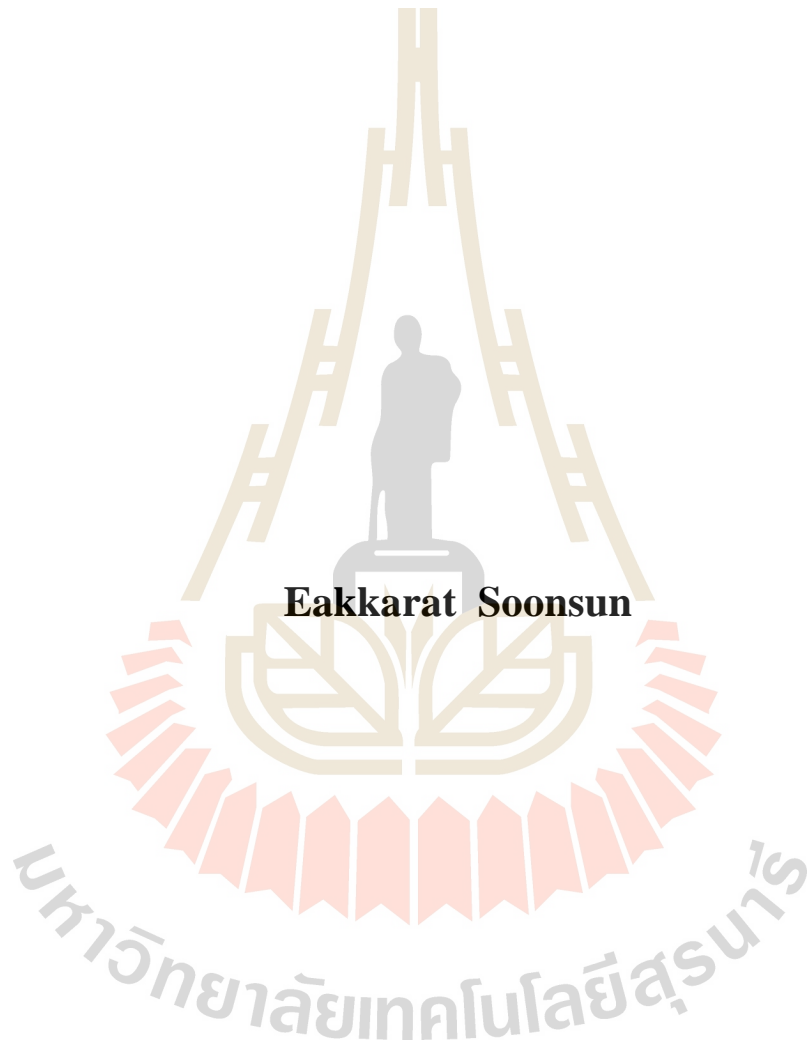


การศึกษาการเชื่อมพอกผิวด้วยลวดเชื่อม Alloy C276  
โดยกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2562

**STUDY ON THE OVERLAY OF ALLOY C276 BY  
FCAW PROCESS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering In Industrial Systems  
And Environmental Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic 2019**

การศึกษาการเชื่อมพอกผิวด้วยลวดเชื่อม Alloy C276 โดยกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษาปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



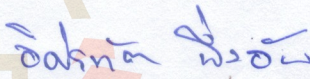
(อ. ดร.นรา สมัตตภาพงศ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.จنگล ศรีชิต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



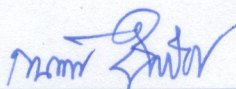
(ผศ. ดร.อิสรทัต พึ่งอัน)

กรรมการ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ชกร ขำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เอกราช ชุ่นสั้น : การศึกษาการเชื่อมพอกผิวด้วยลวดเชื่อม Alloy C276 โดยกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ (STUDY ON THE OVERLAY OF ALLOY C276 BY FCAW PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จنگล ศรีธร, 133 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อการศึกษากรรมวิธีการเชื่อมพอกผิวโลหะ โดยใช้หุ่นยนต์เชื่อมอัตโนมัติในการเชื่อม และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ด้วยลวดเชื่อม Alloy C276 Fluxcored โดยกระบวนการเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ หรือกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding Process) ผลการศึกษาโครงสร้างมหภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมแบบต่าง ๆ พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที จะให้ลักษณะแนวเชื่อมที่มีความกว้างมาก ความสูงน้อย และการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่มาก เนื่องจากโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored จะจ่ายช่วงกระแสไฟและแรงดันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบอื่น ๆ ส่วนผลของการทดสอบสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมต่าง ๆ พบว่า ค่าความแข็งมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากความเร็วที่ใช้เชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อมมีช่วงความเร็วที่ไม่ห่างกันนัก และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบต่าง ๆ พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีค่าความแข็งที่มากกว่าโหมดการเชื่อมแบบอื่น ๆ อยู่ประมาณ 10-20 HV เป็นผลมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่า ทำให้ขนาดของโครงสร้างมีความละเอียดกว่า ซึ่งจากการพิจารณาลักษณะแนวเชื่อมของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse จะให้ลักษณะรอยเชื่อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเชื่อมพอกผิว เนื่องจากมีความกว้างของแนวเชื่อมน้อยเกินไป และมีความสูงของแนวเชื่อมที่มากเกินไปด้วย โดยค่าความแข็งสูงสุดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 อยู่ตรงบริเวณแนวเชื่อม (WM) ที่ระยะ -2.88 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 241.7 HV และค่าความแข็งสูงสุดของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 อยู่ตรงบริเวณแนวเชื่อม (WM) ที่ระยะ -2.16 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 245.6 HV

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ  
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา เอกราช ชุ่นสั้น  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา จ.

EAKKARAT SOONSUN : STUDY ON THE OVERLAY OF ALLOY C276

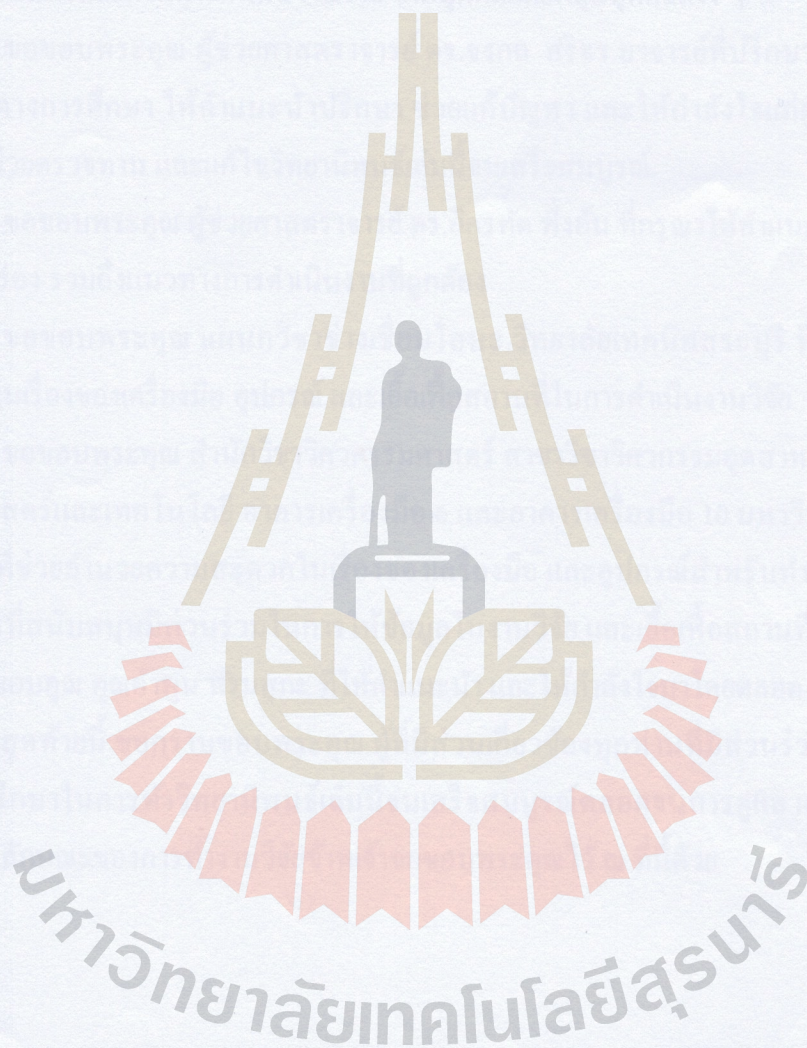
BY FCAW PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JONGKOL

SRITHORN, Ph.D., 133 PP.

THE OVERLAY/ROBOT WELDING/FLUX CORED ARC WELDING/  
MACROSTRUCTUER/HARDNESS

The objective of this research is to study the overlay by using automatic welding robots and find the appropriate parameters for the overlay of SS400 low carbon steel and 316 stainless steel with Alloy C276 Flux-cored by Flux Cored Arc Welding Process. Macrostructure study results of SS400 low carbon steel and 316 stainless steel at various welding modes was showed that Flux-cored mode welding, using travel speed 25 cm/min, will have the highest width of welded line and the minimum height and the high penetration of welded line because Flux Cored welding mode will provide more current and voltage range than other welding modes. The result of the mechanical properties of the weld metal (WM) was, comparing the hardness of SS400 low carbon steel and 316 stainless steel at various welding mode, the hardness value is very similar because the travel speed in each welding mode has a speed range that is not different and the hardness values of welding with various welding modes found that, ColdArc\_Pulse has a hardness greater than the other welding modes, approximately 10-20 HV due to the faster cooling rate makes the size of the structure more detailed. Which considering the welded line characteristics of the ColdArc\_Pulse, that provide a appearance of welded line that are not suitable for welding on the overlay because the welded line width is too small and the welded line

height is too high. The maximum hardness of SS400 low carbon steel is at the weld metal (WM) at -2.88 mm with an average hardness is 241.7 HV and the highest hardness of 316 stainless steel is at the weld metal (WM) at -2.16 millimeters with an average hardness is 245.6 HV.



School of Industrial Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature

เอกวิทย์ ชันสัน

Advisor's Signature

จ.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จกมล ศรีธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิศรทัต พึ่งอัน ที่กรุณาให้คำแนะนำปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง รวมถึงแนวทางการดำเนินงานที่ถูกต้อง

ขอขอบพระคุณ แผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในเรื่องของเครื่องมือ อุปกรณ์ และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 6 และอาคารเครื่องมือ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในเรื่องของเครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับทำงานวิจัย ตลอดจนบุคลากรที่สนับสนุนมีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลในงานวิจัย และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณ คุณคำพูน พรหมสุกะ ที่ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลเป็นที่ปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ตลอดจนการดูแล และให้ความเข้าใจเกี่ยวกับ ลักษณะของการทำงานวิจัยข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกราช ชุ่นสั้น

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....</b>	<b>5</b>
2.1 กระบวนการเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ (Flux Cored Arc Welding Progress).....	5
2.2 การถ่ายโอนโลหะ (Metal Transfer).....	6
2.3 กระแสเชื่อม (Welding Current).....	11
2.4 เหล็ก SS400 หรือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ.....	13
2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic).....	13
2.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test).....	14
2.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical Investigation).....	16
2.8 ความร้อนในการเชื่อม (Heat input).....	17
2.9 ความเจือจางของโลหะ (Dilution).....	17
<b>3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>22</b>



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1	แผนผังการดำเนินงานเชื่อมในงานวิจัย.....	24
3.2	เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ในการวิจัย.....	24
3.3	การกำหนดปัจจัยและออกแบบการทดลอง .....	30
3.4	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	34
<b>4</b>	<b>ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง .....</b>	<b>42</b>
4.1	การตรวจสอบโครงสร้างแบบมหภาค (Macrostructure Investigation) .....	42
4.2	การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	56
4.3	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Investigation).....	62
4.4	การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing).....	76
<b>5</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>83</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	83
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	85
	รายการอ้างอิง .....	86
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	
	เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 .....	89
	ภาคผนวก ข. ตารางค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400	
	และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316.....	106
	ประวัติผู้เขียน.....	133

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....3
2.1	คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า SS400 ..... 13
3.1	ตารางค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม ..... 31
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม Alloy C276 Flux_Cored ..... 36
3.3	แสดงค่ากระแสเชื่อมและแรงดันอาร์กของการเชื่อมแต่ละ โหมด ..... 36
4.1	แสดงค่าพื้นที่ของแนวเชื่อมและอัตราส่วนการเงาของแนวเชื่อม ในแต่ละโหมดการเชื่อม..... 48
4.2	แสดงค่าพื้นที่ของแนวเชื่อมและอัตราส่วนการเงาของแนวเชื่อม ในแต่ละโหมดการเชื่อม..... 54
4.3	ผลการทดสอบการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc ..... 56
4.4	ผลการทดสอบความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc ..... 56
4.5	ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc ..... 57
4.6	แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc ..... 63
4.7	แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse..... 65
4.8	ตารางแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored..... 67
4.9	ตารางแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse..... 71
4.10	ตารางแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored..... 73

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1 ผลการทดสอบการหลอมดีกรีของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse .....	90
ก.2 ผลการทดสอบความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse .....	90
ก.3 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse .....	90
ก.4 ผลการทดสอบการหลอมดีกรีของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse.....	91
ก.5 ผลการทดสอบความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse.....	91
ก.6 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse.....	91
ก.7 ผลการทดสอบการหลอมดีกรีของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored.....	95
ก.8 ผลการทดสอบความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored.....	95
ก.9 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้า คาร์บอนเกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored.....	95
ก.10 ผลการทดสอบการหลอมดีกรีของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored.....	96
ก.11 ผลการทดสอบความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored .....	96
ก.12 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored.....	96
ข.1 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc .....	107

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.2	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc .....109
ข.3	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc .....110
ข.4	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc_pulse.....112
ข.5	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc_pulse.....113
ข.6	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc_pulse.....115
ข.7	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux_cored.....116
ข.8	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux_cored.....118
ข.9	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux_cored.....119
ข.10	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc_pulse.....121
ข.11	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc_pulse.....123
ข.12	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc_pulse.....125
ข.13	แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux_cored.....127
ข.14	แสดงค่าความแข็งที่ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux_cored.....129

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

- ข.15 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316  
 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux\_cored.....131



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์.....	6
2.2	หน้าตัดลวดเชื่อม .....	6
2.3	การถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์.....	7
2.4	การถ่ายโอนโลหะแบบหยด.....	9
2.5	การถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร .....	10
2.6	การถ่ายโอนแบบพัลส์.....	11
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับความเร็วในการป้อนลวด .....	11
2.8	รูปแบบของกระแสเชื่อมแบบพัลส์.....	12
2.9	แสดงการกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส.....	15
2.10	แสดงความเจือจางของโลหะ (Dilution) .....	18
3.1	หุ่นยนต์เชื่อมอัตโนมัติ Kawasaki รุ่น BA006N Robot.....	24
3.2	เครื่องเชื่อมรุ่น alpha 352 puls.....	25
3.3	ชุดอุปกรณ์การเชื่อมด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	25
3.4	ลวดเชื่อม Alloy C276 Flux Cored.....	26
3.5	เครื่องเลื่อยสายพานกึ่งอัตโนมัติ.....	26
3.6	เครื่องตัดชิ้นงาน BUEHLER รุ่น ABRASIMET 2 .....	27
3.7	เครื่องตัด Wire Cut.....	27
3.8	เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน .....	28
3.9	เครื่องขัดผงอะลูมินา (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	28
3.10	กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน .....	29
3.11	กล้องจุลทรรศน์ แบบกำลังขยายต่ำ.....	29
3.12	เครื่องทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ แบบ ไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers) .....	30
3.13	เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 .....	35
3.14	เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316.....	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15	โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 .....36
3.16	โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 .....37
3.17	โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 .....37
3.18	โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316.....38
3.19	ชิ้นงานที่ตัดแบ่งมาทดสอบ.....39
3.20	ขนาดชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....39
3.21	โลโก้โปรแกรม ImageJ .....40
3.22	โลโก้โปรแกรม Minitab Version17.....41
3.23	ตำแหน่งของจุดทดสอบความแข็ง .....41
4.1	การเปรียบเทียบค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) ที่โหมดการเชื่อมต่างกัน.....43
4.2	ลักษณะแนวเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc .....44
4.3	ลักษณะแนวเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse.....45
4.4	ลักษณะแนวเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored..... 45
4.5	การเปรียบเทียบค่าความกว้างของแนวเชื่อมที่โหมดการเชื่อมต่างกัน .....47
4.6	การเปรียบเทียบค่าความสูงของแนวเชื่อมที่โหมดการเชื่อมต่างกัน .....47
4.7	การเปรียบเทียบค่าการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่โหมดการเชื่อมต่างกัน .....48
4.8	ตัวอย่างโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400.....48
4.9	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเงิองางของแนวเชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อม .....49
4.10	การเปรียบเทียบค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) ที่โหมดการเชื่อมต่างกัน.....50
4.11	ลักษณะแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมด การเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse .....51
4.12	ลักษณะแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมดการเชื่อม แบบ Flux cored .....52

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	การเปรียบเทียบค่าความกว้างของแนวเชื่อมที่โหมคการเชื่อมต่างกัน .....53
4.14	การเปรียบเทียบค่าความสูงของแนวเชื่อมที่โหมคการเชื่อมต่างกัน .....53
4.15	การเปรียบเทียบค่าการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่โหมคการเชื่อมต่างกัน .....54
4.16	ตัวอย่างโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316.....54
4.17	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเงี้ยวของแนวเชื่อมในแต่ละโหมคการเชื่อม .....55
4.18	การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมลึกของรอยเชื่อมด้วยโหมคการเชื่อมแบบ ColdArc สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400.....57
4.19	การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของรอยเชื่อมด้วยโหมคการเชื่อมแบบ ColdArc สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 .....58
4.20	การวิเคราะห์ข้อมูลความกว้างของรอยเชื่อมด้วยโหมคการเชื่อมแบบ ColdArc สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 .....58
4.21	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมคการเชื่อมแบบ ColdArc.....59
4.22	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมคการเชื่อมแบบ ColdArc.....60
4.23	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมคการเชื่อมแบบ ColdArc.....61
4.24	ระยะการทดสอบความแข็งในแนวตั้ง (Vertical) .....76
4.25	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของโหมคการเชื่อมแบบ Coldarc .....77
4.26	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของโหมคการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse.....77
4.27	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของโหมคการเชื่อมแบบ Flux Cored.....78
4.28	การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที.....78
4.29	การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที.....79
4.30	การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที.....79
4.31	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของโหมคการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse.....80
4.32	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของโหมคการเชื่อมแบบ Flux Cored.....80



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33	การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที..... 81
4.34	การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที..... 81
ก.1	การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมลึกของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400..... 92
ก.2	การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400..... 92
ก.3	การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมลึกของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ..... 93
ก.4	การวิเคราะห์ข้อมูลความกว้างของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400..... 93
ก.5	การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ..... 94
ก.6	การวิเคราะห์ข้อมูลความกว้างของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ..... 94
ก.7	การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมลึกของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ..... 97
ก.8	การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ..... 97
ก.9	การวิเคราะห์ข้อมูลความกว้างของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ..... 98
ก.10	การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมลึกของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316..... 98
ก.11	การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316..... 99
ก.12	การวิเคราะห์ข้อมูลความกว้างของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316..... 99

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.13	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse .....100
ก.14	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse .....100
ก.15	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse .....101
ก.16	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse .....101
ก.17	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ใน โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse .....102
ก.18	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc_Pulse .....102
ก.19	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored .....103
ก.20	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored .....103
ก.21	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored .....104
ก.22	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored.....104
ก.23	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored.....105
ก.24	กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored.....105

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันวัสดุจำพวกโลหะเป็นวัสดุพื้นฐานที่มีความสำคัญและมีการนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะเหล็กเทคโนโลยีทางด้านโลหะกรรมกำลังได้รับการพัฒนาอย่างเร่งรีบ โลหะที่ใช้ในอุตสาหกรรมแบ่งกว้าง ๆ ออกเป็น 2 ประเภทคือ โลหะที่เป็นเหล็ก (ferrous metals) และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (non-ferrous metals) เหล็กเป็นโลหะที่ใช้มากที่สุดประมาณร้อยละ 96 ของโลหะที่ใช้ประโยชน์ในโลก และยังมีแนวโน้มที่จะลดลง (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ, 2562) ซึ่งชิ้นงานหรือเครื่องจักรที่สร้างขึ้นจากโลหะก็มักมีการเสื่อมสภาพ เกิดการกัดกร่อน เนื่องจากลักษณะการใช้งาน และตามอายุการใช้งาน ซึ่งการเชื่อมพอกผิวแบบเดิมเนื้อโลหะจึงเป็นอีกวิธีสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิวชิ้นงาน และการซ่อมบำรุงส่วนที่สึกหรอให้มีประสิทธิภาพเทียบของใหม่ (ประภาศ เมืองจันทร์บุรี และ ชรินทร์ ดำรัสการ, 2556; อรรถกร จันทร์ชนะ และ คณะ, 2559) เพื่อลดต้นทุนสำหรับการซื้ออุปกรณ์ใหม่ และช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับส่วนที่สึกหรอ รวมไปถึงการสร้างงานขึ้นจากการเชื่อม เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่เรากำลังต้องการ

ในการเชื่อมพอกผิวสามารถใช้กระบวนการเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ หรือกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding Process) ซึ่ง 3 กระบวนการเชื่อมดังกล่าวประกอบด้วย 1) โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc เป็นโหมดการถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร (Short Circuit Transfer) ที่ควบคุมได้ โดยมีปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานน้อย (P. Kah, R. Suoranta and J. Martikainen, 2012) 2) ColdArc\_pulse เป็นโหมดที่มีการพัลส์ของกระแสสูงแล้วต่ำลง โดยจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานน้อยกว่าที่ไม่มีพัลส์ และ 3) โหมดการเชื่อมแบบ Fluxcored มีลักษณะคล้ายคลึงกับ GMAW ซึ่งโหมดการเชื่อมแบบ Fluxcored จะมีความเสถียรของอาร์ค โดยให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ดี ทำให้ช่วยลดการเกิดเม็ดโลหะกระเด็น (Spatter) ทำให้แนวเชื่อมเนียนเรียบ และมีขนาดแนวเชื่อมที่สม่ำเสมอ เพียงแต่แตกต่างกันที่การใช้ลวดเชื่อม โดยเปลี่ยนจากลวดเส้นตัน (Solid wire) มาเป็นลวดฟลักซ์คอร์ (Fluxcored wire) เท่านั้น (Thermal Mechanics, 2019) ในการเลือกใช้วิธีการเชื่อมที่แตกต่างกันจะให้ประสิทธิภาพในการเชื่อม (Welding efficiency) การหลอมลึก (Penetration) และต้นทุนในการเชื่อม (Welding cost) ต่าง

กัน จึงต้องมีการเลือกใช้วิธีการเชื่อมให้เหมาะสมกับลักษณะงาน (X. Wang, L. Cheng, M. Zhang, and Z. Zou, 2009)

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษากรรมวิธีการเชื่อมพอกผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ด้วยลวดเชื่อม Alloy C276 Flux Cored โดยกระบวนการเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ หรือกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding Process) ด้วยหุ่นยนต์เชื่อมอัตโนมัติ และทำการศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมพอกผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ซึ่งจะใช้โหมดการเชื่อมที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 โหมด คือ ColdArc ColdArc\_Pulse และ Flux Cored จากนั้น วิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา และคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากรรมวิธีการเชื่อมพอกเติมเนื้อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

1.2.2 เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกเติมเนื้อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 กระบวนการเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ (Flux Cored Arc Welding ) ประกอบด้วย 3 โหมดการเชื่อม คือ โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc ColdArc\_Pulse และ Flux Cored

1.3.2 ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 3 ค่า คือ 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที

1.3.3 ลวดเชื่อม Alloy C276 Flux Cored

1.3.4 กระบวนการเชื่อมจะใช้หุ่นยนต์เชื่อมอัตโนมัติยี่ห้อ Kawasaki รุ่น BA006N ในการเชื่อม

1.3.5 วัสดุพื้นที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

## 1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

### 1.4.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาข้อมูลและแนวทางการวิจัย
- 2) ออกแบบการทดลองและจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

- 3) เชื่อมชิ้นงานทดสอบ
- 4) วิเคราะห์โครงสร้างจุดภาค คุณสมบัติทางกล ลักษณะรอยเชื่อม และความแข็งแรงของรอยเชื่อม
- 5) สรุปผลการทดลองและส่งรายงานการวิจัย

#### 1.4.2 สถานที่ทำการวิจัย

- 1) แผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี
- 2) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 3) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอน การทำงาน	เดือน															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1) ศึกษาข้อมูล และแนวทางการ วิจัย	←————→															
2) ออกแบบการ ทดลองและ จัดเตรียมอุปกรณ์ ในการทดลอง				←————→												
3) เชื่อมชิ้นงาน ทดสอบ							←————→									
4) วิเคราะห์ โครงสร้าง จุดภาค คุณสมบัติทางกล ลักษณะรอยเชื่อม และความ แข็งแรง ของรอย เชื่อม												←————→				

ขั้นตอน การทำงาน	เดือน															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
5) สรุปผลการ ทดลองและส่ง รายงานการวิจัย																

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้ในการเชื่อมพอกผิวโลหะสำหรับการเชื่อมซ่อมบำรุง
- 1.5.2 เพื่อเป็นแนวทางในการเชื่อมพอกผิวโลหะโดยการใช้หุ่นยนต์เชื่อมอัตโนมัติ
- 1.5.3 เพื่อสร้างทางเลือกให้ธุรกิจและอุตสาหกรรม
- 1.5.4 ได้บทความวิจัยในการเผยแพร่ในประเทศ และนานาชาติ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้รวมทั้งค้นคว้าหาข้อมูลและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการที่จะนำมาประกอบการศึกษาจนบรรลุเป้าหมายตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งมีหัวข้อดังนี้

2.1 กระบวนการเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ หรือ กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding Process)

2.2 การถ่ายโอนโลหะ (Metal Transfer)

2.3 กระแสเชื่อม (Welding Current)

2.4 เหล็ก SS400 หรือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic)

2.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)

2.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical Investigation)

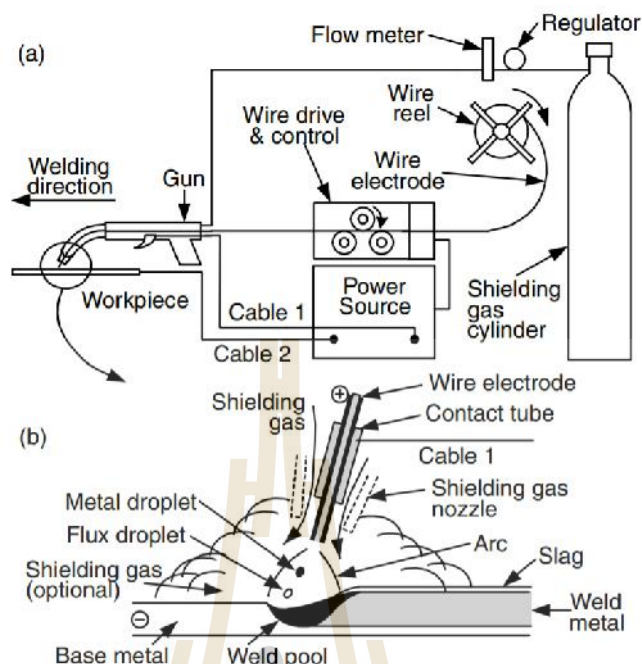
2.8 ความร้อนในการเชื่อม (Heat input)

2.9 ความเจือจางของโลหะ (Dilution)

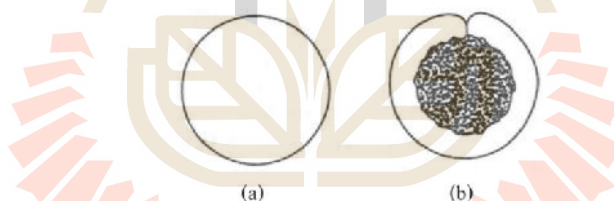
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ หรือกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding Process)

กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Wire Arc Welding: FCAW) ปรากฏขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1920 ซึ่งใช้เชื่อมพอกผิวแข็งเพื่อป้องกันการสึกหรอ (Wear resistant hardfacing) กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยทั่วไปจะเหมือนกับกระบวนการเชื่อมมิก/แมก แต่ลวดเชื่อมมีฟลักซ์บรรจุอยู่ภายในแทนที่จะเป็นลวดตัน โดยการใส่ผงฟลักซ์ที่เป็นธาตุผสม (Alloying constituents) ในแกนของลวดเชื่อมโลหะ ซึ่งฟลักซ์เหล่านี้ก็จะเหมือนกับฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมในการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ จะทำหน้าที่ป้องกันบ่อหลอมสัมผัสกับอากาศ หลักการเชื่อมด้วยลวดไส้ฟลักซ์ โดยทั่วไปจะเหมือนกับกระบวนการเชื่อมมิกแมกดังรูปที่ 2.1 แตกต่างที่ลวดเชื่อมเป็นลวดเชื่อมตัน (Solid wire) (Kou. S, 2003; K. Weman, 2003) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (a) กระบวนการเชื่อม (b) บริเวณเปลวอาร์ค และบ่อหลอมละลาย (Kou, S, 2003)



รูปที่ 2.2 หน้าตัดลวดเชื่อม (a) ลวดเชื่อมมิก/แมก (b) ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (K. Weman, 2003)

## 2.2 การถ่ายโอนโลหะ (Metal Transfer)

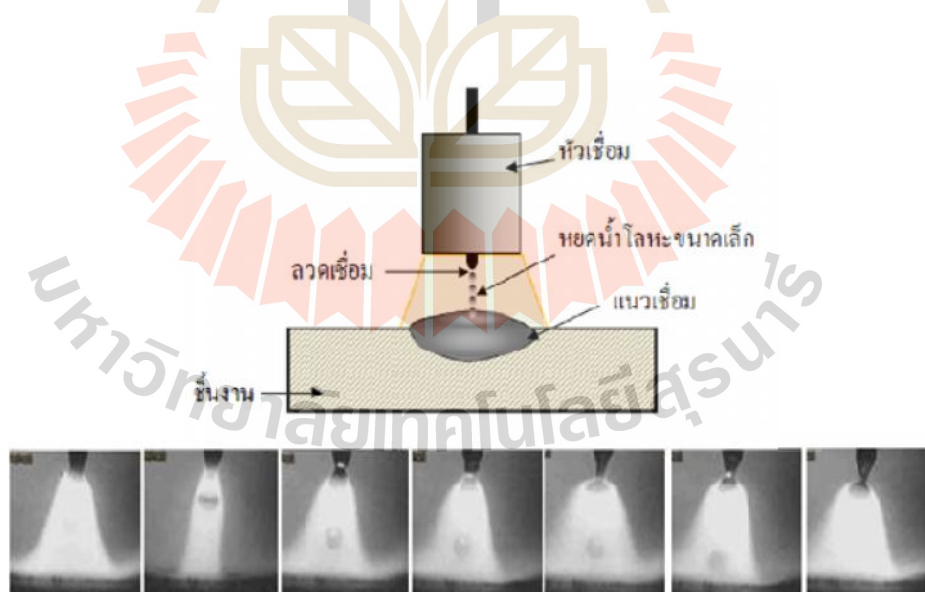
การถ่ายโอนโลหะ หมายถึง การที่โลหะลวดเชื่อมหลอมเป็นหยดและ หลุดออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านการอาร์คเข้าสู่บ่อหลอมละลายบนโลหะชิ้นงานซึ่งการถ่ายโอนให้ได้หยดของโลหะ จะเกิดจากแรงที่กระทำต่อหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อม โดยปฏิกิริยารวมกันระหว่างแรงและ ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม ชนิดของก๊าซคลุม กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม และขนาดของลวดเชื่อม โดยแรงที่กระทำต่อหยดโลหะ คือ แรงตึงผิว (Surface Tension) พลาสมาอาร์ค (Plasma Arc) ความเร็ว (Velocity) แรงโน้มถ่วง (Gravity) แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Force) และ



พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการถ่ายโอนน้ำโลหะที่แตกต่างออกไป ทำให้เกิดรูปแบบการถ่ายโอนโลหะลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

### 2.2.1 การถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์ (Spray Transfer)

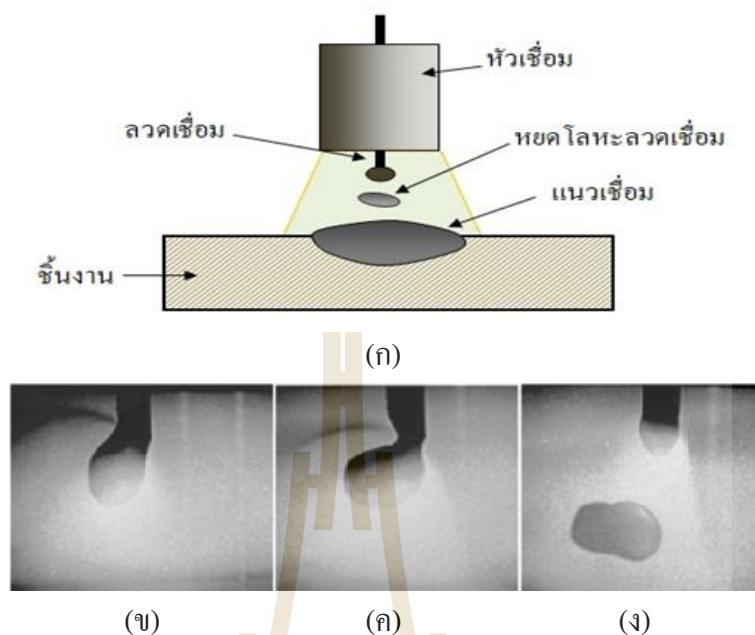
กระบวนการถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์จะเกิดจากการหลอมของปลายลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะขนาดเล็ก วัฏจักรการถ่ายโอนจะเริ่มขึ้นเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมละลายแล้ว ก่อตัวเป็นหยดโลหะขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม หยดโลหะจะรีวเล็กลงตรงส่วนที่ต่ออยู่ระหว่างปลายลวดเชื่อม และหยดโลหะนี้จะถูกแยกตัวหรือถูกบีบให้หลุดออก (Pinched-Off) จากปลายลวดเชื่อมด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Forces) หยดโลหะถูกถ่ายโอนอย่างรวดเร็ว ผ่านพลาสมาอาร์คลงสู่บ่อหลอมเหลวอย่างคงที่และต่อเนื่อง ตลอดเวลาที่กระแสเชื่อมยังไหลผ่านลวดเชื่อมอยู่ ปริมาณหยดโลหะที่ถ่ายโอนอาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าเป็นหลายร้อยหยดในเวลาหนึ่งวินาที กระบวนการถ่ายโอนแบบสเปรย์ต้องใช้ความหนาแน่นของกระแสสูง เพื่อลวดเชื่อมได้หลอมเป็นหยดขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมอย่างรวดเร็ว หยดที่มีขนาดเล็กนี้จะไม่เกิดต่อเสถียรภาพของการอาร์ค การไหลพุ่งของหยดโลหะจึงเป็นเส้นตรงจากศูนย์กลางปลายลวดเชื่อมสู่บ่อหลอมละลาย ทำให้กำหนดทิศทางการถ่ายโอนได้ตามต้องการ ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งานสูงแม้ลวดเชื่อมจะมีขนาดใหญ่ก็สามารถหลอมเป็นหยดขนาดเล็กได้ทันที ส่งผลให้เกิดการหลอมลึกของแนวเชื่อมมาก แสดงในภาพที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์ (สมศักดิ์ เชาวลิต, 2555)

### 2.2.2 การถ่ายโอนโลหะแบบหยด (Globular Transfer)

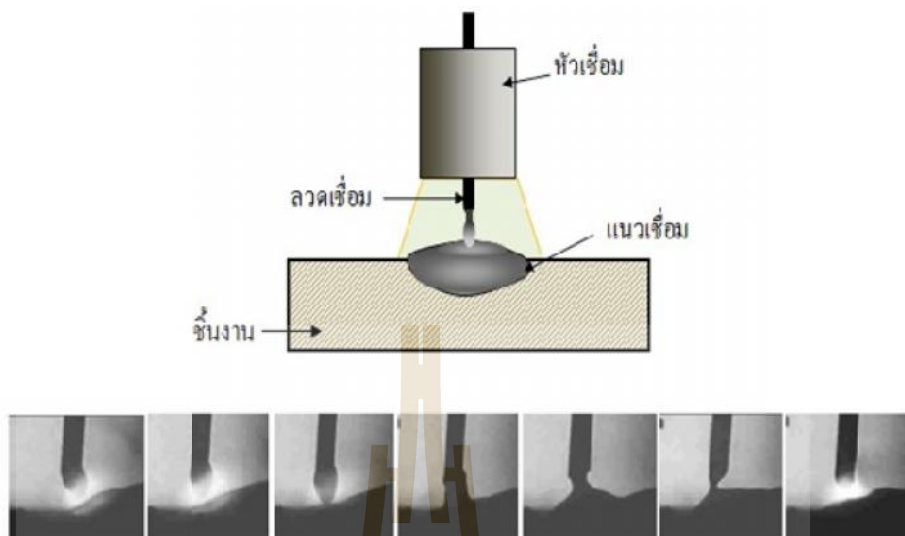
วัฏจักรของการถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่จะเริ่มเมื่อปลายลวดเชื่อมถูกหลอมเหลวให้เป็นหยดโลหะ จากนั้นเกิดการก่อตัวเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่า ก่อนจะหลุดจากปลายของลวดเชื่อมแล้วถ่ายโอนผ่านการอาร์คสู่บ่อหลอมละลายด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งจะให้อัตราการเติมเนื้อโลหะมากและมีความร้อนสูงกว่าการถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร กระแสและแรงดันเชื่อมที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่จะมีค่าต่ำ แต่ก็อยู่ในช่วงที่สูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร คือ กระแสจะไม่เกินระดับของกระแสช่วงเปลี่ยน (Transition Current) ดังนั้นพฤติกรรมของการถ่ายโอนโลหะแบบนี้ จึงอยู่ระหว่างการถ่ายโอนแบบลัดวงจรและแบบละออง แต่ไม่ใช้วิธีการถ่ายทั้งสองแบบ ลักษณะการถ่ายโอนเป็นการผสมกันระหว่างแบบลัดวงจรและแบบละอองแต่มีขนาดหยดใหญ่กว่าแบบละออง อัตราการถ่ายโอนโลหะต่อวินาทีที่กระแสต่ำจะมีเพียง 2-3 หยด เท่านั้น ขณะที่หยดโลหะขนาดเล็กจำนวนมากถูกถ่ายโอนไปแล้วตอนที่กระแสเพิ่มขึ้น เมื่อหยดโลหะมีขนาดใหญ่พอแล้วก็จะแยกตัวออกจากปลายลวด ถ่ายโอนผ่านการอาร์คลงสู่บ่อหลอมเหลวหยดโลหะจะมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ และเคลื่อนที่หมุนรอบตัวเอง เนื่องจากแรงทางกายภาพของการอาร์ค (Physical Force) จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หยดโลหะนี้กลมไม่สม่ำเสมอ โดยหยดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะไปแตะกับบ่อหลอมเหลวทำให้เกิดการลัดวงจร การถ่ายโอนโลหะแบบหยดสู่บ่อหลอมเหลวจะใช้แรงโน้มถ่วงมากกว่าแรงที่เกิดจากการอาร์ค ดังนั้น กระบวนการถ่ายโอนแบบนี้จึงเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการงานเชื่อมคุณภาพสูง มีขอบเขตใช้งานจำกัดเพราะปริมาณความร้อนเข้างานต่ำ สามารถทำการเชื่อมได้ดีกับงานที่อยู่ในแนวราบและแนวระดับ ใช้ระดับกระแสและแรงดันเชื่อมสูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจรแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การถ่ายโอนโลหะแบบหยด (ก) แบบจำลองการถ่ายโอนโลหะแบบหยด (ข) ขั้นตอนการหลอม (ค) ขั้นตอนการหยด (ง) ขั้นตอนการหลุดไป (สมศักดิ์ เชาวลิต, 2555)

### 2.2.3 การถ่ายโอนแบบลัดวงจร (Short Circuit Transfer)

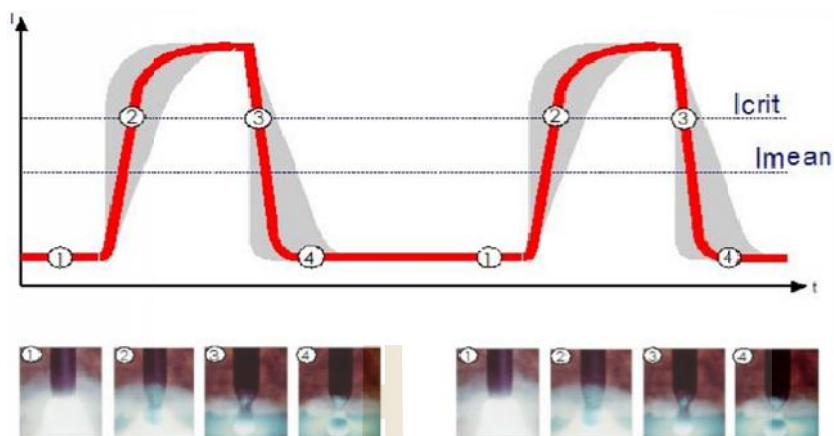
วัฏจักรการถ่ายโอนเกิดขึ้นเมื่อปลายลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงานถูกทำให้เกิดการอาร์คขึ้น และมีอุณหภูมิสูงพอที่จะหลอมปลายลวดเป็นหยดโลหะขนาดเล็กขณะเดียวกันลวดเชื่อมจะถูกป้อนเข้าสู่บ่อหลอมเหลวด้วยอัตราเร็วสูงทำให้หยดโลหะบนปลายลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมเหลวก่อนจะแยกออกจากปลายลวดเชื่อม ทำให้เกิดการลัดวงจรไฟฟ้า (Short Circuit) โดยที่การอาร์คจะดับไปชั่วขณะ จังหวะที่ลัดวงจรอยู่นี้กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายลวดเชื่อมที่หลอมเป็นหยดจะถูกบีบรัดออกแล้วถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อมจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างช่องว่างปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมเหลว เมื่อหยดโลหะหยดแรกหลุดจากปลายลวดเชื่อมแล้วก็จะเริ่มต้นอาร์คใหม่อีกครั้งหนึ่ง สภาวะอย่างนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปอย่างรวดเร็วมาก คือ มีความถี่ของการลัดวงจรราว 20 ถึง 200 ครั้งต่อวินาที กระแสและแรงดันเชื่อมจะตั้งอยู่ในช่วงต่ำจึงมีปริมาณความร้อนเข้าสู่งานน้อย สามารถใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กได้ งานเชื่อมบิดตัวน้อย รอยหลอมทะเลวและประกายโลหะกระเด็นไม่มาก การถ่ายโอนแบบลัดวงจร สามารถเชื่อมงานได้หลายขนาดของความหนาและความเหมาะสมกับการเชื่อมงานหน้าตัดบาง ถ้าใช้กระแสตรงกลับขั้ว (DCRP) สามารถเชื่อมได้ทุกความหนา และสามารถเชื่อมได้ ทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง และอลูมิเนียม แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร (สมศักดิ์ เชาวลิต, 2555)

#### 2.2.4 การถ่ายโอนแบบพัลส์ (Pulse Spray Transfer)

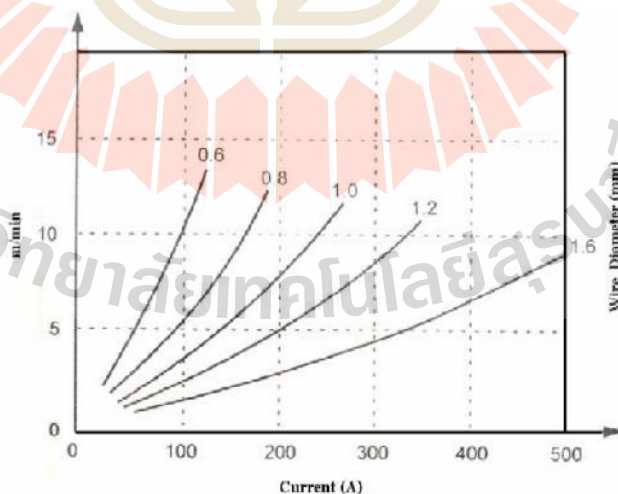
เป็นกระบวนการที่พัฒนามาแทนการถ่ายโอนโลหะแบบสเปรย์เพราะมีข้อจำกัดการใช้งาน แต่ยังคงรักษาการถ่ายโอนที่เป็นลักษณะแบบสเปรย์อยู่ การพัลส์ของกระแสเชื่อมจากระดับต่ำสุดถึงระดับสูงสุดที่ 60 ไซเคิลต่อวินาที จังหวะการพัลส์แต่ละครั้ง จะทำให้ปลายลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะได้ 1 หยด และถ่ายโอนผ่านอาร์คสู่บ่อหลอมเหลวด้วยความถี่สม่ำเสมอเนื่องกัน ระดับกระแสต่ำสุดจะตั้งในช่วงการถ่ายโอนแบบละออง การถ่ายโอนหยดโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อกระแสพัลส์ถึงระดับสูงสุด หลังจากถ่ายโอนหยดโลหะแล้วกระแสจะลดลงต่ำสุดตามที่ตั้งไว้ กระแสต่ำช่วยคงให้การอาร์คเกิดอยู่ตลอดเวลา ช่วงจังหวะนี้การถ่ายโอนโลหะไม่เกิดขึ้น การพัลส์ของกระแสสูงแล้วต่ำลง จะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนเข้าสู่งานเชื่อมโดยความร้อนเฉลี่ยต่ำกว่าการถ่ายโอนแบบละออง จึงเหมาะกับการเชื่อมงานในทุกตำแหน่งท่าเชื่อม งานบิดตัวน้อยสามารถใช้ลวดเชื่อมขนาดใหญ่ได้ และการถ่ายโอนหยดโลหะผ่านการอาร์คยังคงเป็นหยดขนาดเล็กอยู่ จึงประหยัดกว่าการใช้ลวดเชื่อมขนาด แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การถ่ายโอนแบบพัลส์ (สมศักดิ์ เชาวลิต, 2555)

### 2.3 กระแสเชื่อม (Welding Current)

กระแสเชื่อม คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องเชื่อมผลิตออกมา ซึ่งสามารถอ่านได้โดยตรงจากแอมป์มิเตอร์ของเครื่องเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมมิกแม็ก กระแสเชื่อมสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของการป้อนลวด (Wire Feeder) ถ้าป้อนลวดเร็วขึ้นกระแสเชื่อมที่ผลิตออกมาก็มากขึ้นด้วย แต่ถ้าป้อนลวดช้าลงกระแสเชื่อมก็ลดลงเช่นกัน แสดงในรูปที่ 2.7 โดยในกระบวนการเชื่อมดังกล่าว สามารถแบ่งชนิดของกระแสเชื่อมเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท ดังนี้



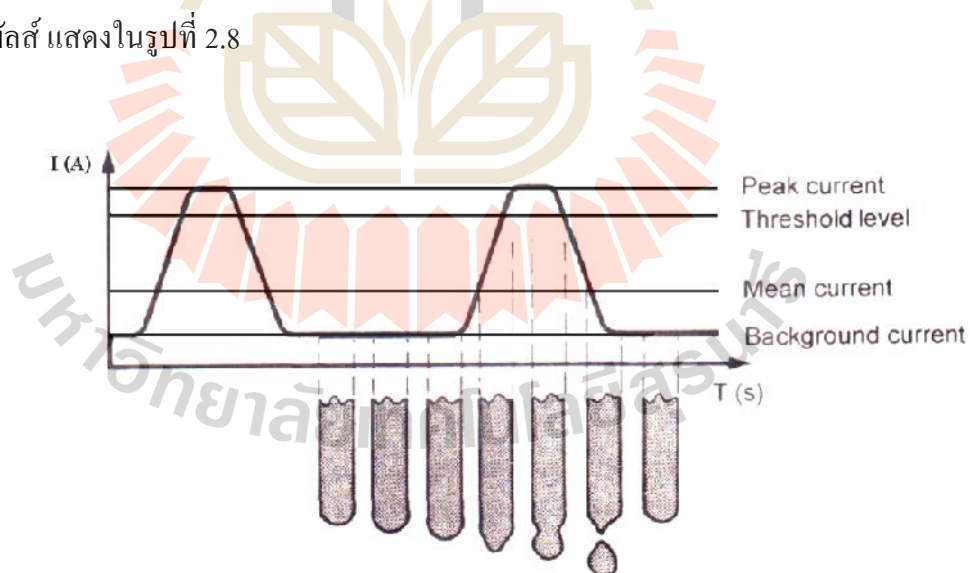
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับความเร็วในการป้อนลวด (สมศักดิ์ เชาวลิต, 2555)

### 2.3.1 กระแสเชื่อมแบบมาตรฐาน (Standard Arc Current)

กระแสเชื่อมแบบมาตรฐาน เป็นลักษณะของกระแสเชื่อมโดยทั่ว ๆ ไป ซึ่งกระแสในขณะเชื่อมโดยเฉลี่ยตลอดการเชื่อมจะมีค่าคงที่ สำหรับกระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก กระแสไฟเชื่อมจากเครื่องเชื่อมจะถูกส่งไปสู่ท่อนำลวดภายในหัวเชื่อมผ่านไปยังลวดเชื่อมสู่ชิ้นงาน ซึ่งการกำหนดค่ากระแสในการเชื่อม ในทางปฏิบัติจะนิยมตั้งค่ากระแสเชื่อม โดยพิจารณาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่ใช้เชื่อม หรือจากความหนาของชิ้นงานเชื่อมเป็นหลัก

### 2.3.2 กระแสเชื่อมแบบพัลส์ (Pulsed Arc Current)

กระแสเชื่อมแบบพัลส์เป็นกระแสที่เกิดจากการเปิดปิดวงจร (Switching) ระหว่างกระแสต่ำสุดกับกระแสสูงสุด ดังนั้น ในเครื่องเชื่อมตัวเดียวจึงมีต้นกำเนิดแยกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ให้กระแสต่ำสุด (Background Current) และส่วนที่ให้กระแสสูงสุด (Peak Current) เพื่อให้ได้กระแสพัลส์ที่เหมาะสม การตั้งค่ากระแสในการเชื่อมจะต้องตั้งค่ากระแสสูงสุดให้สูงกว่าระดับกระแสช่วงเปลี่ยน (Threshold Level) ของการถ่ายโอนแบบละอองและค่าของกระแสต่ำสุดต้องตั้งในช่วงการถ่ายโอนแบบหยด ในขณะที่อาร์คช่วงกระแสค่าสูงจะเป็นการถ่ายโอนน้ำโลหะให้พุ่งเข้าสู่บ่อหลอมละลายโลหะถูกแรงบีบรัดแยกตัวออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านอาร์คสู่บ่อหลอมเหลวที่วงรอบพัลส์และเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันอย่างต่อเนื่องในช่วงประมาณ 30-300 ครั้งต่อวินาที ลงสู่บ่อหลอมละลาย ส่วนช่วงกระแสค่าต่ำจะเป็นการรักษาการอาร์คให้คงที่และต่อเนื่องลักษณะของรูปแบบของกระแสพัลส์ แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบของกระแสเชื่อมแบบพัลส์ (สมศักดิ์ เชาวลิต, 2555)

## 2.4 เหล็ก SS400 หรือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 เป็นเหล็กที่อยู่ในมาตรฐาน JIS G3101 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีคือ ฟอสฟอรัส (P) ไม่เกิน 0.050 เปอร์เซ็นต์ และซัลเฟอร์ (S) ไม่เกิน 0.050 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งประมาณ 116 - 152 HB เหล็กกรีไซเคิลมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการประกอบหรือขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กได้แก่ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลการเกษตร งานท่อเหล็กต่าง ๆ รวมถึงเป็นการผลิตชิ้นส่วนรถบรรทุก มีความต้านแรงดึง 400 - 510 N/mm<sup>2</sup> ความต้านแรงดึงจุดครากต่ำสุด 245 N/mm<sup>2</sup> (สำหรับความหนาน้อยกว่าหรือเท่ากับ 16 มิลลิเมตร) ร้อยละของการยืดตัวต่ำสุด 21 เปอร์เซ็นต์ (สำหรับเหล็กแผ่นที่ความหนาน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 มิลลิเมตร) ความหนาตั้งแต่ 0.140 - 3.200 มิลลิเมตร และความกว้างตั้งแต่ 600 - 1550 มิลลิเมตร ปัจจุบันผลิตได้ตั้งแต่ความหนา 1.000 - 19.000 มิลลิเมตร ที่ความกว้าง 750 - 1550 มิลลิเมตร ส่วนความยาวนั้น ก็ขึ้นอยู่กับน้ำหนัก ความกว้าง และความหนาของเหล็กม้วน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า SS400 (บริษัท เอสแอนด์บีเทคมาร์ค จำกัด, 2562)

ความหนา	คุณสมบัติทางกล (ไม่ต่ำกว่า)		
	Tensile Strength	Yield Strength	Elongation
ต่ำกว่า 5 mm.	400 - 510	245	21%
5 mm. - 16 mm.	400 - 510	245	17%
16 mm. - 40 mm.	400 - 510	235	21%
40 mm. ขึ้นไป	400 - 510	215	23%

## 2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ The American Iron and Steel Institute (ASAI) จัดอยู่ในซีรีส์ 300 (series 300) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำใช้งานอย่างกว้างขวางในเครื่องจักรและอุปกรณ์แปรรูปอาหาร เกรดที่นิยมใช้มากที่สุด คือ 304 และ 316 มีส่วนผสมของโครเมียม (Cr) อย่างน้อย 16 เปอร์เซ็นต์ และนิกเกิล (Ni) ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติในการขึ้นรูป ความแข็งแรง บางเกรดจะมี โมลิบดีนัม (Mo) ผสมอยู่ด้วยเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อน

- สแตนเลส 304 อาจเรียกว่าสแตนเลส เกรด 18/8 เป็นสแตนเลสในตระกูลออสเทนนิติก มีโครเมียม 18 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 9 เปอร์เซ็นต์ เป็นสแตนเลสที่ The American Iron and Steel Institute (AISI) แนะนำให้ใช้เป็นพื้นผิวที่สัมผัสอาหาร (food contact surface) แต่ 3A Sanitary

Standards อนุญาตให้ใช้เฉพาะในส่วนสนับสนุน (utility) เช่น ท่อ (pipe) เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิห้องที่ความดันบรรยากาศ มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.0 สามารถทนการกัดกร่อนของสารละลายคลอรีนความเข้มข้นไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm)

- สแตนเลส 316 เป็นสแตนเลสในตระกูลออสเทนนิติก ที่มีส่วนประกอบคือ โครเมียม 17 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 10 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มส่วนผสมของโมลิบดีนัม 2 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการกัดกร่อน ซึ่ง 3A แนะนำให้ใช้เป็นพื้นผิวสัมผัสกับอาหาร (food contact surface) มีราคาแพงกว่า สแตนเลส 304 สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ ทนอุณหภูมิต่ำได้มากกว่า และทนการกัดกร่อนของคลอรีนที่ความเข้มข้นสูงกว่าสแตนเลส 314 ประมาณเท่าตัว ใช้เป็นวัสดุสำหรับเครื่องจักรอุปกรณ์แปรรูปอาหาร เช่น เครื่องจักรอุปกรณ์ในการผลิตเบียร์ (beer) ผลิตภัณฑ์นม (dairy product) ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม (beverage) เนื้อสัตว์ (meat) เครื่องบรรจุ ปั้น วาล์ว ไขว่ อุปกรณ์เครื่องครัว เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำติดลบได้ สำหรับถังเก็บแก๊สเหลว เช่น ไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen) และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (plate heat exchanger) ท่อและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (tubular heat exchanger) ถังเก็บ (storage tank) ภาชนะที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมอาหาร และรถเข็นอาหาร (ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร, 2562)

## 2.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)

คุณสมบัติของวัสดุและการทดสอบ ในการพิจารณาเลือกวัสดุเพื่อนำมาใช้งานในลักษณะต่าง ๆ จำเป็นจะต้องทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อให้ได้วัสดุที่เหมาะสมกับสภาพงานนั้น ๆ คุณสมบัติของวัสดุที่จะต้องพิจารณา ได้แก่

**2.6.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)** เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุ การเลือกวัสดุ เพื่อนำไปใช้งานช่างจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ ได้แก่ การกัดกร่อน, ส่วนผสม และลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของส่วนผสมในวัสดุเป็นต้น

**2.6.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties)** เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่เกี่ยวกับแรงที่มากระทำ แต่เกี่ยวกับคุณภาพ หรือคุณลักษณะของเนื้อวัสดุคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความร้อนจำเพาะ การนำความร้อน สัมประสิทธิ์การขยายตัว ความหนาแน่น และความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น

**2.6.3 คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)** เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุ เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อวัสดุคุณสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความสามารถในการยืดตัว ความยืดหยุ่น ความเหนียว เป็นต้น ในงานวิศวกรรม



คุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุดเพราะเมื่อเราจะเลือกใช้วัสดุใด ๆ ก็ตามสิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือคุณสมบัติเชิงกลของมัน การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใด ๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักรอุปกรณ์นั้น ๆ เป็นสำคัญ (เอกสารประกอบการเรียนวิชา InE191 Engineering Material, 2562).

### 2.6.3.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ถือว่าเป็นการทดสอบแบบกึ่งไม่ทำลาย ซึ่งนอกจากจะบอกค่าความแข็งของวัสดุยังสามารถที่จะบอกคุณสมบัติของค่าความต้านทานการสึกหรอ ค่าความต้านทานแรงดึง การทนต่อการเสียดสี และความเหนียวของวัสดุ ค่าความแข็งของวัสดุจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค การขึ้นรูป และกรรมวิธีทางความร้อน เป็นต้น ในการวัดความแข็งจะมีหลายวิธี ที่นิยมกันมากคือ การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell) แบบวิกเกอร์ส (Vickers) และแบบรอกเวลล์ (Rockwell) ในงานวิจัยจะใช้การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)

การทดสอบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) จะใช้หลักการเดียวกับ การทดสอบ แบบบริเนลล์ เปลี่ยนจากหัวกดลูกบอลชุบแข็งเป็นหัวกดที่ทำด้วยเพชรเจียรไนเป็นทรงพีระมิดทำมุม 136 องศา กดด้วยแรง  $F$  ตั้งฉากกับชิ้นงานทดสอบ รอยกดที่ได้จะนำไปวัดเส้นทแยงมุม  $d$  ทั้งสองด้าน ซึ่งความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมจะนำไปคำนวณหาค่าความแข็งของชิ้นงาน



รูปที่ 2.9 แสดงการกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (อภิชาติ พานิชกุล และ อุษณีย์ กิตกำธร, 2562)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ผิวรอยกด}}$$

$$HV = \frac{0.102Fx \ 2\cos 22^\circ}{d^2}$$

$$HV = \frac{0.189F}{d^2}$$

F = แรงที่ทำการกดขึ้นงาน (N)

d = เส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm.)

## 2.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหวิทยา (Metallurgical Investigation)

การศึกษาโครงสร้างทางโลหวิทยาแบ่งเป็น

**2.7.1 การตรวจสอบในระดับมหภาค (Macro-scopic examination)** เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานโดยใช้กำลังขยายต่ำ กล่าวคือ เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยการขัดหยาบ ขัดละเอียด ขัดเงา (Polishing) และกัดกรด (Etching) แล้วสามารถตรวจสอบได้โดยตาเปล่า (Visual inspection) หรืออาจใช้กำลังขยายได้ไม่เกิน 10 เท่า

**2.7.2 การตรวจสอบในระดับจุลภาค (Micro - scopic examination)** เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานโลหะโดยใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นกล่าวคือ ตั้งแต่ 10 เท่า เป็นต้นไป ซึ่งอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างฯในระดับจุลภาค คือ กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหวิทยา (Metallurgical microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) โดยจะมีกำลังขยายอยู่ระหว่าง 10 - 1,000 เท่า ที่กำลังขยายสูงช่วยทำให้การจำแนกชนิดของเฟส (Phase) โครงสร้าง (Structure) ที่ปรากฏอยู่ รวมถึงลักษณะรูปร่าง และขนาดของเฟส หรือ โครงสร้างนั้น ๆ ในชิ้นงานตัวอย่างได้ง่ายขึ้นในบางกรณีที่มี 18 โครงสร้าง หรือเฟสที่ปรากฏในตัวอย่างชิ้นงานมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตรวจสอบได้ที่ระดับกำลังขยาย 10-1,000 เท่า จึงต้องมีการเลือกใช้เครื่องมืออุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูงในที่นี้คือมีกำลังขยายที่มากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

2.7.3 ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากลำแสงอิเล็กตรอน ดังนั้น กล้องชนิดนี้ จึงได้ ชื่อว่า “กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน” (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้งานในทางโลหกรรมมีอยู่ 2 ชนิดคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน)

## 2.8 ความร้อนในการเชื่อม (Head input)

ความร้อนในการเชื่อม (Head input) จะมีผลต่อการหลอมละลายของแนวเชื่อม ความกว้างของแนวเชื่อม และความหนาของแนวเชื่อม รวมถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (Head Affected zone : HAZ) ซึ่งค่าความร้อนในการเชื่อมจะมีหน่วยเป็น KJ/mm. เมื่อมีความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้ค่าการหลอมละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นด้วย แต่ความหนาของแนวเชื่อมจะลดลง ดังนั้นค่าความร้อนที่ได้ในการเชื่อมมีความสำคัญต่อแนวและรวมถึงคุณภาพของงานเชื่อม การคำนวณหาความร้อนในการเชื่อมสามารถคำนวณได้ ดังนี้ (ไพบูลย์ หาญมนต์, 2552)

$$\text{Heat input} = \text{Energy input} \times \text{Heat Efficiency}$$

$$\text{Energy input} = \frac{\text{Volt} \times \text{Amp} \times 60}{\text{Velocity}(\text{mm./min}) \times 60}$$

$$\text{Heat Efficiency} = \text{Amp} \times \text{Arc Voltage}$$

## 2.9 ความเจือจางของโลหะ (Dilution)

ในการเชื่อมโลหะชนิดที่แตกต่างกัน คุณสมบัติส่วนผสมทางเคมีของวัสดุจะถูกหลอมละลายผสมรวมกัน หรือเรียกว่า ความเจือจาง ซึ่งความเจือจางของโลหะเชื่อมควบคุมโดยการกำหนดน้ำหนักของวัสดุประเภทต่าง ๆ เพื่อมาผสมกันโดยใช้การชั่งน้ำหนัก

### 2.9.1 สาเหตุที่ทำให้เกิดความเจือจาง

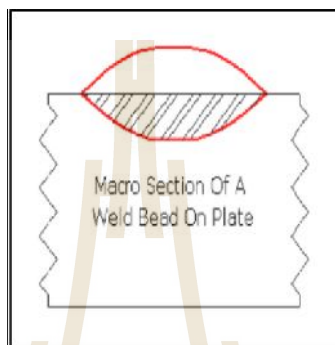
1) ความเร็วในการเดินสูง (High Travel speed) ความร้อนที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการแทนที่ของลวดเชื่อม

2) กระแสไฟเชื่อมสูง (High Welding Current) กระบวนการเชื่อมที่เกิดกระแสไฟที่สูง เช่น กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerge Arc Welding : SAW) สามารถที่จะเกิดความเจือจางสูง

3) ความบางของวัสดุ (Thin Material) เช่น กระบวนการเชื่อมทิกแผ่นโลหะบางสามารถที่จะก่อให้เกิดความเจือจางระดับสูง และการเตรียมรอยต่อ (Joint Preparation) ซึ่งความเจือจางมีสมการในการคำนวณ ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเจือจาง} = a/(a + A) \times 100$$

- โดย a คือ พื้นที่แผ่นชิ้นงานที่เกิดหลอมละลาย (Area of Molten Parent Plate)  
 A คือ พื้นที่ทั้งหมดที่เกิดการหลอมละลาย (Area Enclosed by red line)



รูปที่ 2.10 แสดงความเจือจางของโลหะ (Dilution) (นพกร ภูระยัม และ อิศรทัต พึ่งอัน, 2551)

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จกมล ศรีธร (2557) ทำการวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของกระบวนการเชื่อมต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมพอกผิวแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยทั้งสแตนคาร์ไบด์หลอมเหลว โดยทำการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมทิก ซึ่งจะทำให้การเชื่อมชิ้นงาน โดยใช้ความเร็ว 3 ระดับคือ 9.2 11.2 และ 15.3 เซนติเมตร/นาที ตามลำดับ และกระแสไฟที่ใช้คือ 90A 100A 110A และ 120A ตามลำดับ เพื่อศึกษาว่าความเร็วและกระแสว่ามีผลต่อคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนไปหรือไม่ ผลการทดลองที่ได้คือการเชื่อมชิ้นงานด้วยกระแสไฟที่ 110A ให้ลักษณะแนวเชื่อมที่สมบูรณ์และมีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งความสูงและความกว้างของแนวเชื่อม และความเร็วในการเชื่อม 11.2 เซนติเมตรต่อนาทีที่กระแส 110 A จะให้แนวเชื่อมที่มีลักษณะการซึมลึกดีผิวรอยเชื่อมเป็นเกร็ดสวยงามเหมาะสมต่อการเชื่อมที่สุด ส่วนกระแสไฟต่ำและสูงเกินไปส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม เนื่องจากการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ทำให้ไม่เหมาะกับการเชื่อม จากการเชื่อมด้วยแก๊สอะเซทิลีนและการเชื่อมแบบทิก พบว่า การเชื่อมพอกผิวแข็งเต็มหน้าบนชิ้นงานเหล็กกล้า SS400 แบบการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยแก๊สอะเซทิลีน จะมีค่าความแข็งผิวอยู่ที่ 868.86 HV ซึ่งมากกว่าการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบทิกที่มีความแข็งอยู่ 664.56 HV เพราะบริเวณผิวของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งแบบแก๊สอะเซทิลีน จะมีการกระจายตัวของเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่บริเวณผิวของรอยเชื่อมส่วนการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบทิก การกระจายตัวของเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์จะอยู่บริเวณท้องของแนวเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมจะประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ที่มีเกรนละเอียด ทั้งนี้ความเร็วในการเชื่อมจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมอีกด้วย

สุรธยา อิ่มนา (2552) ได้ทำศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของเนื้อเชื่อมพอกของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมกและกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ซึ่งเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 เป็นเหล็กกล้าที่เชื่อมยาก ความร้อนจากกระบวนการเชื่อมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค โดยขึ้นทดสอบดูให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิ 350°C และให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 550°C นาน 1 ชั่วโมง เพื่อลดความเค้นตกค้างในชิ้นทดสอบและหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างทางจุลภาคที่ไม่ต้องการ ขึ้นทดสอบจะเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมกและกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และทดสอบความแข็งแรงล้าด้วยเครื่องทดสอบแบบคานหมุน ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเป็นโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ ส่วนโครงสร้างจุลภาคบริเวณเมื่อเชื่อมประกอบไปด้วยโครงสร้าง Acicular ferrite, Polygonal ferrite และ Side plate ferrite ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันในแต่ละกรรมวิธีการเชื่อม ค่าความแข็งแรงล้าของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ให้ค่าความแข็งแรงล้าที่ดีที่สุด และมีความแข็งแรงล้าต่ำกว่าเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 เล็กน้อย

ขงยุทธ ดุลยกุล, นภิสพร มีมลคล และ ประภาส เหมือนจันทร์บุรี (2551) ได้ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระแสเชื่อม และส่วนผสมของแก๊สคลุมที่แตกต่างกันโดยกรรมวิธีการเชื่อมมิก โดยใช้แก๊สคลุมที่แตกต่างกันกับกระแสเชื่อม 2 ชนิด คือกระแสพัลส์ และกระแสมาตรฐาน เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 จากการศึกษาพบว่าการเชื่อมด้วยกระแสแบบมาตรฐานที่แก๊สคลุมทุกอัตราส่วนมีการหลอมละลายระหว่างชั้นกับเนื้อโลหะงานบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ) สมบูรณ์ดี แนวเชื่อมเรียบ ส่วนการเชื่อมด้วยกระแสแบบพัลส์การหลอมละลายระหว่างชั้นกับเนื้อโลหะงานบริเวณ HAZ มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่วนการทดสอบทางกลพบว่าการเชื่อมด้วยกระแสแบบมาตรฐานที่แก๊สปกคลุมทุกอัตราส่วนจะให้ค่าความแข็งแรง และความเค้นที่จุดครากสูงกว่าการเชื่อมด้วยแก๊สคาร์บอนไอออกไซด์ 100 % ส่วนกระแสแบบพัลส์ให้ค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน เปรียบเทียบกระแสเชื่อมพบว่าการเชื่อมด้วยกระแสมาตรฐาน ทุกอัตราส่วนของแก๊สปกคลุมจะให้ค่าความแข็งแรงและความเค้นที่จุดครากสูงกว่า การทดสอบความแข็งแรงพบว่า การเชื่อมด้วยกระแสทั้งสองชนิดให้ค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน

P.K. Ghosh และ คณะ (2009) ได้ศึกษาคุณลักษณะและพฤติกรรมของการอาร์กในการถ่ายโอนโลหะในการเชื่อมแบบ GMAW กระแสแบบพัลส์ของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้การถ่ายภาพวิธีโอควมเร็วสูงในช่วงการเติมเนื้อโลหะของงานเชื่อมอาร์ก ศึกษาลักษณะของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีการวางแผนไว้ ความยาวความตึงผิวและพฤติกรรมการถ่ายโอนน้ำโลหะจากขนาดเส้นลวดขนาดของหยด และความเร็วของการหยด ณ เวลาต่างๆ พบว่าให้ความแปรผันที่แตกต่างกันในเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดโลหะ ค่าที่ได้จากการทดลองพบว่า สอดคล้องกันกับค่าทฤษฎีที่ประมาณการไว้จากสูตรทางคณิตที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ การเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางหยดโลหะ และอัตราส่วนของ  $I_p / I_p$  พบว่าเป็นผลเสียต่อความเสถียรของแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม และลักษณะการอาร์ก โดยเฉพาะแรงดันไฟฟ้าที่มีการอาร์กสูง

Johnson J.A. et al (2002) ได้ศึกษาการถ่ายโอนน้ำโลหะในกรรมวิธีการเชื่อมแบบ GMAW-P เพื่อศึกษาถึงผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และความกว้างพัลส์ของวงรอบการถ่ายโอนน้ำโลหะ โดยกำหนดให้ตัวแปรการเชื่อมของกระแสพัลส์ที่ใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นชิ้นงานทดลองเชื่อมลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.18 ER70S-6 และแก๊สคลุมในขณะเชื่อมเป็นแก๊สผสมระหว่าง 98%Ar+2%O<sub>2</sub> รอยต่อแบบเดินแนวบนชิ้นงาน ตั้งค่าตัวแปรการเชื่อมของกระแสพัลส์จากเครื่องเชื่อมในสภาวะปกติ หลังจากนั้น ทำการเปลี่ยนแปลงความถี่และความกว้างพัลส์ จากการทดลองพบว่า ที่ค่าตัวแปรการเชื่อมในสภาวะปกติ การถ่ายโอนของหยดโลหะมีขนาดโตกว่าลวดเชื่อมเล็กน้อยที่ความกว้างพัลส์สิ้นสุดลง และการเริ่มต้นของกระแสต่ำจะเกิดการแตกตัวเป็นหยดขนาดเล็กก่อนและยังคงรักษาให้เป็นหยดต่อหนึ่งวงรอบก่อนที่เกิดการถ่ายโอนหยดโลหะที่ความกว้างพัลส์สิ้นสุดลงในวงรอบต่อไป ส่งผลทำให้เกิดการถ่ายโอนโลหะแบบหยดที่สม่ำเสมอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าและความกว้างพัลส์หนึ่งเท่า การถ่ายโอนหยดโลหะมีมากขึ้นแต่ขนาดหยดโลหะจะไม่สม่ำเสมอในแต่ละวงรอบ และบางครั้งไม่เกิดการถ่ายโอนหยดโลหะในวงรอบต่อไปจึงเป็นสาเหตุทำให้การถ่ายโอนหยดโลหะมีขนาดใหญ่ขึ้น

อรรถกร จันทร์ชนะ และ คณะ (2559) ได้ศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นการเชื่อมพอกผิวแข็งมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของผิวพอกแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ แบบมีการสร้างชั้นรองพื้นและแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ผลการทดลองโดยสรุปพบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของโลหะเชื่อมแสดงถึงความแข็งสูงสุด 750 HV พบได้ที่ผิวบนของชั้นพอกแข็งที่ 3 แบบไม่มีรองพื้น และแสดงความแข็งต่ำสุด 225 HV ที่โลหะฐาน การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่า การเพิ่มเฟสที่มีโครเมียม โมลิบดีนัม และแมกนีเซียมในปริมาณสูงส่งผลให้เพิ่มความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น การสร้างชั้นรองพื้นสามารถกำจัดจุดบกพร่องใน

โลหะเชื่อมพอกแข็งแต่ทำให้เกิดการเงาของส่วนผสมทางเคมีที่ส่งผลทำให้เกิดการลดสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมได้

ประกาศ เมืองจันทบุรี และ ชนินทร์ คำรัสการ (2556) ได้ศึกษากรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการสึกหรอ และยืดอายุการใช้งานสำหรับพินไมเหล็กกล้าแมงกานีส โดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยศึกษากรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าแมงกานีสของพินไมเครื่องไม้ถ่านหิน ที่ศึกษาการเชื่อมพอกแข็งในสภาวะการเชื่อมในบรรยากาศปกติและเชื่อมโดยควบคุมอุณหภูมิ โดยหลังการเชื่อมจะศึกษาทั้งแบบทำและไม่ทำการตีกระแทกเพิ่มความแข็ง โดยการวิเคราะห์หลักได้แก่ โครงสร้างมหภาค/จุลภาค การทดสอบความแข็งและทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมแบบต่าง ๆ เช่น การเชื่อมรองพื้น การเชื่อมสร้างเนื้อ และการเชื่อมพอกผิวแข็ง

สิทธิพงษ์ แสงอินทร์ (2560) ได้ศึกษาผลของการกระจายความร้อนต่อรูปร่างของแนวเชื่อมในชิ้นงานที่มีความหนาต่างกัน โดยพิจารณาจากความกว้าง อัตราการหลอมลึก ความนูนแนวเชื่อม และพื้นที่ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการกระจายความร้อน ทำการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนมาตรฐาน ASTM A36 ที่มีความหนา 3-9 มิลลิเมตร ด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) เพื่อดูปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบอัตราเร็วป้อนลวด และความเร็วในการเชื่อมที่ 42.33-59.26 กับ 4.23-6.35 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า รูปร่างของแนวเชื่อมมีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน และการกระจายความร้อนในพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่มีความหนาต่างกัน โดยความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานในอัตราที่สูง ส่งผลให้อัตราการหลอมลึก แนวเชื่อมสูง ความนูนแนวเชื่อมต่ำ และแนวเชื่อมมีความกว้าง ในขณะที่ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานในอัตราที่ต่ำ ส่งผลให้อัตราการหลอมลึกแนวเชื่อมต่ำ และมีความนูนแนวเชื่อมสูง นอกจากนี้ ชิ้นงานที่บางกว่าส่งผลให้มีความกว้างของบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากการกระจายความร้อนมากกว่าชิ้นงานที่หนากว่า

## บทที่ 3

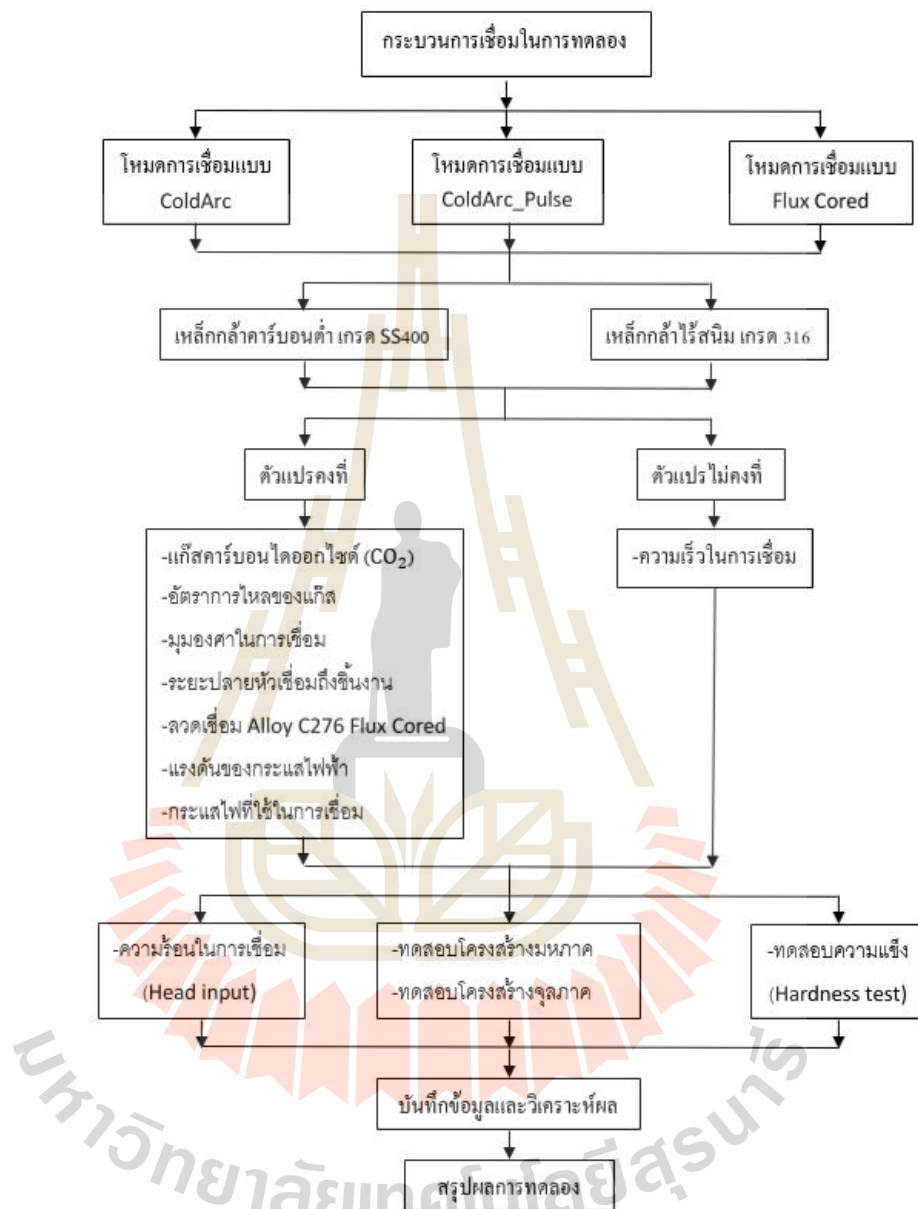
### วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ หรือกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding Process) โดยใช้ลวดเชื่อม Alloy C276 Flux-Cored ในการเชื่อม และใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 เป็นชิ้นงานในการทดลอง การเชื่อมจะเป็นแบบอัตโนมัติโดยใช้หุ่นยนต์เชื่อมอัตโนมัติ Kawasaki รุ่น BA006N Robot จะใช้กระแสไฟในการเชื่อมที่ 165 แอมแปร์ และแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ จากนั้นทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง จากการทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินงานตามขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
3. ออกแบบการทดลอง
4. ดำเนินการทดลองที่ได้ออกแบบไว้
5. ทำการตัดชิ้นงานให้ได้ตามมาตรฐานในการทดสอบ
6. ทดสอบชิ้นงาน
7. บันทึกผล วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



### 3.1 แผนผังการดำเนินงานเชื่อมในงานวิจัย



### 3.2 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ในการวิจัย

เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยได้รับการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกจากอาคารเครื่องมือ 6 อาคารเครื่องมือ 10 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และแผนกช่างเชื่อมโลหะของวิทยาลัยเทคนิคสระบุรี และมีการอบรมความปลอดภัยและการใช้เครื่องมือที่ถูกต้องวิธี โดยรับสิทธินักศึกษาโครงการวิจัยได้ใช้เครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์ ประกอบไปด้วย

#### 3.2.1 หุ่นยนต์เชื่อมอัตโนมัติ Kawasaki รุ่น BA006N Robot



รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์เชื่อมอัตโนมัติ Kawasaki รุ่น BA006N Robot

#### 3.2.2 เครื่องเชื่อม

เครื่องเชื่อมเป็นระบบ Transformer-Rectifier เครื่องหมายการค้า ewm รุ่น alpha

352 puls



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมรุ่น alpha 352 puls

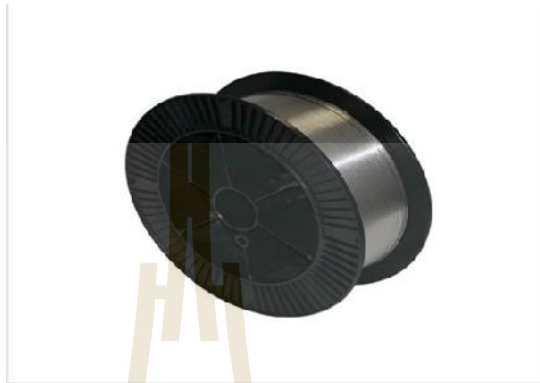
### 3.2.3 ชุดอุปกรณ์การเชื่อมด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์การเชื่อมด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

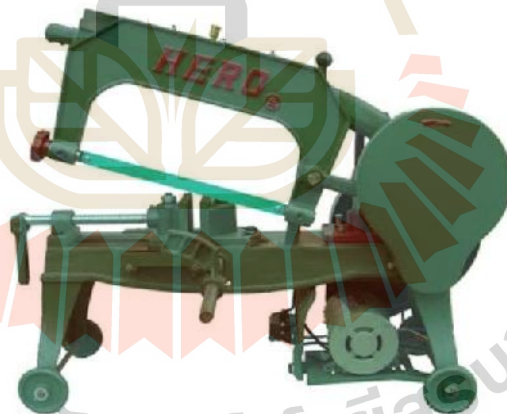
### 3.2.4 ลวดเชื่อม

เป็นลวดเชื่อม Alloy C276 Flux Cored



รูปที่ 3.4 ลวดเชื่อม Alloy C276 Flux Cored

### 3.2.5 เครื่องเลื่อยสายพานกึ่งอัตโนมัติ



รูปที่ 3.5 เครื่องเลื่อยสายพานกึ่งอัตโนมัติ

### 3.2.6 เครื่องตัดชิ้นงาน BUEHLER รุ่น ABRASIMET 2



รูปที่ 3.6 เครื่องตัดชิ้นงาน BUEHLER รุ่น ABRASIMET 2

### 3.2.7 เครื่องตัด Wire Cut



รูปที่ 3.7 เครื่องตัด Wire Cut

### 3.2.8 เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน



รูปที่ 3.8 เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน

### 3.2.9 เครื่องขัดผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ )



รูปที่ 3.9 เครื่องขัดผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ )

### 3.2.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน

### 3.2.11 กล้องจุลทรรศน์แบบกำลังขยายต่ำ



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แบบกำลังขยายต่ำ

### 3.2.12 เครื่องมือในการทดสอบสมบัติทางกล

เครื่องทดสอบความแข็ง เป็นเครื่องทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers) เครื่องหมายเลข FUTURE-TECH โมเดล FM-800 สามารถอ่านผลการทดสอบจากเครื่องโดยตรงเป็นตัวเลขดิจิทัล หัวกดเพชรมุม 136 องศา ใช้วัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส จะใช้หัวเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา น้ำหนักในการกด (Test Load) 300 gf. กดค้างไว้ (Dwell Time) เป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งจะกดในแนวตั้ง (Vertical) ของชิ้นงานทดสอบ โดยจะใช้เส้นแบ่งเขตการหลอมละลาย (Fusion line) เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการกดความแข็ง และจะกดความแข็งไปยังบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal) และไปยังบริเวณเนื้อโลหะงาน (Base Metal) โดยระยะห่างจากตำแหน่งอ้างอิงข้างละ 0.24 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างจากจุดที่วัดความแข็ง 0.24 มิลลิเมตร เช่นกัน



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นทดสอบแบบ ไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers)

### 3.3 การกำหนดปัจจัยและออกแบบการทดลอง

จุดประสงค์ของการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาตัวแปรในกระบวนการเชื่อม รวมไปถึงว่ามีผลต่อลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของงานเชื่อม ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยที่สำคัญที่จะทำการศึกษา ดังนี้

#### 3.3.1 ปัจจัยที่กำหนดให้คงที่ในการเชื่อม

- เครื่องเชื่อมและชุดอุปกรณ์ควบคุมการเชื่อม



- วัสดุชิ้นงานทดลองเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316
- ลวดเชื่อม Alloy C276 Flux Cored
- การตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา
- ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 3.1 ตารางค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม

ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม	ค่า
กระแสเชื่อม (แอมป์)	165
แรงดันเชื่อม (โวลต์)	22.0
ระยะปลายหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	12.0
อัตราการไหลของแก๊ส (ลิตร/นาที)	15.0
ความเร็วในเดินหัวเชื่อม (เซนติเมตร/นาที)	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50

### 3.3.2 ปัจจัยที่กำหนดในการเชื่อม

- การเปรียบเทียบความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรดSS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316
- การเปรียบเทียบการเชื่อมแบบโหมด ColdArc, ColdArc\_Pulse และFlux Cored

### 3.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จากปัจจัยสำคัญในการทดลองนี้ คือ ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่แตกต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยวิธีการทางสถิติจะพิจารณาจากผลการทดสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่วัดได้ โดยข้อมูลที่ได้จากผล การทดสอบจะสามารถอธิบายถึงความแปรปรวนของข้อมูล รวมถึงสามารถอธิบายจากสมมติฐานในการทดสอบถึง ผลของความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมที่แตกต่างกันหรือไม่ ดังนั้น เพื่อให้ เห็นผลสรุปของข้อมูลที่ชัดเจนจึงแบ่งการวิเคราะห์ผลทางสถิติได้เป็น 6 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 วิเคราะห์ค่าการหลอมลึกของรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมใน 3 โหมด สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วที่แตกต่างกันจำนวน 4 ระดับ

กลุ่มที่ 2 วิเคราะห์ค่าความสูงของรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมใน 3 โหมด สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วที่แตกต่างกันจำนวน 4 ระดับ

กลุ่มที่ 3 วิเคราะห์ค่าความกว้างของรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมใน 3 โหมด สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วที่แตกต่างกันจำนวน 4 ระดับ

กลุ่มที่ 4 วิเคราะห์ค่าการหลอมลึกของรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมใน 3 โหมด สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ที่ความเร็วที่แตกต่างกันจำนวน 4 ระดับ

กลุ่มที่ 5 วิเคราะห์ค่าความสูงของรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมใน 3 โหมด สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ที่ความเร็วที่แตกต่างกันจำนวน 4 ระดับ

กลุ่มที่ 6 วิเคราะห์ค่าความกว้างของรอยเชื่อมจากการเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมใน 3 โหมด สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ที่ความเร็วที่แตกต่างกันจำนวน 4 ระดับ

ดังนั้น จากปัจจัย (Factor) ที่สำคัญในการทดลองคือ ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม ได้กำหนดค่าของปัจจัยไว้ 4 ระดับคือ 20 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที ตามลำดับ จากปัจจัยในการทดลอง และระดับของปัจจัยที่ต้องการศึกษา ดังกล่าว จึงเลือกวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ของการทดลองปัจจัยเดียว (Single Factor Experiment) แสดงในสมการ

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}; \quad i = 1, 2, \dots, \alpha$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

เมื่อ  $Y_{ij}$  คือ ค่าสังเกตที่  $j$  ภายใต้ระดับที่  $i$

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยรวม

$\tau_i$  คือ ค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่  $i$

$\varepsilon_{ij}$  คือ ค่าความผิดพลาดแบบสุ่มของค่าสังเกตที่  $j$  ภายใต้ระดับที่  $i$

## 3.3.3.1 ข้อกำหนดของการทดสอบสมมติฐาน

1. Error Type I (Alpha :  $\alpha$ ) = 0.052. Error Type II (Beta :  $\beta$ ) = 0.05

3. Factor 1 = ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม

## 3.3.3.2 สมมติฐานสำหรับการทดลอง

1) กำหนดสมมติฐานของอิทธิพลความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่แตกต่างกัน ว่ามีผลต่อโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมหรือไม่ ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อสรุปสำหรับการทดลองได้ดังนี้

$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$  ความแปรปรวนของข้อมูลจากการทดสอบทั้ง 3 รอบไม่

แตกต่างกัน

$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2$  ความแปรปรวนของข้อมูลจากการทดสอบทั้ง 3 รอบ

แตกต่างกัน

$H_0 : \mu_1 = 0$  ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อการหลอมลึกเฉลี่ยของ

เชื่อม

$H_1 : \mu_1 \neq 0$  ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน มีผลต่อการหลอมลึกเฉลี่ยของ

รอยเชื่อม

$H_0 : \mu_1 = 0$  ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อความสูงเฉลี่ยของ

รอยเชื่อม

$H_1 : \mu_1 \neq 0$  ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน มีผลต่อความสูงเฉลี่ยของรอยเชื่อม

$H_0 : \mu_1 = 0$  ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อความกว้างเฉลี่ยของ

รอยเชื่อม

$H_1 : \mu_1 \neq 0$  ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน มีผลต่อความกว้างเฉลี่ยของรอยเชื่อม

2) กำหนดสมมติฐานของอิทธิพลโหมดที่ใช้ในการเชื่อมที่แตกต่างกัน ที่ความเร็ว ระดับ 25 เซนติเมตร/นาที ว่ามีผลต่อโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมหรือไม่ ซึ่งสามารถใช้เป็น ข้อสรุปสำหรับการทดลอง ได้ดังนี้

$H_0 : \mu_1 = 0$  โหมดที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อการหลอมลึกเฉลี่ยของรอยเชื่อม

$H_1 : \mu_1 \neq 0$  โหมดที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน มีผลต่อการหลอมลึกเฉลี่ยของรอยเชื่อม

$H_0 : \mu_1 = 0$  โหมดที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อความสูงเฉลี่ยของรอยเชื่อม

$H_1 : \mu_1 \neq 0$  โหมดที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน มีผลต่อความสูงเฉลี่ยของรอยเชื่อม

$H_0 : \mu_1 = 0$  โหมดที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อความกว้างเฉลี่ยของรอยเชื่อม

$H_1 : \mu_1 \neq 0$  โหมดที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่างกัน มีผลต่อความกว้างเฉลี่ยของรอยเชื่อม

### 3.3.3.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

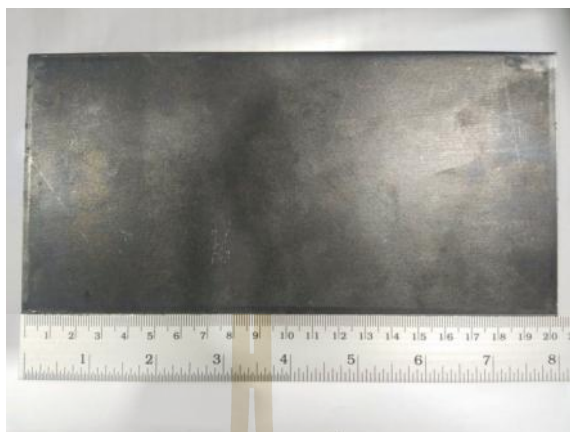
- 1) วิเคราะห์โดยความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 17 ช่วยในการวิเคราะห์
- 2) ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล
- 3) ประมวลผลด้วยโปรแกรมทางสถิติ One-Way ANOVA เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและยืนยันสมมติฐานในการทดลองว่า ความเร็วและโหมดที่ใช้ในการเชื่อมที่แตกต่างกัน มีผลต่อโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมหรือไม่

## 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เพื่อเป็นการลดความแปรปรวนของข้อมูล ที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ ของการดำเนินงาน เช่น การเตรียมชิ้นงานทดลอง การเชื่อมชิ้นงานทดลอง ตลอดจนการตรวจสอบและทดสอบชิ้นงาน ภายหลังจากการเชื่อม จึงกำหนดขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยให้เป็นไปตามมาตรฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ ของงานเชื่อม ดังนี้

### 3.4.1 การเตรียมชิ้นงานทดลอง

การเตรียมชิ้นงานทดลองโดยตัดชิ้นงานการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ให้ได้ขนาด 200x100x6 มิลลิเมตร และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ให้ได้ขนาด 6x6x0.5 นิ้ว ดังรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



รูปที่ 3.14 เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

#### 3.4.2 การเชื่อมชิ้นงานทดลอง

ทำการเชื่อมชิ้นงานด้วยกระแสไฟฟ้าที่ 165 แอมแปร์ และแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 3 ค่า คือ 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที โหมดในการเชื่อม 3 โหมด คือ ColdArc ColdArc\_Pulse และ Flux Cored และ ลวดเชื่อม Alloy C276 Flux\_Cored (ตารางที่ 3.1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อม 1.2 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW) ซึ่งใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สปกคลุม โดยในแต่ละ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมจะทำการเชื่อมซ้ำทั้งหมด 3 รอบ ซึ่งในขณะที่เชื่อมนั้น โหมดการเชื่อม

แบบ ColdArc จะให้กระแสเชื่อมเฉลี่ยอยู่ที่ 103.5 แอมแปร์ และแรงดัน อาร์กเฉลี่ยอยู่ที่ 22.5 โวลต์ โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse จะให้กระแสเชื่อมเฉลี่ยอยู่ที่ 88 แอมแปร์ และแรงดันอาร์กเฉลี่ยอยู่ที่ 20.6 โวลต์ และโหมดการเชื่อมแบบ Flux cored จะให้กระแสเชื่อมเฉลี่ยอยู่ที่ 113 แอมแปร์ และแรงดันอาร์กเฉลี่ยอยู่ที่ 23.45 โวลต์ (ตารางที่ 3.2)

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม Alloy C276 Flux\_Cored (%) (Washington Alloy, 2019)

Carbon (C)	0.01	Manganese (Mn)	0.50	Sulfur (S)	0.001
Chromium (Cr)	16.10	Molybdenum (Mo)	16.10	Tungsten (W)	3.30
Cobalt (Co)	0.40	Nickel (Ni)	57.10	Vanadium (V)	0.15
Copper (Cu)	0.15	Phosphorous (P)	0.01		
Iron (Fe)	5.90	Silicon (Si)	0.02		

ตารางที่ 3.3 แสดงค่ากระแสเชื่อมและแรงดันอาร์กของการเชื่อมแต่ละโหมด

โหมดการเชื่อม	กระแสไฟ (A)	โวลต์ (V)
ColdArc	103.5	22.5
ColdArc_Pulse	88	20.6
Flux cored	113	23.45



รูปที่ 3.15 โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



รูปที่ 3.16 โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



รูปที่ 3.17 โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316



รูปที่ 3.18 โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

### 3.4.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ในส่วนของการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยานั้น จะใช้วิธีการตรวจสอบโครงสร้างการเตรียมชิ้นงานมีวิธีการดำเนินงาน คือ นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมเรียบร้อยแล้ว มาตัดแบ่งเป็นชิ้นทดสอบแต่ละอย่าง แสดงในรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 ซึ่งจะนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาได้





รูปที่ 3.19 ชิ้นงานที่ตัดแบ่งมาทดสอบ



รูปที่ 3.20 ขนาดชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยนำชิ้นงานที่ตัดได้ขนาด 12.5 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.20 มาเตรียมเป็นชิ้นงานตรวจสอบ โดยมีวิธี ดังนี้

3.4.3.1 การตัดชิ้นงานเชื่อมที่ต้องการตรวจสอบ โครงสร้างโดยทำการตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานกึ่งอัตโนมัติ และเครื่องตัดชิ้นงาน BUEHLER สำหรับขนาดของชิ้นงานตรวจสอบกำหนดให้ขนาด 25 มิลลิเมตร เครื่องตัด wire cut ตัดให้ได้ขนาด 12.5 มิลลิเมตร เพื่อนำไปขัดและส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูโครงสร้างทางโลหะวิทยา

3.4.3.2 เตรียมผิวชิ้นงานโดยการขัดด้วยกระดาษทรายโดยเรียงลำดับ ตั้งแต่ระดับความหยาบไปจนถึงละเอียด (เบอร์ 100, 220, 320, 400, 500, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ) ในขณะที่ขัดอยู่เปิดน้ำตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรก ซึ่งได้แก่ ผงโลหะ

3.4.3.3 การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) โดยการขัดด้วยผงขนาด 0.03 ไมครอน ด้วยจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด ใช้ผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

3.4.3.4 การกัดกรดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นงานตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปกัดด้วยน้ำยา โดยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ใช้กรด Nital 3% (ส่วนผสม 5cc Nitric acids + 95cc Ethyl alcohol) และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ใช้กรด Carpenter (85g Ferric chloride + 24g Cupric chloride + 122ml Ethanol + 122ml Hydrochloride acid + 6ml Nitric acid) หลังจากการกัดกรด นำไปล้างน้ำสะอาดและเป่าให้แห้ง นำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical Inspection)

การตรวจสอบทางกายภาพและโครงสร้างมหภาค เพื่อดูลักษณะความแตกต่างของแนวเชื่อม เช่น ความกว้าง ความนูน การหลอมลึก และจุดบกพร่องต่าง ๆ บริเวณแนวเชื่อมและภายในรอยเชื่อม ส่วนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เพื่อตรวจสอบลักษณะของเกรน บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal)

3.4.3.5 นำชิ้นงานทดสอบมา Scan เพื่อนำรูปไปวัดสอบเทียบขนาดการหลอมลึก ความสูง และความกว้างของรอยเชื่อมโดยใช้โปรแกรม ImageJ



รูปที่ 3.21 โลโก้โปรแกรม ImageJ

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค เพื่อดูลักษณะความแตกต่างของความเร็วที่มีผลต่อแนวเชื่อม เช่น การหลอมลึก ความสูง และความกว้าง

#### 3.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

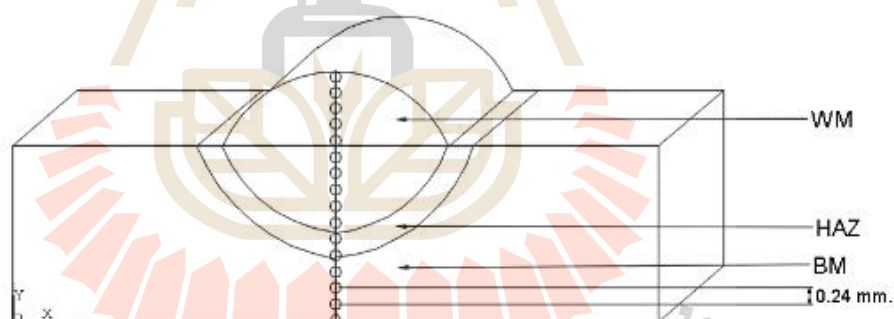
ใช้ One-way ANOVA โปรแกรม Minitab Version 17 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ



รูปที่ 3.22 โลโก้โปรแกรม Minitab Version17

### 3.4.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติทางกล

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) จะใช้ชิ้นงานเดียวกันกับการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยจะกำหนดตำแหน่งการทดสอบบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (weld Metal) บริเวณกระแทกร้อน (Haz) และเนื้อโลหะงาน (Base Metal) วิธีการวัดความแข็งจะใช้หัวเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา น้ำหนักในการกด (Test Load) 1000 gf. กดค้างไว้ (Dwell Time) เป็นเวลา 10 วินาที



รูปที่ 3.23 ตำแหน่งของจุดทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) เพื่อเปรียบเทียบความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal) บริเวณกระแทกร้อน (Haz) และบริเวณเนื้อโลหะ (Base Metal) จากปัจจัยการทดลองที่แตกต่างกัน

## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัย เพื่อศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ผลของการทดลองมีดังนี้

#### 4.1 การตรวจสอบโครงสร้างแบบมหภาค (Macrostructure Investigation)

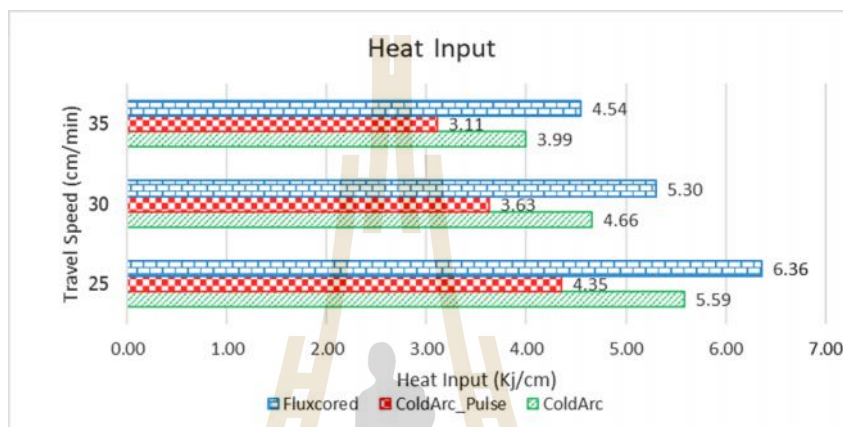
การพิจารณาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ของชิ้นงานที่มีปัจจัยการเชื่อมด้านความเร็วในการเชื่อมและการเลือกใช้โหมคในการเชื่อมที่ต่างกัน สามารถสังเกตเห็นลักษณะความแตกต่างของรอยเชื่อมแต่ละแนวเชื่อมที่มีลักษณะแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อม ซึ่งความเร็วในการเชื่อมและโหมคการเชื่อมแต่ละโหมค จะส่งผลต่อลักษณะโครงสร้าง ทั้งความสูง ความกว้าง และการหลอมลึกของแนวเชื่อม ความกว้างของเขตบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ระหว่างเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal : WM) และเนื้อโลหะเดิม (Base Metal : BM) โดยขนาดความหนาของชิ้นงานก่อนเกิดการสีกหรือมีความหนา 5 มิลลิเมตร ถ้าเกิดการสีกหรือจากการใช้งานจนความหนาชิ้นงานเหลือ 3 มิลลิเมตร จะต้องมีการเชื่อมพอกผิวโลหะให้ได้ขนาดเท่าความหนาเดิม ซึ่งขนาดของแนวเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิวโลหะ จะต้องมีความสูงของแนวเชื่อมอยู่ในช่วง 2.0-2.5 มิลลิเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม

##### 4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ด้วยโหมคการเชื่อมแบบ ColdArc ColdArc\_Pulse และFluxcored พบว่าเมื่อเปรียบเทียบลักษณะแนวเชื่อมที่ความเร็วต่าง ๆ ในการเชื่อม ลักษณะแนวเชื่อมของความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที จะมีความกว้าง ความสูง และอัตราการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่มากกว่าความเร็วในการเชื่อม 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที ตามลำดับ (รูปที่ 4.5-4.7) เนื่องจากการใช้ความเร็วในการเชื่อมต่ำ ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานมีค่าสูงมากกว่าการใช้ความเร็วในการเชื่อมสูง (รูปที่ 4.1) การใช้ความเร็วในการเชื่อมต่ำ ทำให้สามารถเติมเนื้อลวดเชื่อมได้ปริมาณสูง ส่งผลให้รูปร่างแนวเชื่อมกว้าง สูง และอัตราการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่มากกว่าการใช้ความเร็วในการเชื่อมสูงซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสิทธิพงษ์ แสงอินทร์ ที่พบว่า ปริมาณของ

พลังงานความร้อน ที่เข้าสู่ชิ้นงานในอัตราที่ต่างกันส่งผลต่อรูปร่างของแนวเชื่อม ตามพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน โดยสามารถคำนวณค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

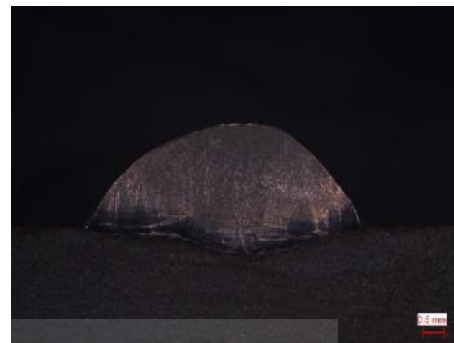
$$\text{Heat Input} = (\text{welding current} \times \text{Arc voltage} \times 60) / 1000 \times \text{welding speed (mm/min)}$$



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) ที่โหมดการเชื่อมต่างกัน



(ก)

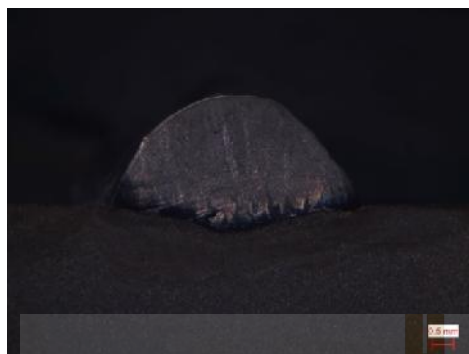


(ข)

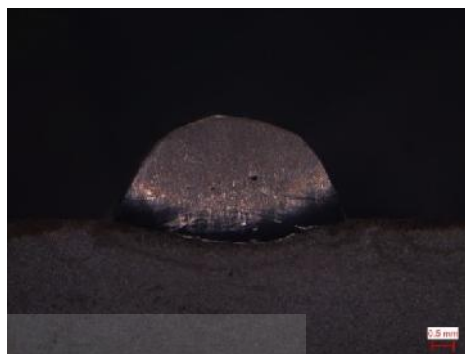


(ค)

รูปที่ 4.2 ลักษณะแนวเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc  
(ก) ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที (ข) ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/  
นาที (ค) ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.3 ลักษณะแนวเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse (ก) ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที (ข) ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที (ค) ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที

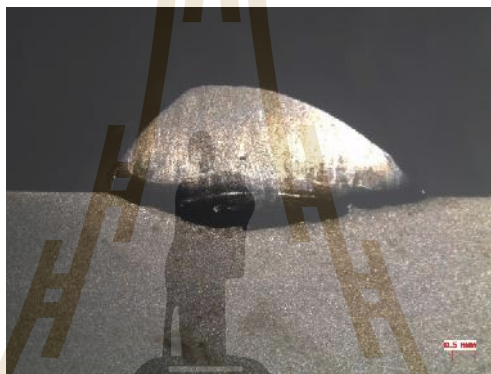
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก)



(ข)



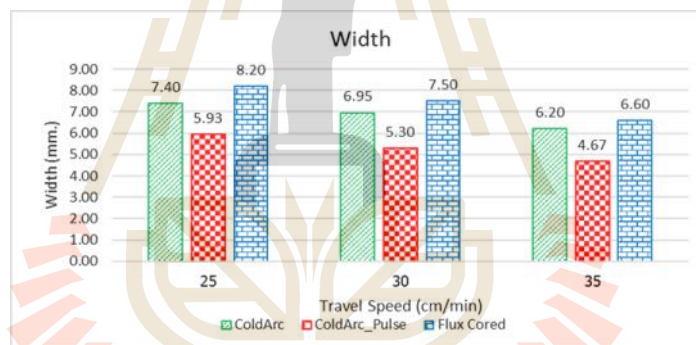
(ค)

รูปที่ 4.4 ลักษณะแนวเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored (ก) ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาทื (ข) ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาทื (ค) ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาทื

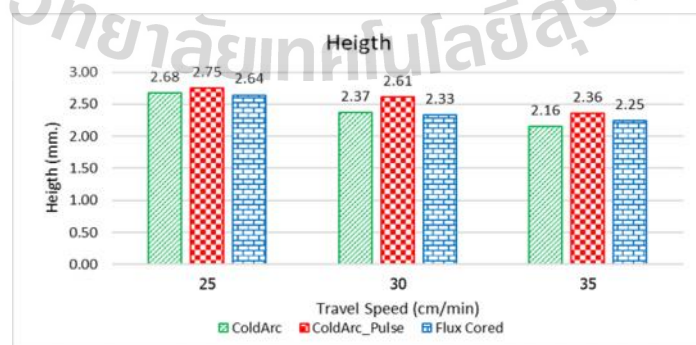
ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาทื พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored จะให้ลักษณะแนวเชื่อมที่มีความกว้างมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.20 7.50 และ 6.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยความกว้างของแนวเชื่อมจะบ่งบอกถึงพื้นที่ที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิว กล่าวคือ ถ้ามีความกว้างของแนวเชื่อมมาก จะทำให้สามารถเชื่อมพอกผิวในปริมาณที่มากกว่าได้ และจะให้ลักษณะแนวเชื่อมที่มีความสูงน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.64 2.33 และ 2.25 มิลลิเมตร ตามลำดับ และจะให้ลักษณะแนวเชื่อมที่มีการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่มาก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.80 0.76 และ 0.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยการหลอมลึกของแนวเชื่อมจะบ่งบอกถึงพื้นที่ของแนวเชื่อมที่หลอมลงไป ในบริเวณโลหะงาน กล่าวคือ ถ้าการหลอมลึกของแนวเชื่อมมาก จะส่งผลให้พื้นที่ของแนวเชื่อมที่หลอมลงไปจะมีปริมาณมาก อาจจะทำให้เกิดการแตกร้าวในบริเวณแนวเชื่อม



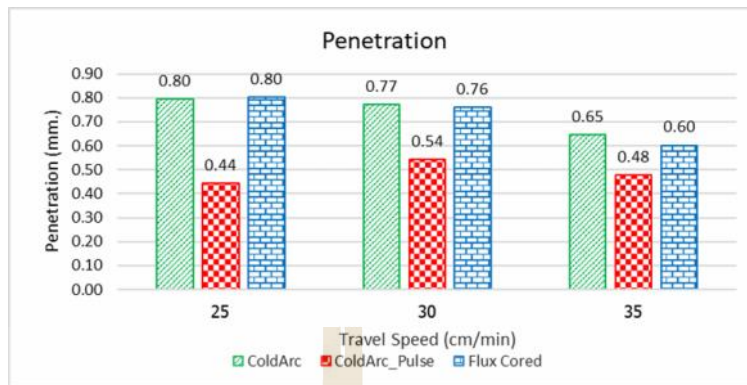
ได้ ซึ่งผลทดลองการหลอมลิกของแนวเชื่อมในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และไม่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวในแนวเชื่อม โดยผลการทดลองที่ได้เป็นผลมาจากโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored ซึ่งจะจ่ายช่วงกระแสไฟและแรงดันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc และโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse ตามลำดับ (ตารางที่ 3.2) เนื่องจากโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc เป็นโหมดการถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร (Short Circuit Transfer) ที่ควบคุมได้ โดยมีปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานน้อย และโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_pulse เป็นโหมดที่มีการพัลส์ของกระแสสูงแล้วต่ำลง โดยจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานน้อยกว่าที่ไม่มีพัลส์ จึงทำให้โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สามารถเติมเนื้อลวดเชื่อมได้สูงกว่าโหมดการเชื่อมแบบอื่น ๆ และโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse จะมีลักษณะแนวเชื่อมที่มีความกว้างและการหลอมลิกของแนวเชื่อมที่น้อยกว่าโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc โดยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse จะมีความกว้างของแนวเชื่อมเท่ากับ 5.93 5.30 และ 4.67 มิลลิเมตร ตามลำดับแต่ให้ลักษณะความสูงของแนวเชื่อมที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.75 2.61 และ 2.36 มิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.5-4.7)



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความกว้างของแนวเชื่อมที่โหมดการเชื่อมต่างกัน



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความสูงของแนวเชื่อมที่โหมดการเชื่อมต่างกัน



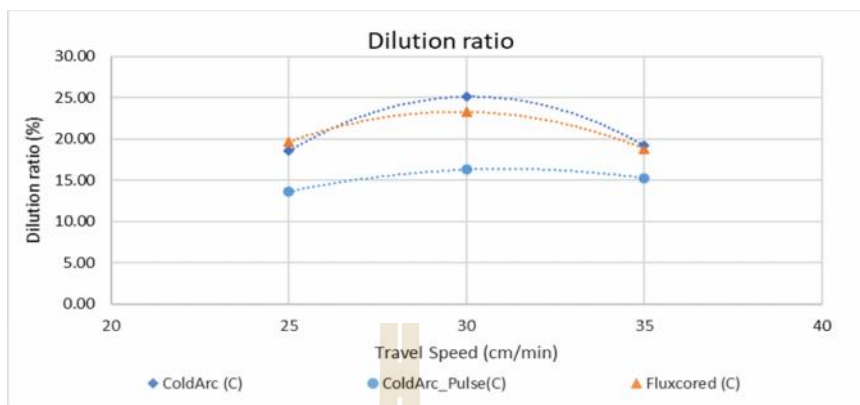
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่โหมดการเชื่อมต่างกัน



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพื้นที่ของแนวเชื่อมและอัตราส่วนการเงิอข้างของแนวเชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อม

Travel speed	Speed 25 cm/min			Speed 30 cm/min			Speed 35 cm/min		
	A	B	(B/A+B)*100	A	B	(B/A+B)*100	A	B	(B/A+B)*100
ColdArc	14.32	3.26	18.52	11.18	3.75	25.13	10.09	2.40	19.20
ColdArc_Pulse	11.95	1.88	13.60	9.74	1.89	16.27	8.64	1.56	15.26
Fluxcored	15.90	3.89	19.64	13.05	3.96	23.29	11.68	2.71	18.82



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อม

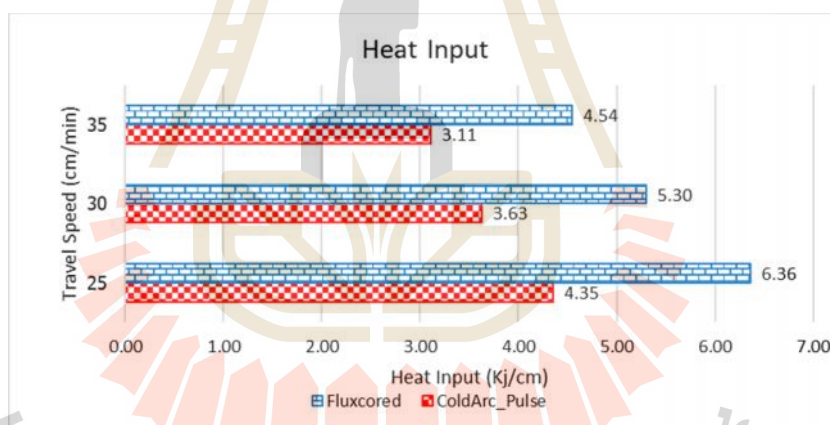
จากการพิจารณาพื้นที่ของแนวเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที พบว่า เมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้พื้นที่ A มีค่าลดลง เนื่องจากการใช้ความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้น จะทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะที่ต่ำลง แต่เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ B จะเห็นว่าความเร็วในการเชื่อมที่ 30 เซนติเมตร/นาที จะมีพื้นที่ที่มากที่สุด ส่งผลให้การหลอมลึกของแนวเชื่อมมีค่ามากเกินไป ซึ่งจะไม่เหมาะสำหรับการนำไปเชื่อมพอกผิวโลหะ โดยในการเชื่อมทดลองครั้งนี้ ต้องการให้พื้นที่ A มีค่ามากที่สุด เพื่อจะลดจำนวนรอบในการเชื่อมพอกผิวโลหะ ซึ่งจะทำให้สามารถลดเวลาในการเชื่อมพอกผิวโลหะได้ด้วย และต้องการให้พื้นที่ B มีค่าน้อยที่สุด เพื่อจะทำให้เนื้อโลหะไม่หลอมลึกมากเกินไป และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อม (พื้นที่ B/A+B) ที่โหมดการเชื่อมต่างๆ จะเห็นว่าความเร็วในการเชื่อมที่ 30 เซนติเมตร/นาที มีค่าอัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อม (พื้นที่ B/A+B) มากกว่าความเร็วในการเชื่อมที่ 25 และ 35 เซนติเมตร/นาที ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ B ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที มีพื้นที่ที่มากเกินไป โดยที่ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที จะเป็นความเร็วในการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทดลองในครั้งนี้ เพราะมีพื้นที่ A ที่มากที่สุด และให้อัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อมที่น้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.52 13.60 และ 19.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อมของโหมดการเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อมต่างๆ พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse ให้อัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อมที่น้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13.60 16.27 และ 15.26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยจากการพิจารณาค่าพื้นที่ของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse จะให้ค่าพื้นที่ A ที่ไม่เหมาะสมต่อการเชื่อมพอกผิวโลหะ เนื่องจากจากมีค่าพื้นที่ A ที่น้อยเกินไป ทำให้เสียเวลาในการเชื่อมพอกผิวโลหะ

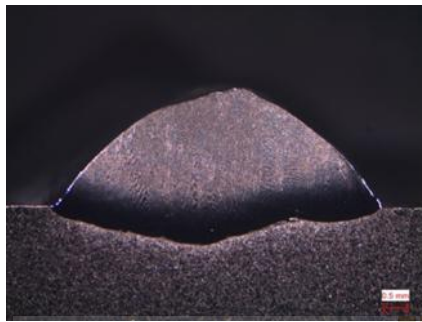
#### 4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ด้วยการเชื่อมแบบ โหมด ColdArc\_Pulse และ Fluxcored ที่ความเร็วในการเชื่อม ต่าง ๆ พบว่า ลักษณะแนวเชื่อมของความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที จะมีความกว้าง ความสูง และอัตราการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่มากกว่าความเร็วในการเชื่อม 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที ตามลำดับ (รูปที่ 4.13-4.15) เนื่องจากการใช้ความเร็วในการเชื่อมต่ำ ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานมีค่าสูงมากกว่าการใช้ความเร็วในการเชื่อมสูง (รูปที่ 4.10) การใช้ความเร็วในการเชื่อมต่ำทำให้สามารถเติมเนื้อลวดเชื่อมได้ปริมาณสูงกว่า ส่งผลให้รูปร่างแนวเชื่อมกว้าง สูง และอัตราการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่มากกว่าการใช้ความเร็วในการเชื่อมสูง โดยสามารถคำนวณค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

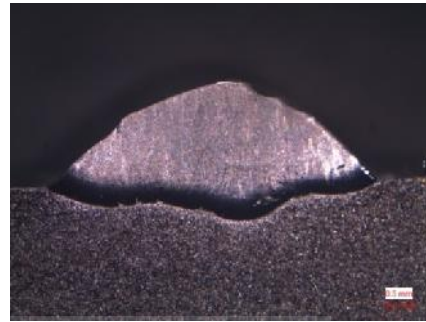
$$\text{Heat Input} = (\text{welding current} \times \text{Arc voltage} \times 60) / 1000 \times \text{welding speed (mm/min)}$$



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) ที่โหมดการเชื่อมต่างกัน



(ก)



(ข)



(ค)

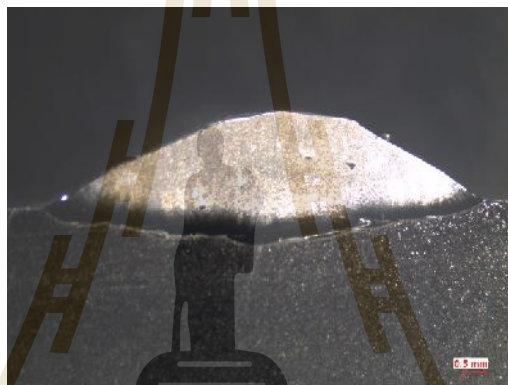
รูปที่ 4.11 ลักษณะแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse (ก) ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที (ข) ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที (ค) ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที



(ก)



(ข)

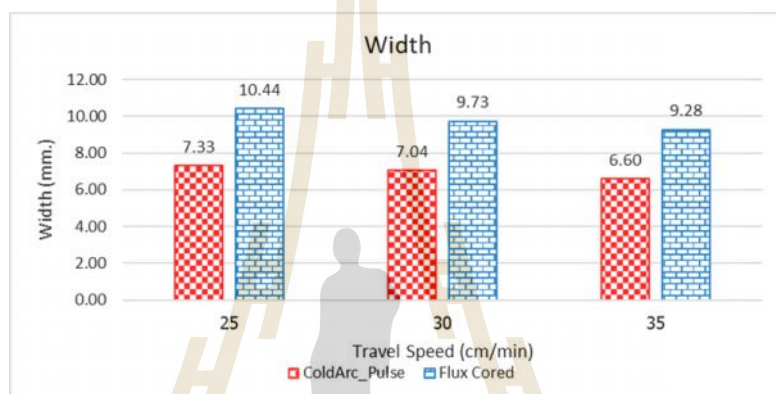


(ค)

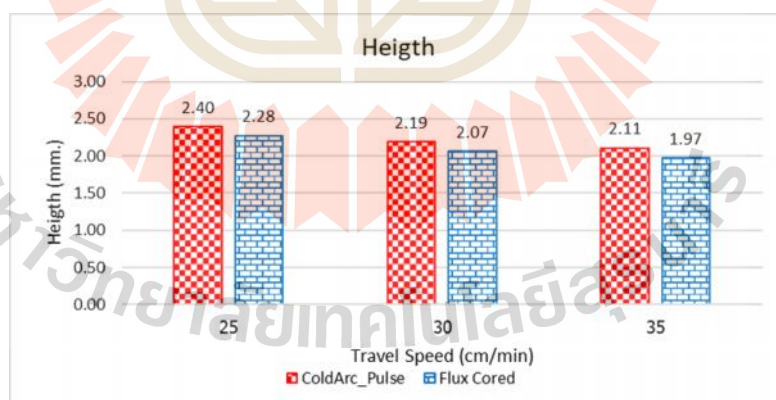
รูปที่ 4.12 ลักษณะแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมแบบ Flux cored  
 (ก) ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที (ข) ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/  
 นาที (ค) ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที

จากผลการทดลอง พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที จะให้ลักษณะแนวเชื่อมที่มีความกว้างมาก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.44 9.73 และ 9.28 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยความกว้างของแนวเชื่อมจะบ่งบอกถึงพื้นที่ที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิว กล่าวคือ ถ้ามีความกว้างของแนวเชื่อมมาก จะทำให้สามารถเชื่อมพอกผิวในปริมาณที่มาก ๆ ได้ และจะให้ลักษณะแนวเชื่อมที่มีความสูงน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.28 2.07 และ 1.97 มิลลิเมตร ตามลำดับ และจะให้ลักษณะแนวเชื่อมที่มีการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่มาก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.62 0.59 และ 0.95 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งการหลอมลึกของแนวเชื่อมจะบ่งบอกถึงพื้นที่ของแนวเชื่อมที่หลอมลงไป ในบริเวณโลหะงาน กล่าวคือ ถ้าการหลอมลึกของแนวเชื่อมมาก จะส่งผลให้พื้นที่ของแนวเชื่อมที่หลอมลงไปจะมีปริมาณมาก อาจจะทำให้เกิดการแตกร้าวในบริเวณแนวเชื่อมได้

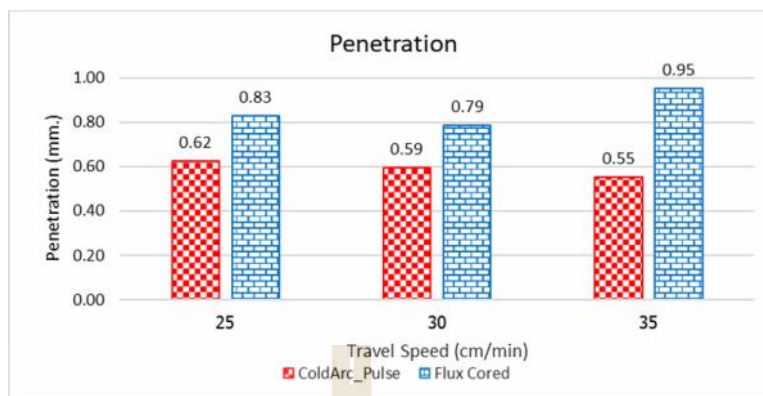
ซึ่งผลทดลองการหลอมลิกของแนวเชื่อมในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และไม่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวในแนวเชื่อม เป็นผลมาจากโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored ซึ่งจะจ่ายช่วงกระแสไฟและแรงดันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse (ตารางที่ 3.2) เนื่องจากโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_pulse เป็นโหมดที่มีการพัลส์ของกระแสสูงแล้วต่ำลง โดยจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานน้อยกว่าที่ไม่มีพัลส์ จึงทำให้โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สามารถเติมเนื้อลวดเชื่อมได้สูงกว่าโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_pulse (รูปที่ 4.13-4.15)



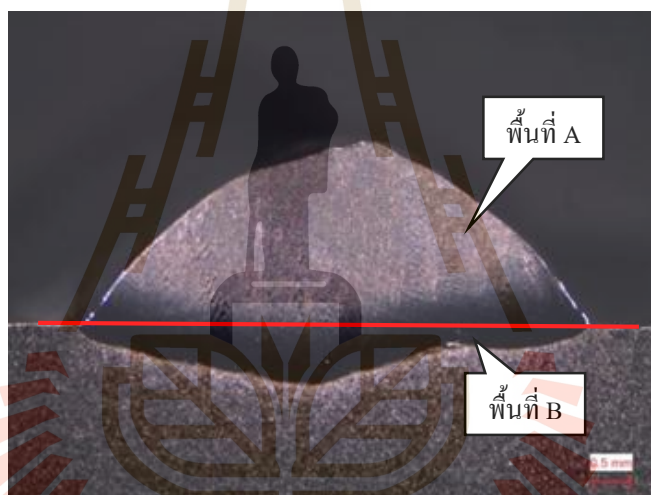
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความกว้างของแนวเชื่อมที่โหมดการเชื่อมต่างกัน



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าความสูงของแนวเชื่อมที่โหมดการเชื่อมต่างกัน



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่โหมดการเชื่อมต่างกัน

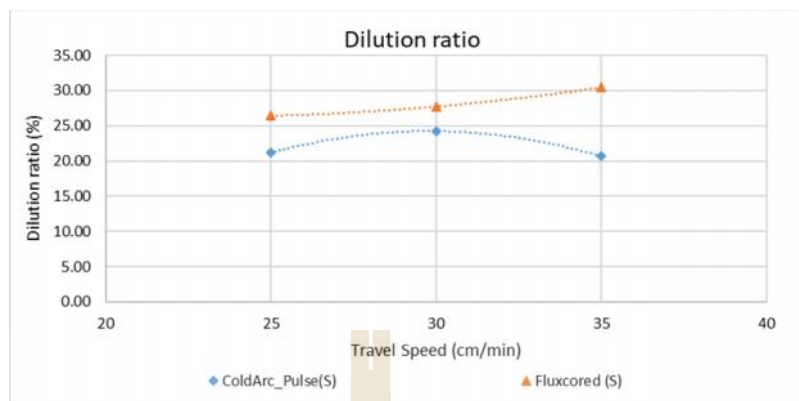


รูปที่ 4.16 ตัวอย่างโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพื้นที่ของแนวเชื่อมและอัตราส่วนการเงิองางของแนวเชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อม

Travel speed	speed 25 cm/min			speed 30 cm/min			speed 35 cm/min		
	A	B	(B/A+B)*100	A	B	(B/A+B)*100	A	B	(B/A+B)*100
ColdArc_Pulse	11.63	3.12	21.17	9.53	3.05	24.24	9.39	2.44	20.65
Fluxcored	16.23	5.82	26.41	13.72	5.26	27.73	12.17	5.33	30.45





รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อม

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้พื้นที่ A และพื้นที่ B มีค่าลดลง เนื่องจากการใช้ความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้น จะทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะที่ต่ำลง โดยในการเชื่อมทดลองครั้งนี้ ต้องการให้พื้นที่ A มีค่ามากที่สุด เพื่อจะลดจำนวนรอบในการเชื่อมพอกผิวโลหะ ซึ่งจะทำให้สามารถลดเวลาในการเชื่อมพอกผิวโลหะได้ด้วย และต้องการให้พื้นที่ B มีค่าน้อยที่สุด เพื่อจะทำให้เนื้อโลหะไม่หลอมลึกมากเกินไป และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อม (พื้นที่ B/A+B) จะเห็นว่าความเร็วในการเชื่อมที่ 30 เซนติเมตร/นาทิจจะมีค่าอัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อม (พื้นที่ B/A+B) มากกว่าความเร็วในการเชื่อมที่ 25 และ 35 เซนติเมตร/นาทิจ ยกเว้นที่ความเร็วในการเชื่อมที่ 35 เซนติเมตร/นาทิจ ของโหมดการเชื่อมแบบ Fluxcored ที่มีค่าอัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อม (พื้นที่ B/A+B) มากที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ B มีพื้นที่ที่มากเกินไป โดยที่ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาทิจ จะเป็นความเร็วในการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทดลองในครั้งนี้ เพราะมีพื้นที่ A ที่มากที่สุดและให้อัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อมที่น้อย มีค่าเท่ากับ 21.17 และ 26.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาทิจ พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse ให้อัตราส่วนการเจือจางของแนวเชื่อมที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 21.17 24.24 และ 20.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม จากการพิจารณาค่าพื้นที่ของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse จะให้ค่าพื้นที่ A ที่ไม่เหมาะสมต่อการเชื่อมพอกผิวโลหะ เนื่องจากจากมีค่าพื้นที่ A ที่น้อยเกินไป ทำให้เสียเวลาในการเชื่อมพอกผิวโลหะ

## 4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

### 4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

#### 4.2.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูล

โดยการตรวจสอบจากความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) ด้วยโปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 17 โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างมหภาคที่วัดออกมาของรอยเชื่อม

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc

ColdArc(C)					
Rank	Travel Speed	Penetration			Avg.
		1	2	3	
1	20	1.02	1.07	1.24	1.11
2	25	0.70	0.92	0.76	0.80
3	30	0.85	0.85	0.62	0.77
4	35	0.76	0.54	0.64	0.65

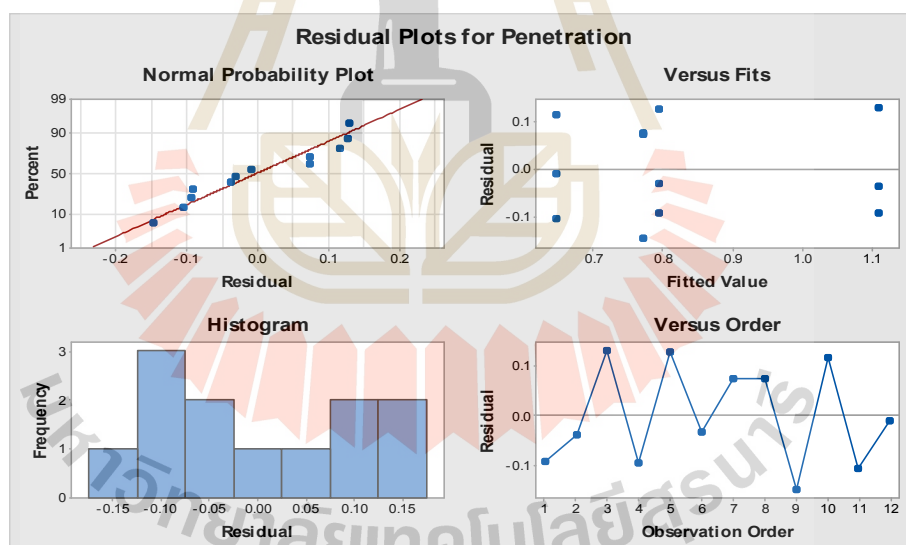
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc

ColdArc(C)					
Rank	Travel Speed	Height			Avg.
		1	2	3	
1	20	2.93	2.82	2.54	2.76
2	25	2.70	2.77	2.57	2.68
3	30	2.37	2.31	2.42	2.37
4	35	2.10	2.11	2.27	2.16

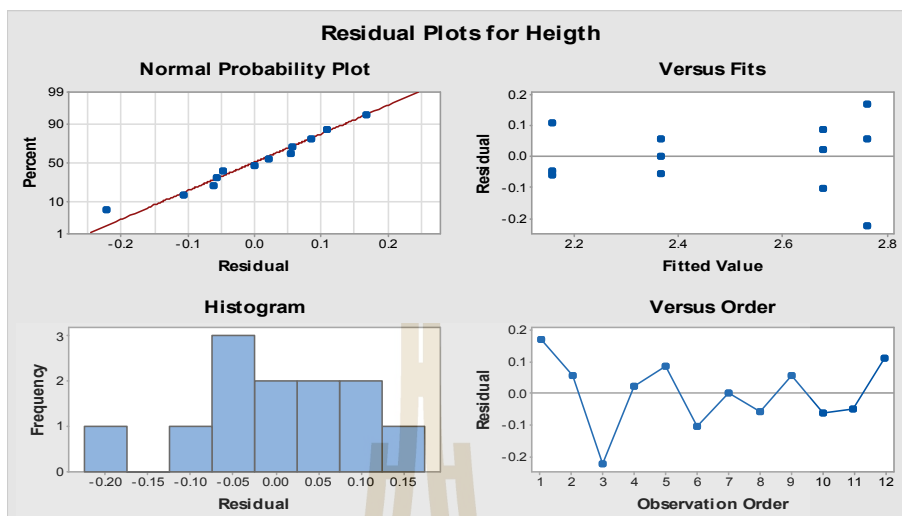
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400  
ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc

ColdArc(C)						Avg.
Rank	Travel Speed	Width				
		1	2	3		
1	20	8.85	8.46	8.91	8.74	
2	25	7.12	7.63	7.44	7.40	
3	30	6.65	6.77	7.44	6.95	
4	35	6.42	5.85	6.33	6.20	

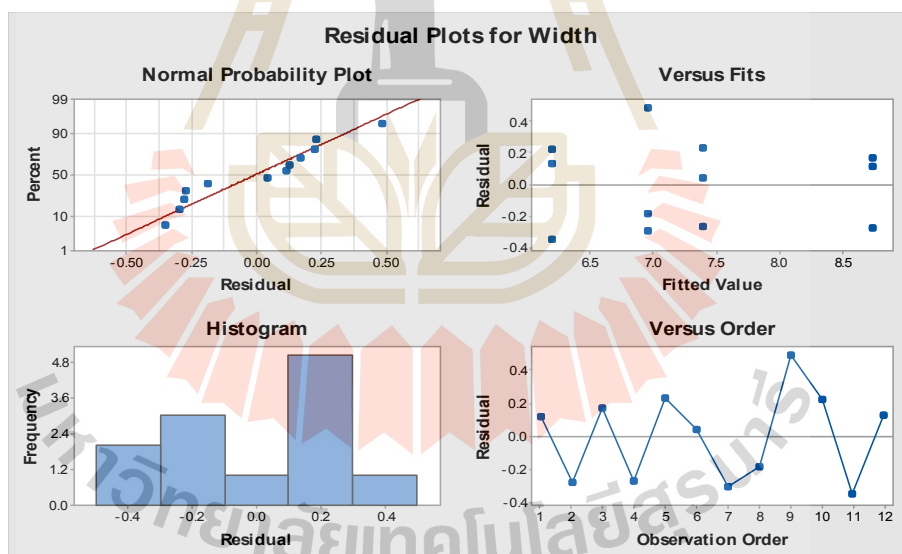
จากการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking)  
สามารถวิเคราะห์ข้อมูล แสดงในรูปที่ 4.18-4.20



รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมลึกลงของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc  
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์ข้อมูลความกว้างของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400

จากการตรวจสอบข้อมูลจากรูปที่ 4.18-4.20 ของการเชื่อมแบบ ColdArc สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 สามารถสรุปได้ดังนี้

1) พิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล เนื่องจากข้อมูลที่ได้นำมาพิจารณาของแต่ละความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม มีจำนวนน้อยกว่า 30 ข้อมูล จึงพิจารณาจากรูป Normal Probability Plot แสดงในรูปที่ 4.18-4.20 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าข้อมูล มีลักษณะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวปกติ

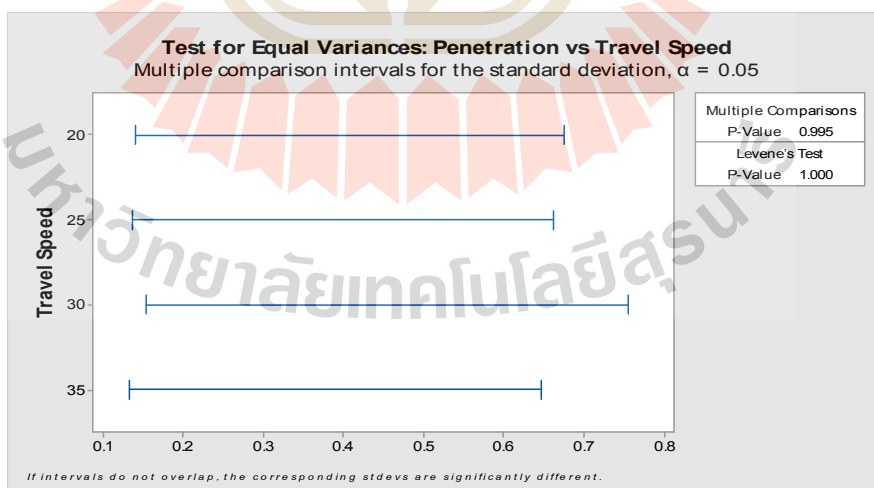
2) พิจารณาความเสถียรของ  $\sigma^2$  (Variance Stability) โดยพิจารณาจากรูป versus fits แสดงในรูปที่ 4.18-4.20 พบว่า  $\sigma^2$  มีข้อมูลที่ใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลว่ามีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสรุปว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

3) การพิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) โดยพิจารณาจากรูป versus order แสดงในรูปที่ 4.18-4.20 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารประมาณรูปแบบที่แน่นอน แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

ดังนั้น จากการวิเคราะห์ข้อมูล ทำให้ทราบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนคงที่และมีข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน จึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้

#### 4.2.1.2 การทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล

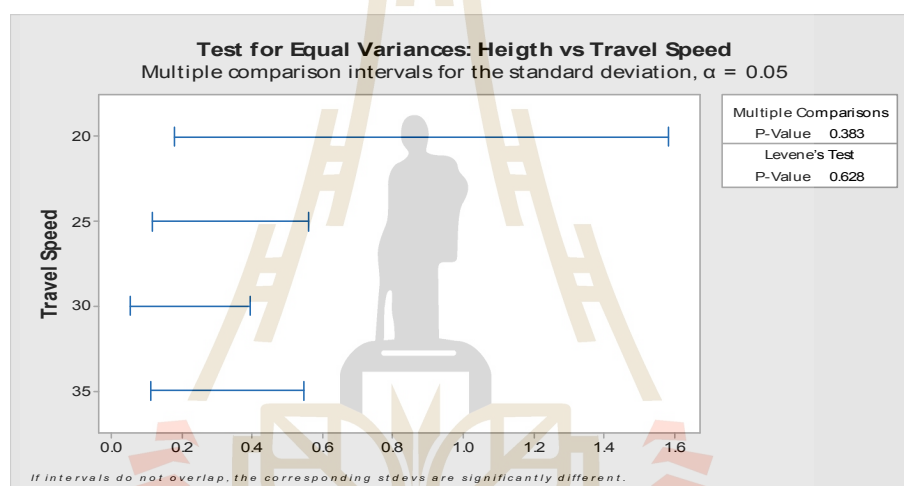
การทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล พิจารณาจากรูปกราฟของการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนการหลอมลิกของรอยเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc

พบว่า ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ 30 เซนติเมตร/นาทิจ จะให้ค่าความแปรปรวนสูงกว่าความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมอื่นๆ ซึ่งอธิบายได้ว่า ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่แตกต่างกันแต่ใช้โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 คือ ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ 30 เซนติเมตร/นาทิจ จะให้ความแตกต่างของค่าการหลอมลึกของรอยเชื่อมที่แตกต่างกันมากที่สุด หรือมีความแปรปรวนมากที่สุด ส่วนความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ 35 เซนติเมตร/นาทิจ จะให้ความแปรปรวนน้อยสุด

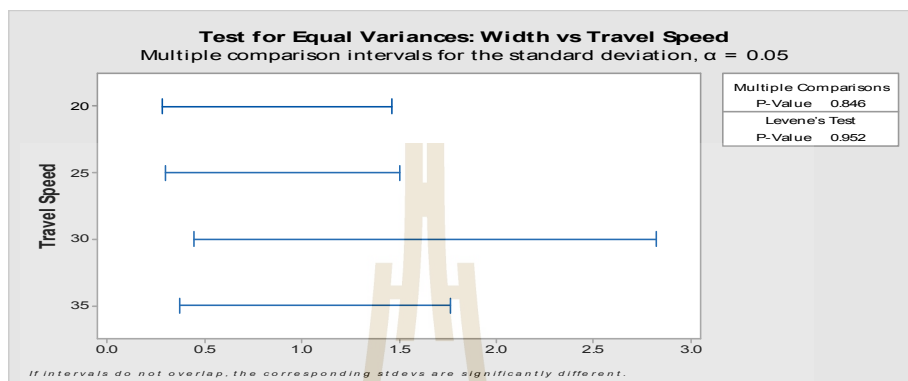
การทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล พิจารณาจากรูปกราฟของการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc

พบว่า ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ 20 เซนติเมตร/นาทิจ จะให้ค่าความแปรปรวนสูงกว่าความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมอื่น ๆ ซึ่งอธิบายได้ว่า ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่แตกต่างกันแต่ใช้โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 คือ ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ 20 เซนติเมตร/นาทิจ จะให้ความแตกต่างของค่าความสูงของรอยเชื่อมที่แตกต่างกันมากที่สุด หรือมีความแปรปรวนมากที่สุด ส่วนความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ 30 เซนติเมตร/นาทิจ จะให้ความแปรปรวนน้อยสุด

การทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล พิจารณาจากกราฟของการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc

พบว่า ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ 30 เซนติเมตร/นาที จะให้ค่าความแปรปรวนสูงกว่าความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมอื่น ๆ ซึ่งอธิบายได้ว่าความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่แตกต่างกันแต่ใช้โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 คือความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ 30 เซนติเมตร/นาที จะให้ความแตกต่างของค่าความกว้างของรอยเชื่อมที่แตกต่างกันมากที่สุด หรือมีความแปรปรวนมากที่สุด ส่วนความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ 20 เซนติเมตร/นาที จะให้ความแปรปรวนน้อยสุด

สรุปผลจากการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของข้อมูล (Levene's Test) ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมทั้งหมด 4 ระดับ คือ 20 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที โดยวิเคราะห์ข้อมูล Test for Equal variances พบว่า หากมีค่าความแปรปรวนสูง แสดงให้เห็นว่าข้อมูลนั้นไม่มีความน่าเชื่อถือ แต่หากมีค่าความแปรปรวนน้อย ข้อมูลนั้นก็ถือว่าเชื่อถือได้ โดยการทดลอง ค่าความแปรปรวนส่วนใหญ่มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ข้อมูลจากการทดลองนี้มีความน่าเชื่อถือได้ นอกจากนี้ ยังได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse และ Flux Cored ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และ โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc และ Flux Cored ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 โดยให้ผลเหมือนกันทั้งหมด ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติทั้งหมดจะแสดงในส่วนของภาคผนวก ก

### 4.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Investigation)

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 โดยใช้ กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (Polarized Light Microscope) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ทุกโหมดการเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะงาน (Base Metal)


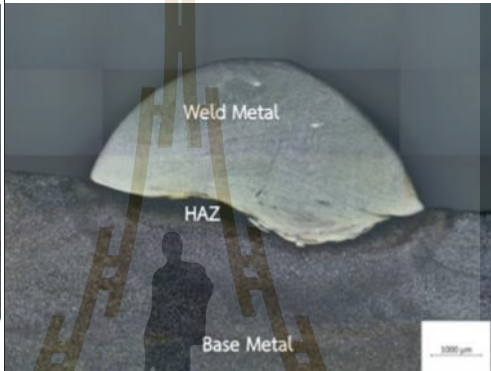
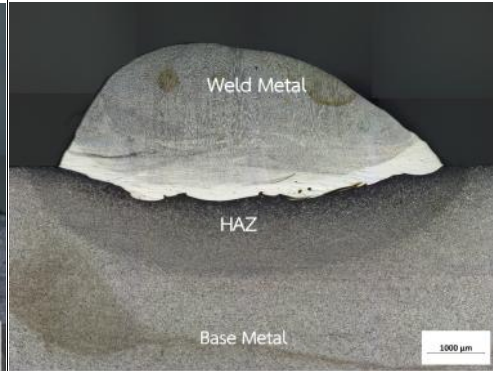
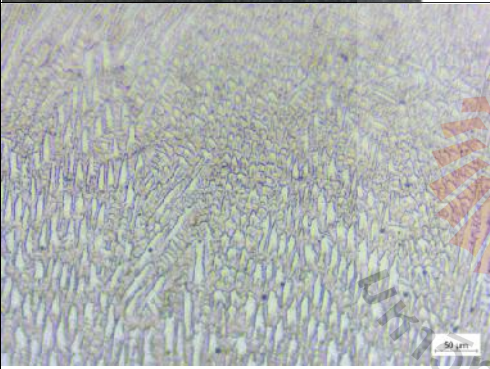

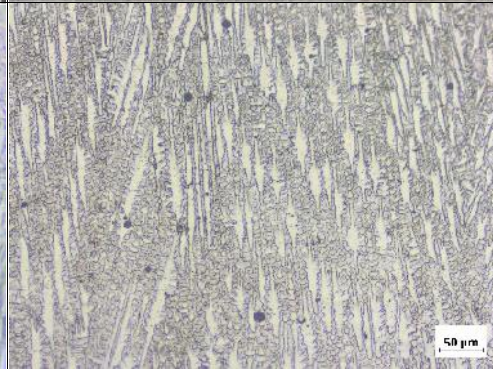
#### 4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400

การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (Polarized Light Microscope) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ทุกโหมดการเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม

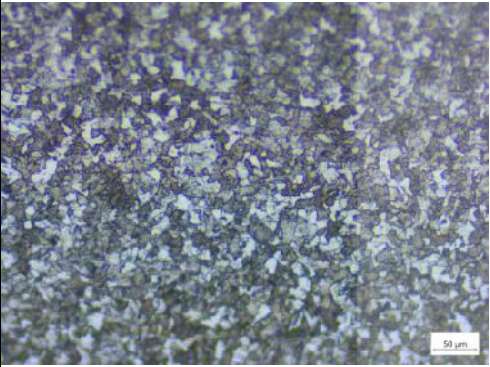
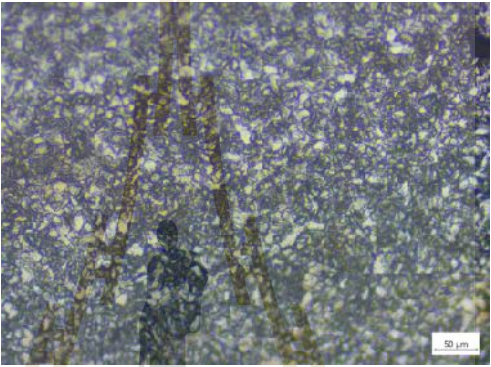
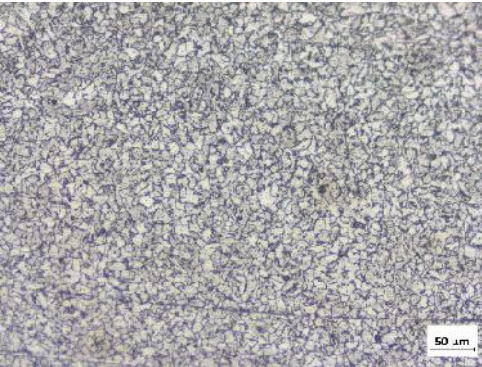
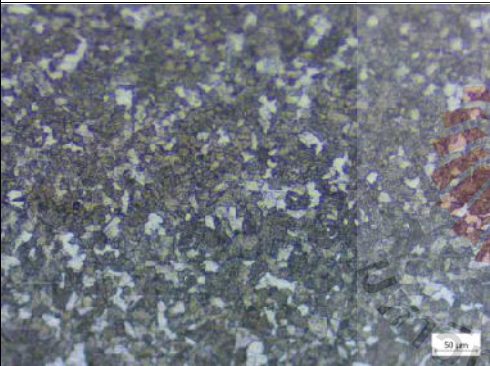
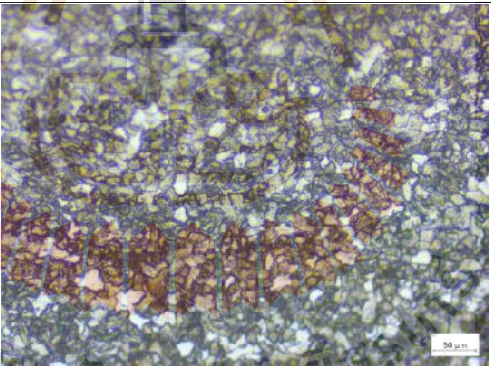
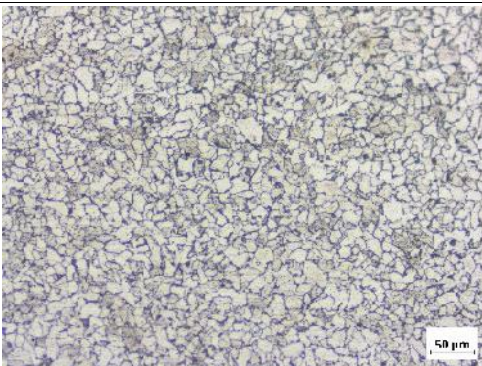




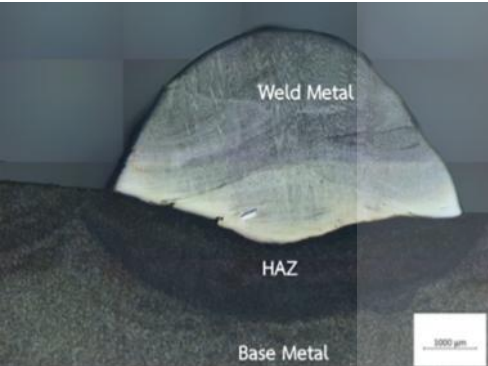
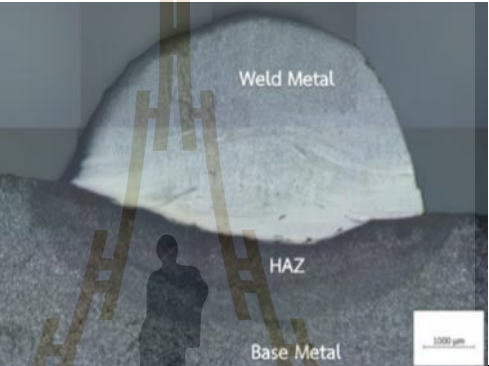

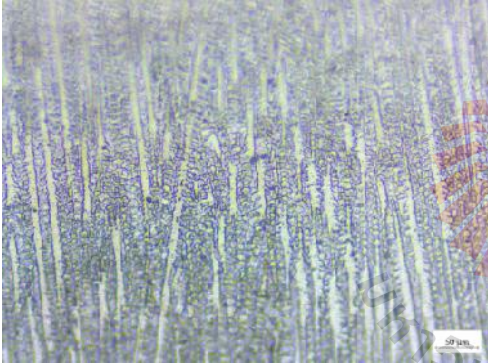

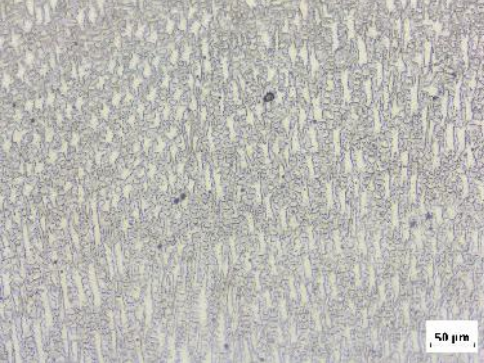
ตารางที่ 4.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมคการเชื่อมแบบ ColdArc

	ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที
ลักษณะแนวเชื่อม			
Weld Metal			

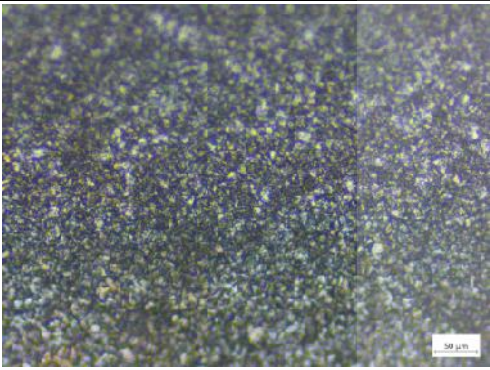
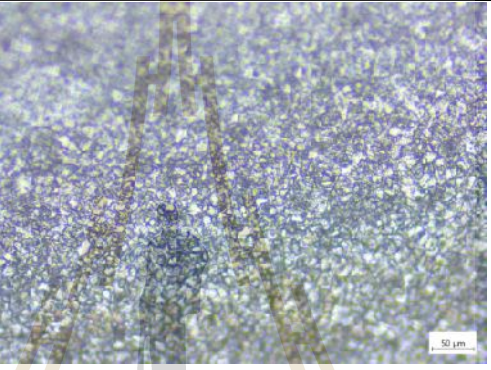

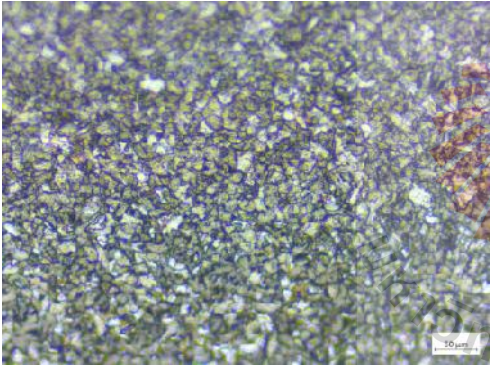
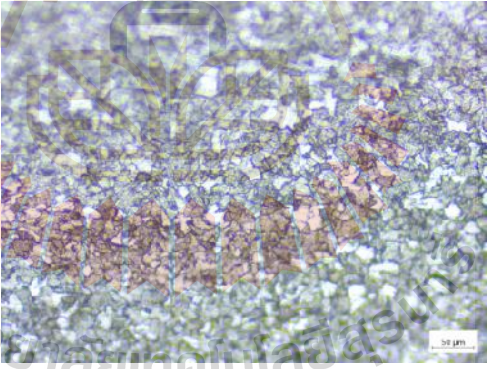

ตารางที่ 4.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc (ต่อ)

	ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที
HAZ	 Micrograph showing the Heat Affected Zone (HAZ) at a welding speed of 25 cm/min. The structure consists of fine, dark, acicular martensite. A 50 μm scale bar is present in the bottom right corner.	 Micrograph showing the HAZ at a welding speed of 30 cm/min. The structure is similar to the 25 cm/min case but shows some elongated features. A 50 μm scale bar is present in the bottom right corner.	 Micrograph showing the HAZ at a welding speed of 35 cm/min. The structure is very fine and uniform. A 50 μm scale bar is present in the bottom right corner.
Base Metal	 Micrograph showing the base metal structure at a welding speed of 25 cm/min. It features a coarse, dark, acicular martensite structure. A 50 μm scale bar is present in the bottom right corner.	 Micrograph showing the base metal structure at a welding speed of 30 cm/min. The structure is similar to the 25 cm/min case but shows some elongated features. A 50 μm scale bar is present in the bottom right corner.	 Micrograph showing the base metal structure at a welding speed of 35 cm/min. The structure is very fine and uniform. A 50 μm scale bar is present in the bottom right corner.

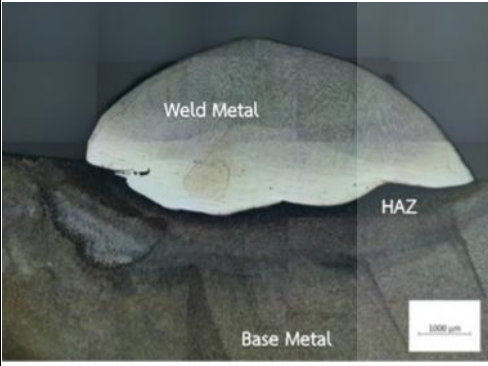
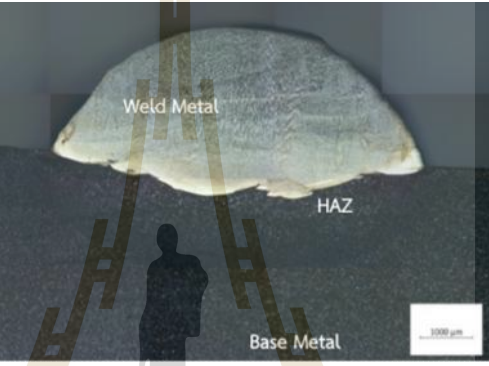
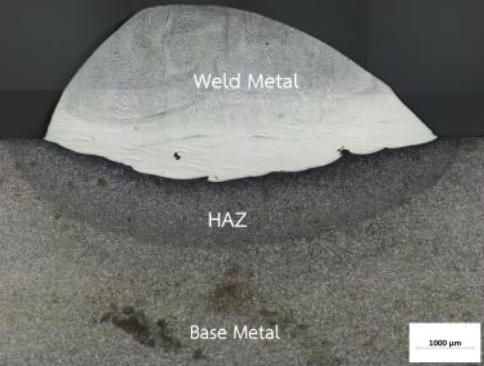
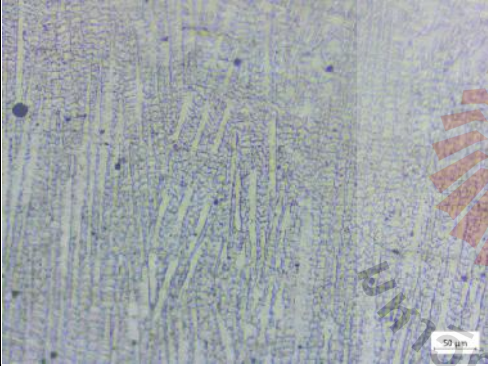
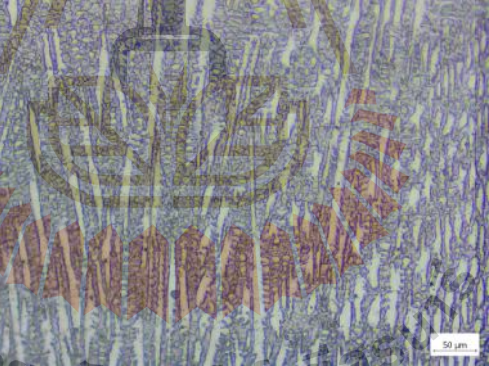
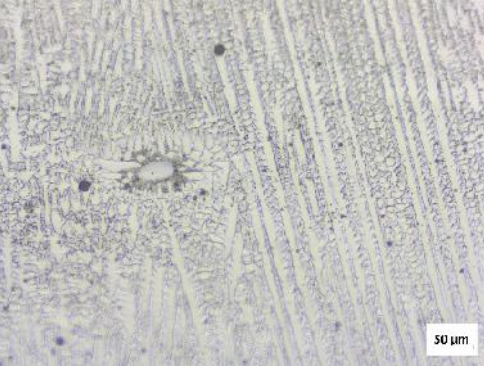
ตารางที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

	ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที
ลักษณะแนวเชื่อม			
Weld Metal			

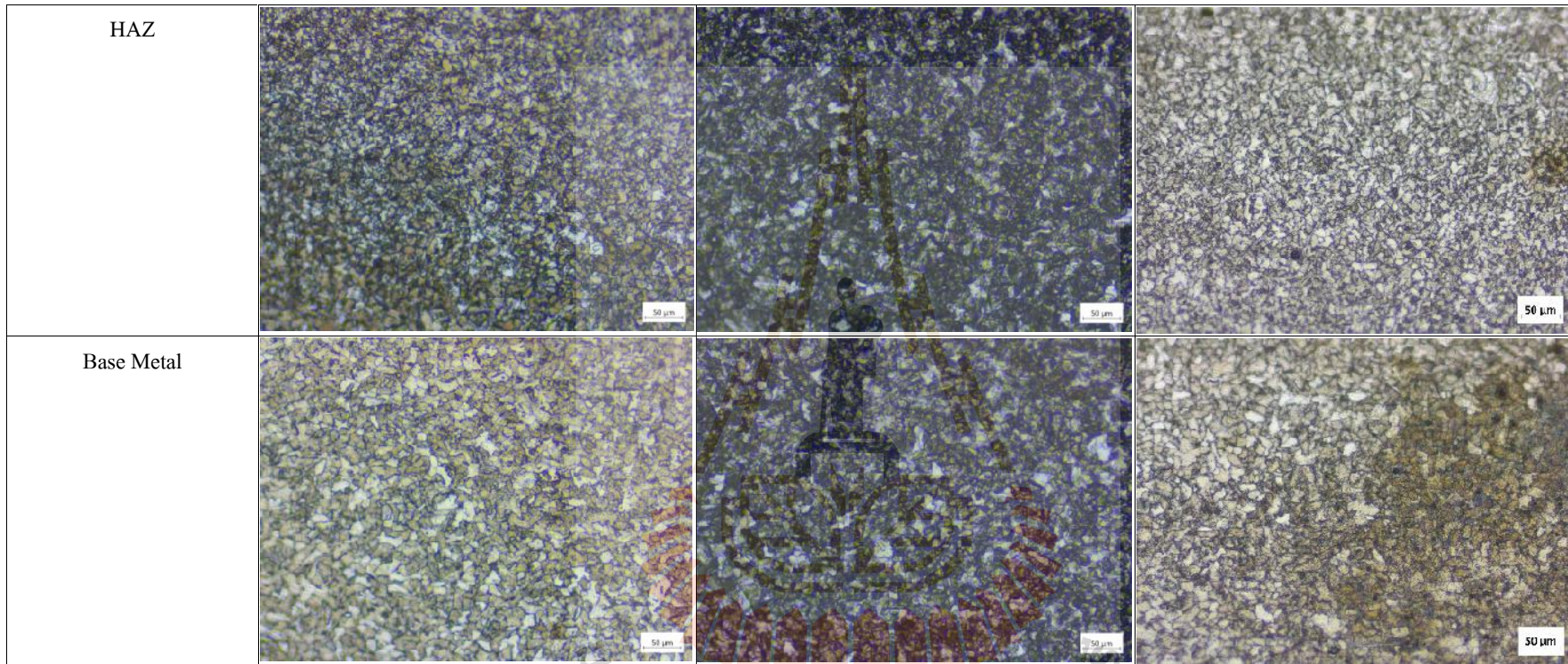
ตารางที่ 4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse (ต่อ)

	ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที
HAZ			
Base Metal			

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored

	ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที
ลักษณะแนวเชื่อม			
Weld Metal			

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored (ต่อ)



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

#### 4.3.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400

ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ด้วยการเชื่อมแบบ โหมด ColdArc ColdArc\_Pulse และ Fluxcored พบว่า เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อมต่าง ๆ จะมีโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite Structure) ที่มีเกรนเป็นแท่งยาว (Columnar Grains) และละเอียด ซึ่งลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้น จะมีการขยายตัวแตกแยกกิ่งก้านออกไปคล้ายกิ่งไม้ โดยที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที จะมีขนาดของเกรนที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากความเร็วที่ใช้เชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อมมีช่วงความเร็วที่ไม่ห่างกันนัก

เมื่อนำโครงสร้างจุลภาคมาเปรียบเทียบที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที ในทุกโหมดการเชื่อม พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite Structure) ที่เกิดขึ้น คือมีเกรนเป็นแท่งยาว (Columnar Grains) ละเอียด และมีเกรนขนาดเล็กใกล้เคียงกันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc และโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored เล็กน้อย เนื่องจากมีค่าความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) น้อยที่สุด (ตารางที่ 4.2) ทำให้มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าโหมดการเชื่อมแบบอื่น ๆ

#### 4.3.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400

ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ด้วยการเชื่อมแบบ โหมด ColdArc ColdArc\_Pulse และ Fluxcored ที่ความเร็วในการเชื่อมต่าง ๆ พบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นเม็ดเกรนกลมเล็กเรียงตัวกัน และมีเม็ดเกรนที่ละเอียดใกล้เคียงกัน เนื่องจากความเร็วที่ใช้เชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อม มีช่วงความเร็วที่ไม่ห่างกันนัก

เมื่อนำโครงสร้างจุลภาคมาเปรียบเทียบที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที ในทุกโหมดการเชื่อม พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีลักษณะโครงสร้างเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ขนาดของเม็ดเกรนมีความละเอียด และมีเกรนขนาดเล็กใกล้เคียงกันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc และโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored เล็กน้อย เนื่องจากมีค่าความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) น้อยที่สุด

(ตารางที่ 4.2) ทำให้มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าโหมดการเชื่อมแบบอื่น ๆ ส่งผลให้เกรนมีระยะเวลาในการขยายตัวน้อย เกรนจึงมีขนาดเล็ก

#### 4.3.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะ (Base Metal) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400

ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณเนื้อโลหะงาน (Base Metal) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ด้วยการเชื่อมแบบโหมด ColdArc ColdArc\_Pulse และ Fluxcored ที่ความเร็วในการเชื่อมต่าง ๆ พบว่า โครงสร้างที่ปรากฏประกอบด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลท์ (Pearlite) เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.13 - 0.18% ซึ่งมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.8% จึงเป็นเหล็กกล้าประเภทเหล็กกล้าไฮโปยูเทกตอยด์ (Hypo-Eutectoid) (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2560) โดยบริเวณเนื้อโลหะงาน (Base Metal) ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

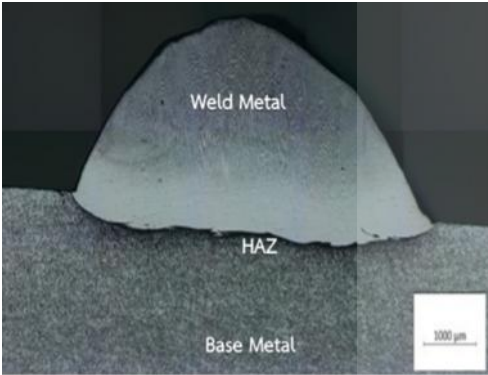
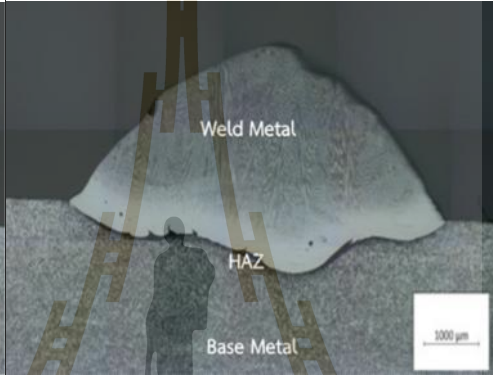

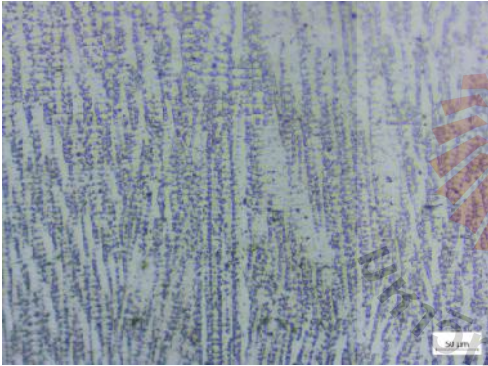

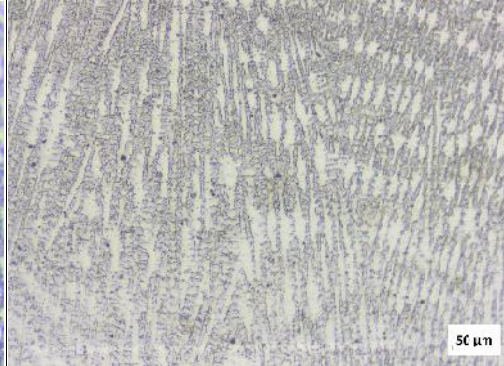
#### 4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (Polarized Light Microscope) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ทุกโหมดการเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม

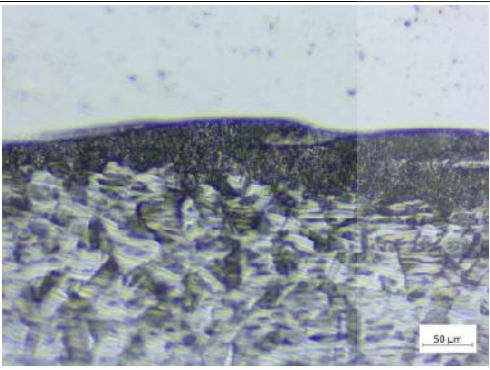
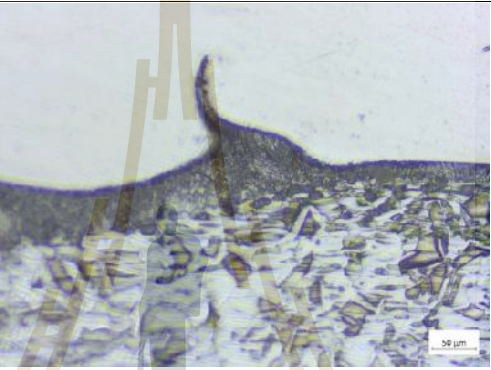
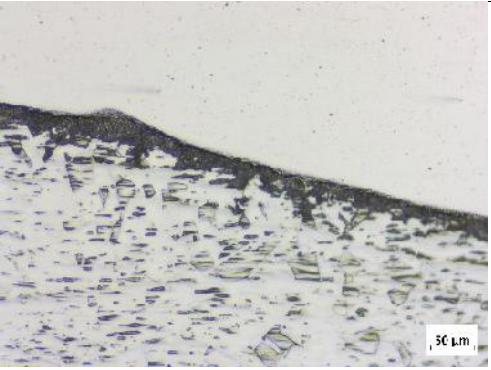
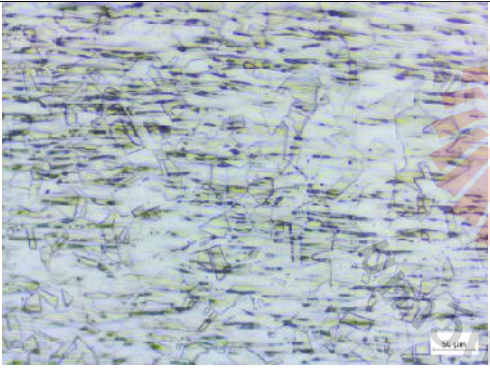
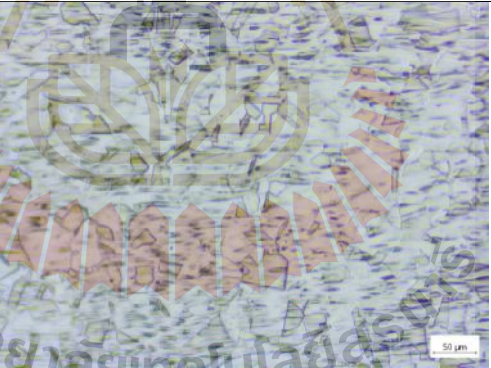
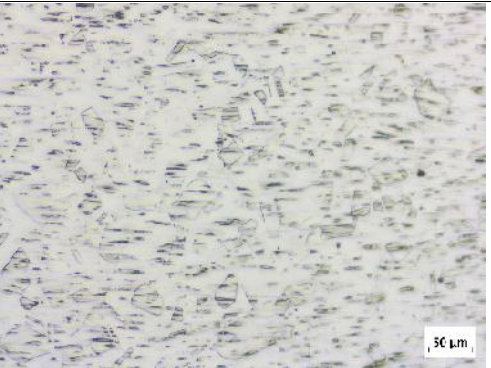




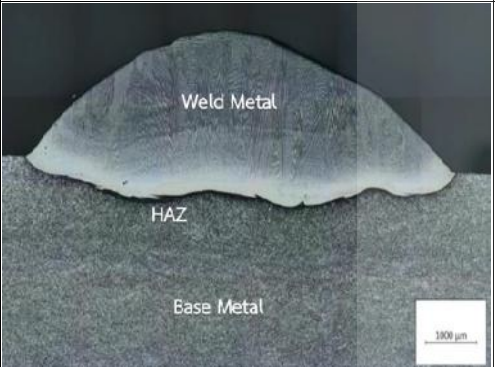
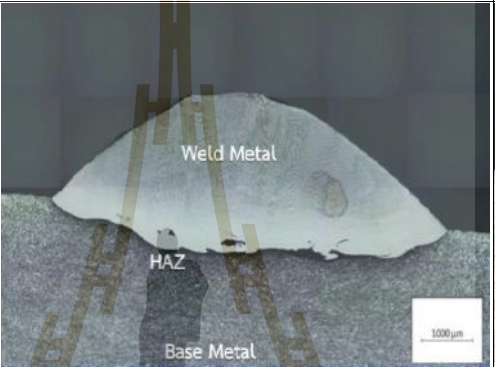
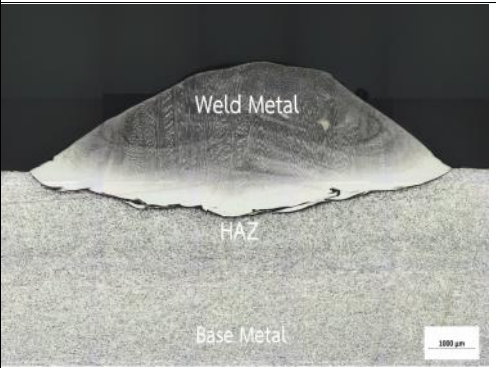
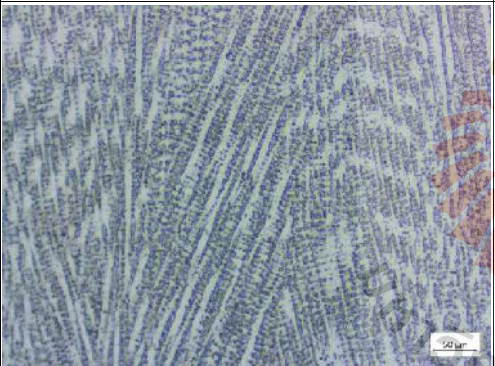

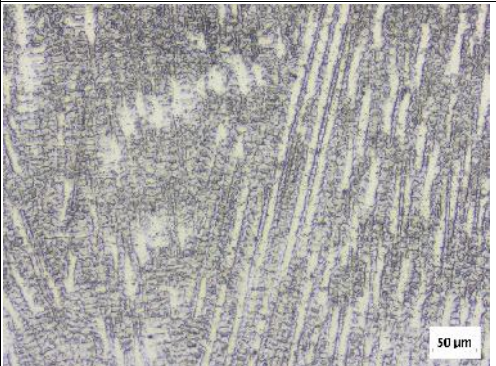
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

	ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที
ลักษณะแนวเชื่อม			
Weld Metal			

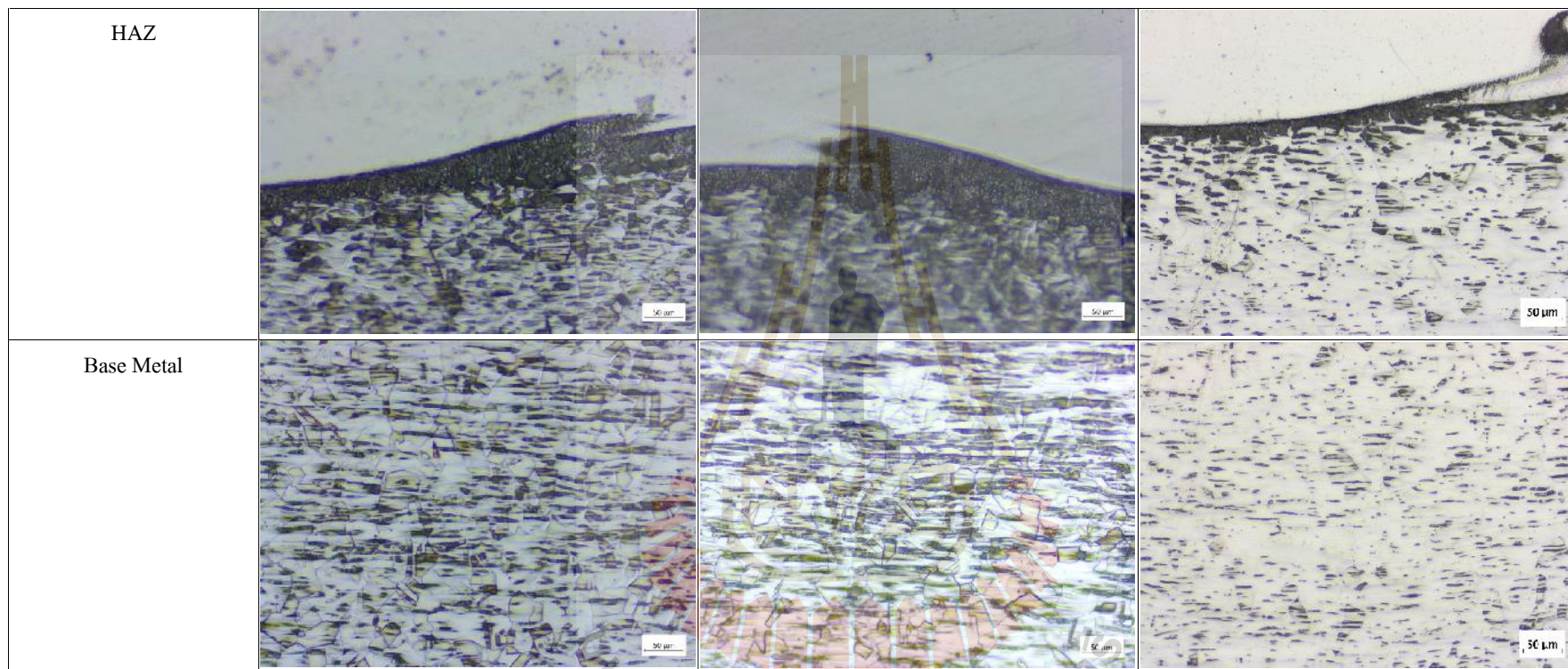
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse (ต่อ)

	ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที
HAZ			
Base Metal			

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored

	ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที	ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที
ลักษณะแนวเชื่อม			
Weld Metal			

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored (ต่อ)



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

#### 4.3.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse และ Fluxcored พบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อมต่าง ๆ จะมีโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite Structure) ที่มีเกรนเป็นแท่งยาว (Columnar Grains) และมีขนาดของเกรนที่ละเอียดใกล้เคียงกัน เนื่องจากความเร็วที่ใช้เชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อมมีช่วงความเร็วที่ไม่ห่างกันนัก

ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite Structure) ที่เกิดขึ้น คือมีเกรนเป็นแท่งยาว (Columnar Grains) ละเอียด และมีเกรนขนาดที่เล็กใกล้เคียงกันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored เล็กน้อย เนื่องจากมีค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) น้อยที่สุด (ตารางที่ 4.2) เกิดจากการยื่นตัวอย่างรวดเร็ว

#### 4.3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ด้วยการเชื่อมแบบโหมด ColdArc\_Pulse และ Fluxcored พบว่า โครงสร้างที่ปรากฏ คือ โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) ลักษณะเกรนมีขนาดเล็กและละเอียด เนื่องจากได้รับผลกระทบความร้อนจากการเชื่อม โดยที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที ขนาดของเกรนจะมีความละเอียดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากความเร็วที่ใช้เชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อมมีช่วงความเร็วที่ไม่ห่างกันนัก

ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีลักษณะเกรนที่ละเอียด และมีเกรนขนาดที่เล็กใกล้เคียงกันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored เล็กน้อย เนื่องจากมีค่าความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) น้อยที่สุด (ตารางที่ 4.2) ทำให้มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าโหมดการเชื่อมแบบอื่น ๆ ส่งผลให้เกรนมีระยะเวลาในการขยายตัวน้อย เกรนจึงมีขนาดเล็ก

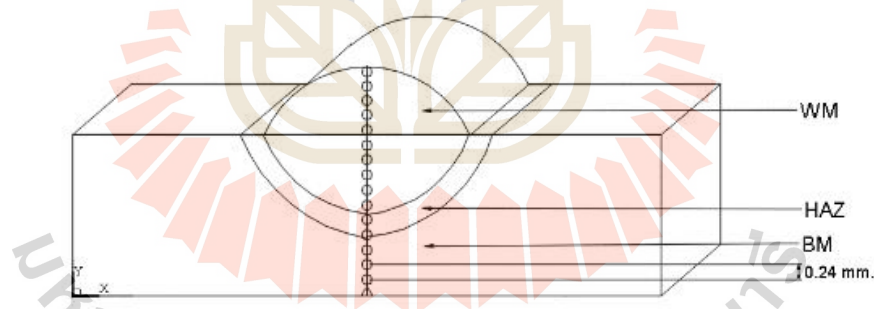
#### 4.3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะงาน (Base Metal) ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณเนื้อโลหะงาน (Base Metal) ของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เกรด 316 ด้วยการเชื่อมแบบโหมด ColdArc\_Pulse และ

Fluxcored พบว่า โครงสร้างที่ปรากฏ คือ โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งจัดอยู่ในเหล็กกล้าประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade) (P. Marshall, 1984) ซึ่งบริเวณเนื้อโลหะงาน (Base Metal) ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

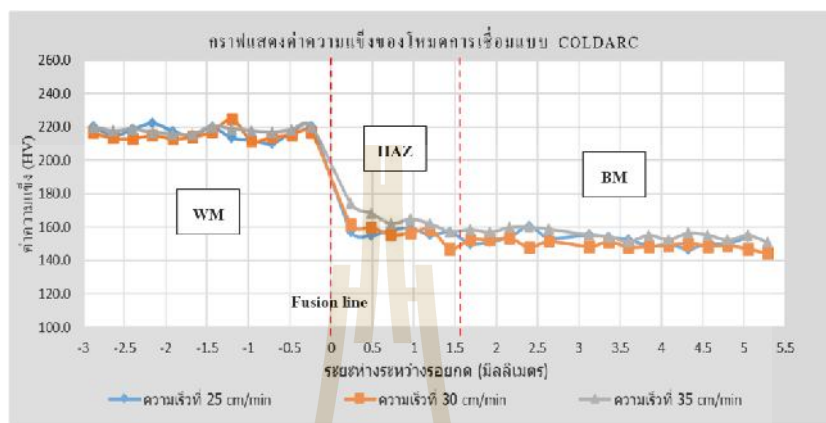
#### 4.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

การทดสอบความแข็งใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์โดยกดที่บริเวณแนวตั้งของรอยเชื่อมและชิ้นงาน เมื่อบริเวณเนื้อโลหะงาน (BM) ได้รับอิทธิพลจากค่าความร้อน (HAZ) ทำให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิม และเพิ่มค่าความแข็งสูงสุดอยู่ตรงบริเวณแนวเชื่อม (WM) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีส่วนผสมของนิกเกิล 57.1 % โครเมียม 16.1 % โมลิบดีนัม 16.1 % และอื่น ๆ อีก 10.7 % (ตารางที่ 3.1) ซึ่งมีความแข็งสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 (BW) โดยจะพิจารณาโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc ColdArc\_Pulse และ Flux Cored วิเคราะห์ที่ต่อว่าความเร็วในการเชื่อมมีการส่งผลต่อค่าความแข็งหรือไม่ ซึ่งจะมีความเร็วในการเชื่อมที่ต่างกัน คือ ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที่

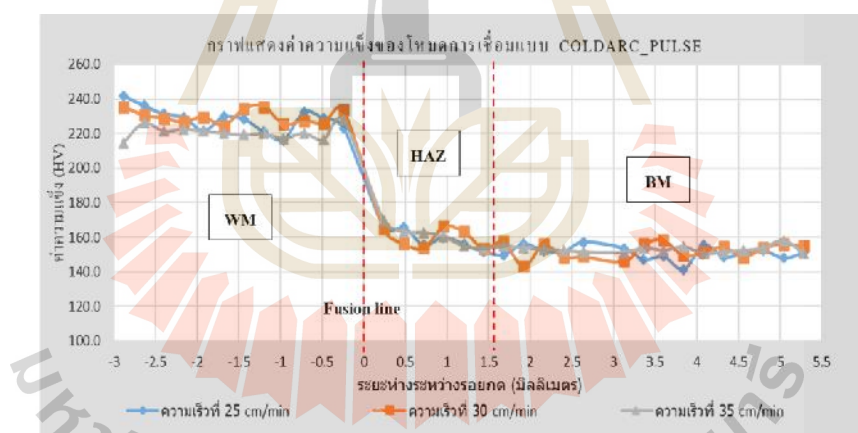


รูปที่ 4.24 ระยะการทดสอบความแข็งในแนวตั้ง (Vertical)

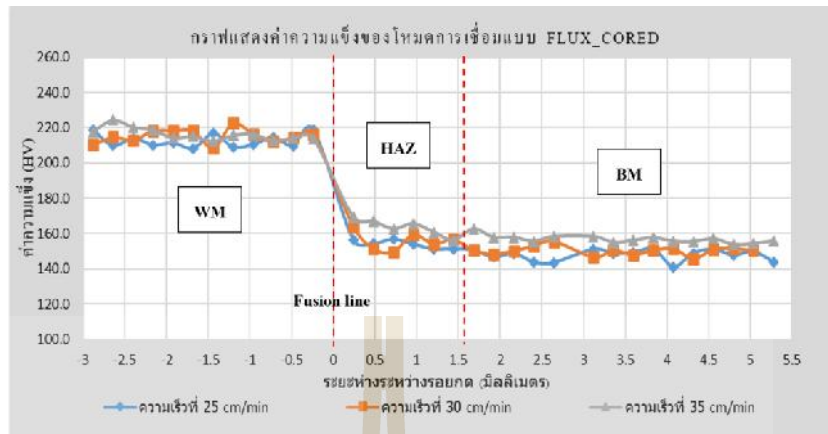
#### 4.4.1 ผลของการเปรียบเทียบโหมดการเชื่อมกับค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc

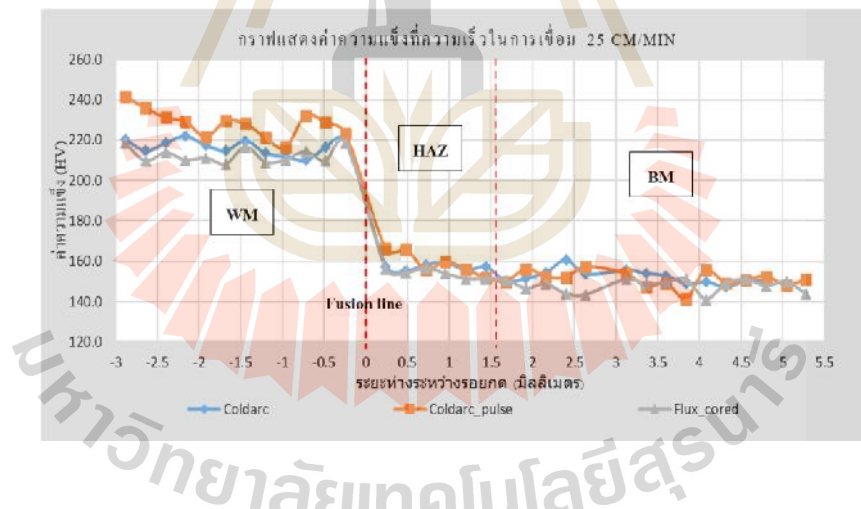


รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse



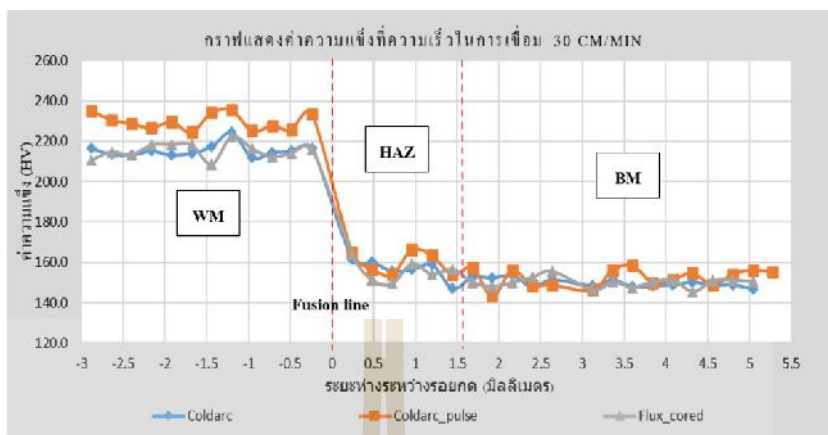
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored

#### 4.4.2 ผลของเปรียบเทียบความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมกับค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400

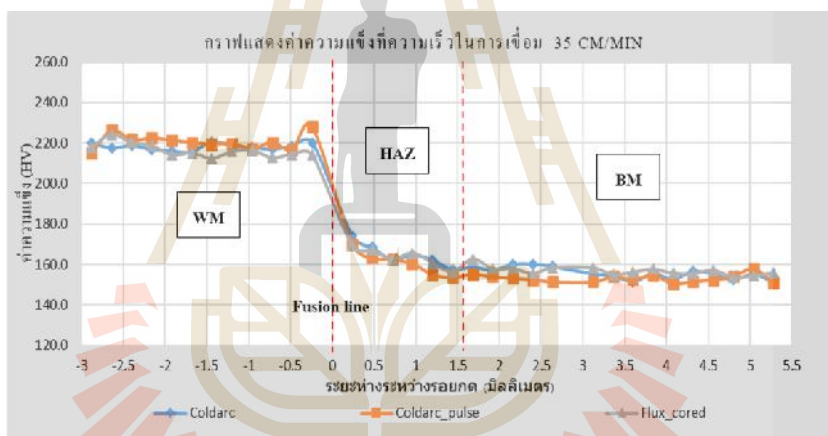


รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที





รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที

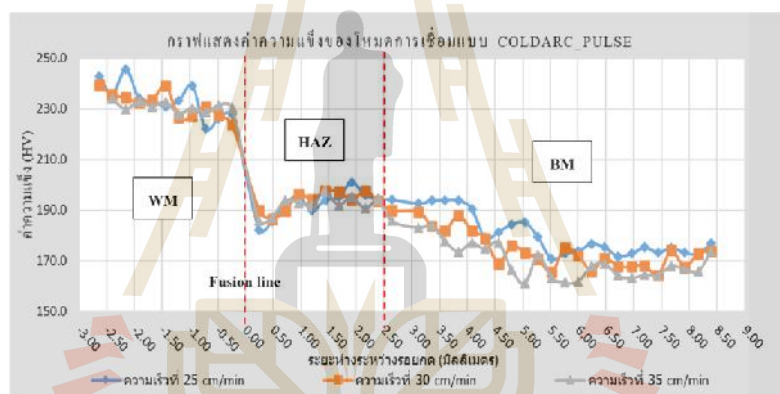


รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที

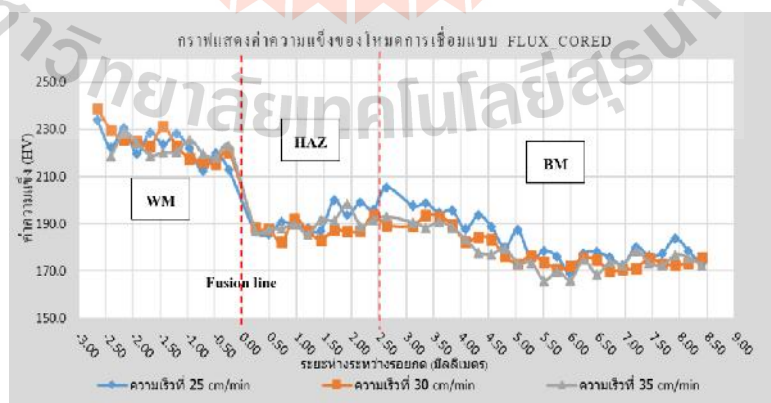
จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที ค่าความแข็งมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากความเร็วที่ใช้เชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อมมีช่วงความเร็วที่ไม่ห่างกันนัก และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc ColdArc\_Pulse และ Flux Cored จะพบว่า บริเวณแนวเชื่อม (WM) ของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีค่าความแข็งที่มากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc และ Flux Cored อยู่ประมาณ 10-20 HV เป็นผลมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่า ทำให้นขนาดของโครงสร้างมีความละเอียดกว่า ซึ่งจากการพิจารณาลักษณะแนวเชื่อมของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse จะให้ลักษณะรอยเชื่อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเชื่อมพอกผิว เนื่องจากมีความ

กว้างของแนวเชื่อมน้อยเกินไป และมีความสูงของแนวเชื่อมที่มากเกินไปด้วย โดยค่าความแข็งในบริเวณเนื้อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 (BM) มีค่าความแข็งความสม่ำเสมออยู่ที่ระยะ 1.68 มิลลิเมตรถึง 5.28 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 141.0 - 160.6 HV จนถึงบริเวณที่เนื้อเชื่อมได้รับอิทธิพลจากค่าความร้อน (HAZ) ทำให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างสม่ำเสมออยู่ในช่วงระยะ 0.24 มิลลิเมตรถึง 1.44 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 147.0 - 174.1 HV และค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อม (WM) มีค่าความแข็งความสม่ำเสมออยู่ที่ระยะ -0.24 มิลลิเมตรถึง -2.88 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 210.1 - 241.7 HV ซึ่งค่าความแข็งสูงสุดอยู่ตรงบริเวณแนวเชื่อม (WM) ที่ระยะ -2.88 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 241.7 HV

#### 4.4.3 ผลของการเปรียบเทียบโหมดการเชื่อมกับค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

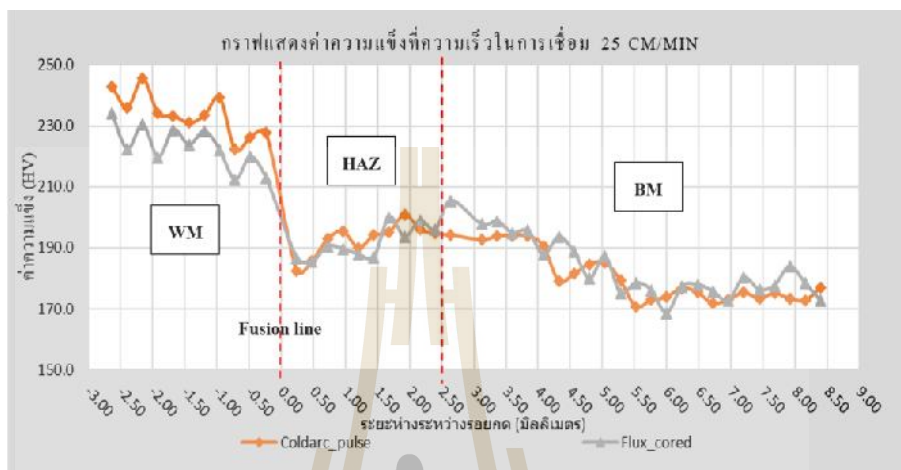


รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

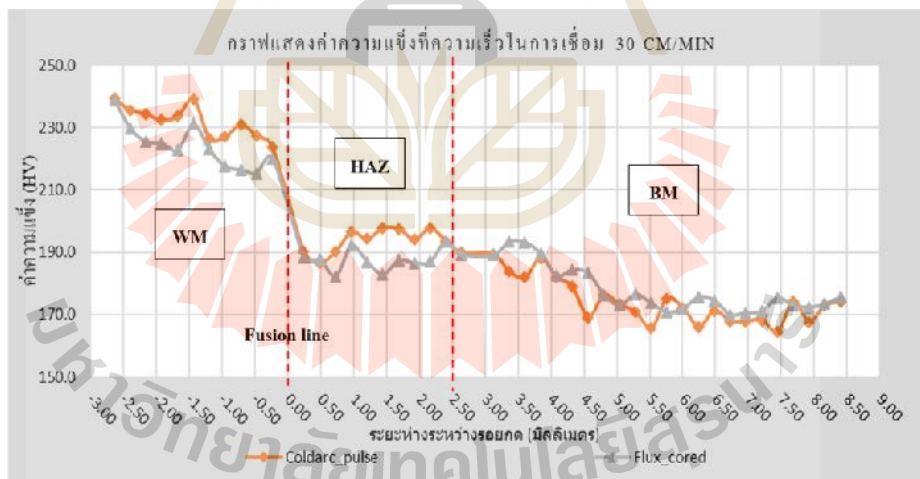


รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored

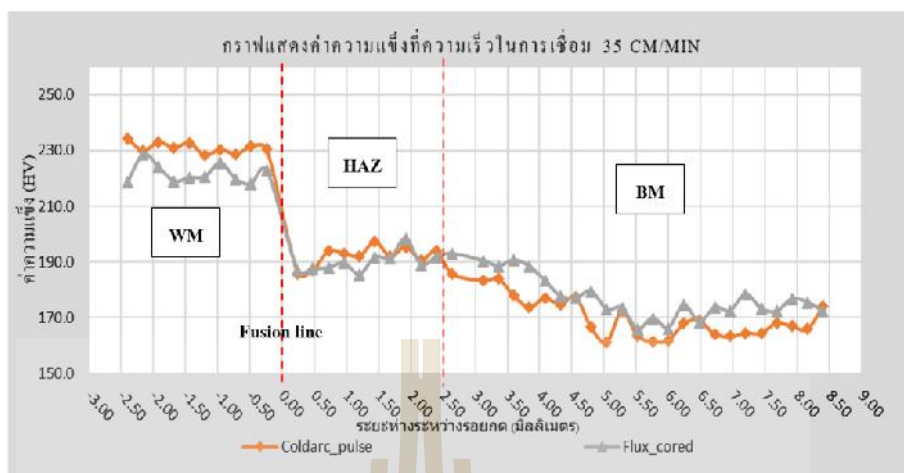
#### 4.4.4 ผลของเปรียบเทียบความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมกับค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316



รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที



รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 30 เซนติเมตร/นาที



รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ความเร็วในการเชื่อม 35 เซนติเมตร/นาที

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse และ Flux Cored จะพบว่า บริเวณแนวเชื่อม (WM) ของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีค่าความแข็งที่มากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored อยู่ประมาณ 10-20 HV เป็นผลมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่า ทำให้ขนาดของโครงสร้างมีความละเอียดกว่าโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาลักษณะแนวเชื่อมของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse จะให้ลักษณะรอยเชื่อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเชื่อมพอกผิว เนื่องจากมีความกว้างของแนวเชื่อมน้อยเกินไป และมีความสูงของแนวเชื่อมที่มากเกินไป และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที พบว่า ค่าความแข็งมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากความเร็วที่ใช้เชื่อมในแต่ละโหมดการเชื่อมมีช่วงความเร็วที่ไม่ห่างกันนัก โดยค่าความแข็งบริเวณเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 (BM) มีค่าความแข็งความสม่ำเสมออยู่ที่ระยะ 2.40 มิลลิเมตรถึง 8.40 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 161.2– 205.5 HV จนถึงบริเวณที่เนื้อเชื่อมได้รับอิทธิพลจากค่าความร้อน (HAZ) ทำให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างสม่ำเสมอในช่วงระยะ 0.24 มิลลิเมตรถึง 2.40 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 182.4 – 201.0 HV และค่าความแข็งบริเวณแนวเชื่อม (WM) มีค่าความแข็งความสม่ำเสมออยู่ที่ระยะ -0.24 มิลลิเมตรถึง -2.64 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 212.3 – 245.6 HV ซึ่งค่าความแข็งสูงสุดอยู่ตรงบริเวณแนวเชื่อม (WM) ที่ระยะ -2.16 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 245.6 HV

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 โครงสร้างมหภาค

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macro Structure) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที จะให้ลักษณะแนวเชื่อมที่มีความกว้างมาก ความสูงน้อย และการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่มาก เนื่องจากโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored จะจ่ายช่วงกระแสไฟ และแรงดันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc และโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse ตามลำดับ นอกจากนี้ ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 เซนติเมตร/นาที ยังเป็นความเร็วในการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทดลองในครั้งนี้ เพราะมีพื้นที่บริเวณแนวเชื่อมมากที่สุด และให้อัตราส่วนการเงาของแนวเชื่อมน้อย

##### 5.1.2 โครงสร้างจุลภาค

###### 1) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400

โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite Structure) ที่เกิดขึ้น คือมีเกรนเป็นแท่งยาว (Columnar Grains) ละเอียด และมีเกรนขนาดเล็กใกล้เคียงกันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc และโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored เล็กน้อย เนื่องจากมีค่าความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) น้อยที่สุด ทำให้มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc และ Flux Cored

โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีลักษณะโครงสร้างเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลท์ (Perlite) ขนาดของเม็ดเกรนมีความละเอียด และมีเกรนขนาดเล็กใกล้เคียงกันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc และโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored เล็กน้อย เนื่องจากมีค่าความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) น้อยที่สุด

ทำให้มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc และ Flux Cored ส่งผลให้เกรนมีระยะเวลาในการขยายตัวน้อย เกรนจึงมีขนาดเล็ก

โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณเนื้อโลหะงาน (Base Metal) ด้วยการเชื่อมแบบโหมด ColdArc ColdArc\_Pulse และ Fluxcored ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที พบว่า โครงสร้างที่ปรากฏประกอบด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลท์ (Pearlite) ซึ่งบริเวณเนื้อโลหะงาน (Base Metal)

## 2) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่ความเร็วในการเชื่อมต่าง ๆ พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite Structure) ที่เกิดขึ้น คือมีเกรนเป็นแท่งยาว (Columnar Grains) ละเอียด และมีเกรนขนาดเล็กใกล้เคียงกันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored เล็กน้อย เนื่องจากมีค่าความร้อนนำเข้า (Heat Input) น้อยที่สุด เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว

โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที พบว่า โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีลักษณะโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งมีลักษณะเกรนที่ละเอียด และมีเกรนขนาดเล็กใกล้เคียงกันมากกว่าโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored เล็กน้อย เนื่องจากมีค่าความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) น้อยที่สุด ทำให้มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored ส่งผลให้เกรนมีระยะเวลาในการขยายตัวน้อย เกรนจึงมีขนาดเล็ก

โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณเนื้อโลหะงาน (Base Metal) ด้วยการเชื่อมแบบโหมด ColdArc\_Pulse และ Fluxcored พบว่า โครงสร้างที่ปรากฏ คือ โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) ซึ่งจัดอยู่ในเหล็กกล้าประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade)

### 5.1.3 สมบัติทางกล

จากผลการทดลองค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 และค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 30 และ 35 เซนติเมตร/นาที จะพบว่า บริเวณแนวเชื่อม (WM) ของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse มีค่าความแข็งที่มากกว่าโหมดการเชื่อมแบบอื่นๆ อยู่ประมาณ 10-20 HV เป็นผลมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่า ทำให้ขนาดของโครงสร้างมีความละเอียดกว่า ซึ่งจากการพิจารณาลักษณะแนวเชื่อมของโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse จะให้ลักษณะรอยเชื่อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเชื่อมพอกผิว เนื่องจากมีความกว้างของแนวเชื่อมน้อยเกินไป และมีความสูงของแนวเชื่อมที่มากเกินไป ด้วย โดยค่าความแข็งสูงสุดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 อยู่ตรงบริเวณแนวเชื่อม (WM) ที่ระยะ -2.88

มิลลิเมตร มีค่าความแข็งแรงอยู่ที่ 241.7 HV และค่าความแข็งแรงสูงสุดของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 อยู่ตรงบริเวณแนวเชื่อม (WM) ที่ระยะ -2.16 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งแรงอยู่ที่ 245.6 HV

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเชื่อมชิ้นงานทดลองในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse จะต้องมีการกำหนดเปอร์เซ็นต์ของพัลส์ในการเชื่อมแต่ละครั้งด้วย เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของพัลส์ในแต่ละระดับจะให้ลักษณะของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน

5.2.2 ในการเชื่อมชิ้นงานทดลองแต่ละครั้ง ควรมีการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการเชื่อมชิ้นงานให้มีค่าเท่ากันมากที่สุด เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางโลหวิทยา เนื่องจากการเย็นตัวของชิ้นงานที่แตกต่างกัน

5.2.3 ควรมีการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมในส่วนของโหมดการเชื่อมแต่ละแบบ เพื่อจะได้เข้าใจหลักการทำงานและรูปแบบการทำงานในแต่ละโหมดการเชื่อม

## รายการอ้างอิง

- สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ. (2562). **ประโยชน์และการใช้งานของโลหะ** [ออนไลน์]. ได้จาก:  
<http://saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=2&chap=5&page=t2-5-infodetail08.html>
- ประกาศ เมืองจันทบุรี และ ชนินทร์ คำรัสการ (2556). การศึกษากรรมวิธีเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการสึกหรอ และยืดอายุการใช้งานสำหรับฟันโมเหล็กกล้าแมงกานีส. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อรรถกร จันทร์ชนะ และ คณะ (2559). การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งและโครงสร้างของชั้นพอกแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C โดยการเชื่อมอาร์กสวดหุ้มฟลักซ์. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี.
- P. Kah, R. Suoranta and J. Martikainen. (2012). **Advanced gas metal arc welding processes**. Lappeenranta University of Technology, P. O. Box 20, 53851 Lappeenranta, Finland.
- K. Woman. (2003). **Welding processes handbook**. Woo England.
- Kou S. (2003). **“Flux-Core Arc Welding” in Welding Metallurgy**. 2<sup>nd</sup> ed.. Wiley. New York.
- Thermal Mechanics. (2019). Flux Cored Arc Welding Process, Retrieved from  
<http://www.thermal-mech.com/upload/catalog/catalog5.pdf>
- X.Wang, L. Cheng, M. Zhang, and Z.Zou. (2009). **Fabrication of Multiple Carbide Particles Reinforced Fe-based Surface hardfacing layer Produced by Gas Tungsten arc Welding Process**. Surface and coating and Technology 203 (8) : 976-980
- สมศักดิ์ เชาวลิต. (2555). การศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเม็ทต่อสมบัติของรอยต่อเทเลอร์แบบลิ้งค์เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCEEN. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- บริษัท เอสแอนด์บีเทรดมาร์ค จำกัด. (2562). **เหล็กรูปพรรณมาตรฐาน JIS SS400** [ออนไลน์]. ได้จาก [http://www.sb-trademark.co.th/product-metal-steel\\_JIS.php](http://www.sb-trademark.co.th/product-metal-steel_JIS.php)
- ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. (2562). **Stainless steel/เหล็กกล้าไร้สนิม** [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1236/stainless-steel-เหล็กกล้าไร้สนิม>



- เอกสารประกอบการเรียนวิชา InE191 Engineering Material. (2562). คุณสมบัติทางกลและการทดสอบวัสดุ [ออนไลน์]. ได้จาก [http://www.atom.rmutphysics.com/charud/PDF-learning/2/material/1Material\\_Properties.Pdf](http://www.atom.rmutphysics.com/charud/PDF-learning/2/material/1Material_Properties.Pdf)
- อภิชาติ พานิชกุล และ อุษณีย์ กิตกำธร. (2562). การวัดความแข็ง. [ออนไลน์]. ได้จาก [http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement\\_Of\\_Hardness.html](http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html)
- ไพบุลย์ หาญมนต์. (2552). การศึกษาอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมที่มีผลต่อการหลอมลึก ความกว้าง ความสูง และบริเวณกระทบร้อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม โดยกระบวนการเชื่อมมิก. สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เขตสาทร.
- นพพร ภูระย้าม และ อิศรทัต พิงอัน. (2562). การศึกษาคุณสมบัติโลหะเชื่อมโดยการจำลองทางกายภาพ. ศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุง สำนักงานวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สาขาวิศวกรรมเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จงกล ศรีธร. (2557). การศึกษาผลกระทบบนกระบวนการเชื่อมต่อสมบัติทางกลของการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์หลอมเหลว. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุรธยา อิมณา (2552). การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงของผิวเชื่อมพอกของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมได้ฟลักซ์. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ขงยุทธ ดุลยกุล, นภิสพร มีมลค และ ประภาส เหมือนจันทร์บุรี. (2551). “การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระแสเชื่อมและส่วนผสมของแก๊สคลุมที่แตกต่างกันโดยกรรมวิธีการเชื่อมแมก”. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ. สงขลา.
- P.K. Ghosh, L. Dorn, Shrirang G. Kulkarni and F. Hofman ((2009. “Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of stainless steel”, J. of Mater. Processing Technology, 209, pp. .1274-1262
- Johnson J.A. Miller. et al. (2002). **Experimental Investigation of Pulse GMAW**. Idaho National Engineering And Environmental Laboratory. Idaho Falls Idaho.

สิทธิพงษ์ แสงอนิทร์ (2560). ผลของการกระจายความร้อนต่อรูปร่างแนวเชื่อมในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีความหนาต่างกันด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม. ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม. วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800.

Washington Alloy. (2019). **Alloy C-276 Flux-Cored Wire** [On-line]. Available: <https://weldingwire.com/Images/Interior/documentlibrary/c276%20f-cored.pdf>

ณรงค์ศักดิ์ ชรรณโชติ (2560). โลหะวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

P. Marshall (1984). **Austenitic Stainless Steels: Microstructure and Mechanical Properties**, Elsevier Applied Science Publishers, London.





ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400  
และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400  
ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

ColdArc_Pulse(C)						Avg.
Rank	Travel Speed	Penetration				
		1	2	3		
1	20	0.61	0.72	0.76	0.70	
2	25	0.42	0.51	0.40	0.44	
3	30	0.44	0.57	0.61	0.54	
4	35	0.49	0.51	0.44	0.48	

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ใน  
โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

ColdArc_Pulse(C)						Avg.
Rank	Travel Speed	Height				
		1	2	3		
1	20	3.19	3.08	3.06	3.11	
2	25	2.79	2.85	2.62	2.75	
3	30	2.64	2.68	2.51	2.61	
4	35	2.34	2.36	2.36	2.36	

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ใน  
โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

ColdArc_Pulse(C)						Avg.
Rank	Travel Speed	Width				
		1	2	3		
1	20	6.37	6.58	6.67	6.54	
2	25	6.03	5.61	6.14	5.93	
3	30	5.34	5.13	5.42	5.30	
4	35	4.62	4.83	4.56	4.67	

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ใน โหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

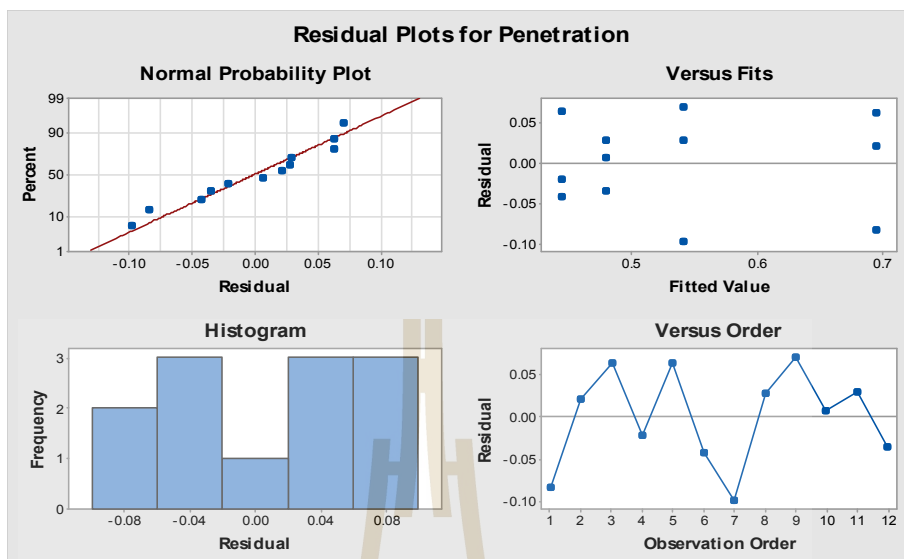
ColdArc_Pulse (S)						Avg.
Rank	Travel Speed	Penetration				
		1	2	3		
1	20	0.69	0.52	0.69	0.63	
2	25	0.72	0.68	0.47	0.62	
3	30	0.55	0.58	0.66	0.59	
4	35	0.51	0.57	0.58	0.55	

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมด การเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

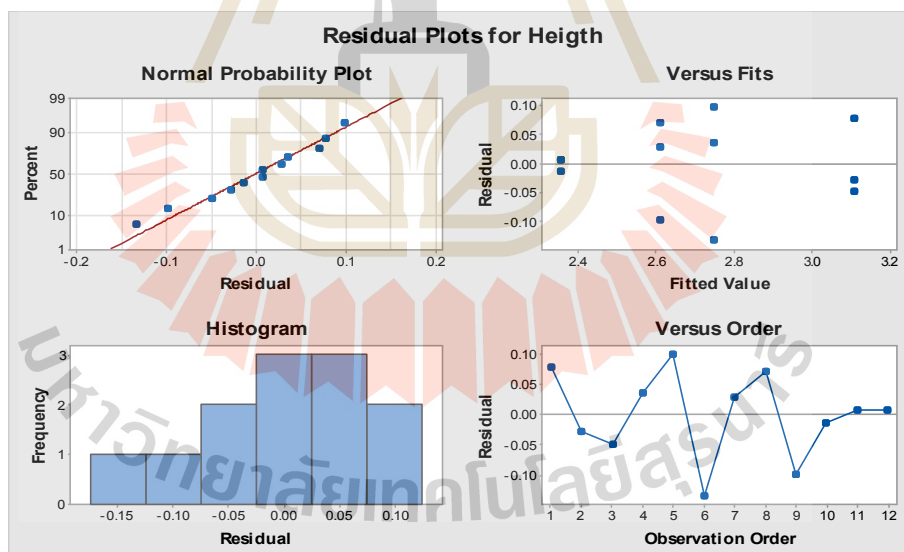
ColdArc_Pulse(S)						Avg.
Rank	Travel Speed	Height				
		1	2	3		
1	20	2.86	2.99	2.78	2.88	
2	25	2.48	2.34	2.37	2.40	
3	30	1.95	2.18	2.44	2.19	
4	35	2.31	1.89	2.13	2.11	

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมด การเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

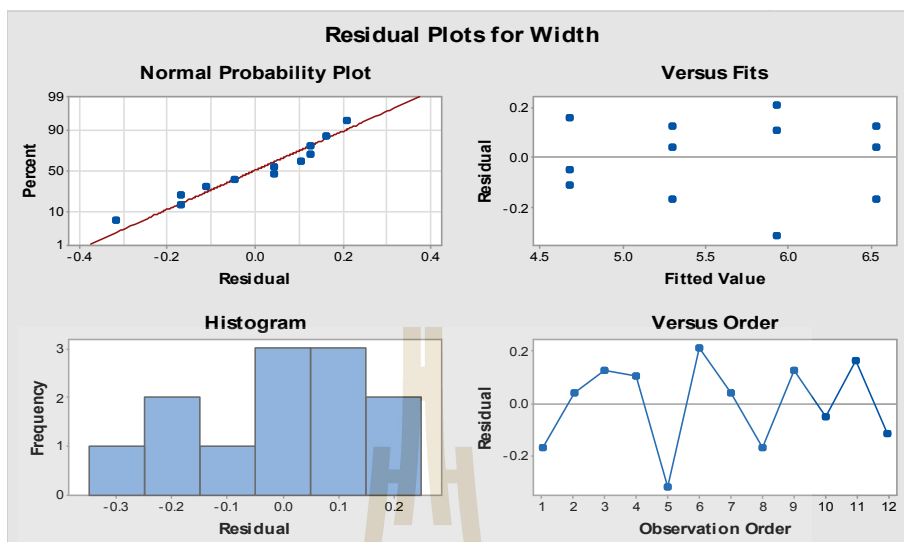
ColdArc_Pulse(S)						Avg.
Rank	Travel Speed	Width				
		1	2	3		
1	20	7.57	7.77	7.50	7.61	
2	25	7.16	7.34	7.48	7.33	
3	30	7.04	7.18	6.90	7.04	
4	35	6.47	6.62	6.71	6.60	



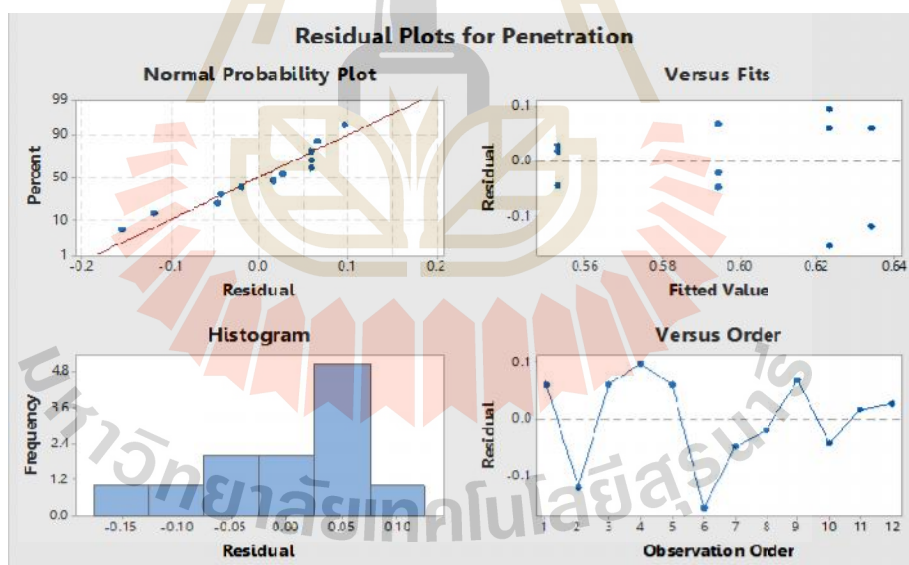
รูปที่ ก.1 การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมลึกของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



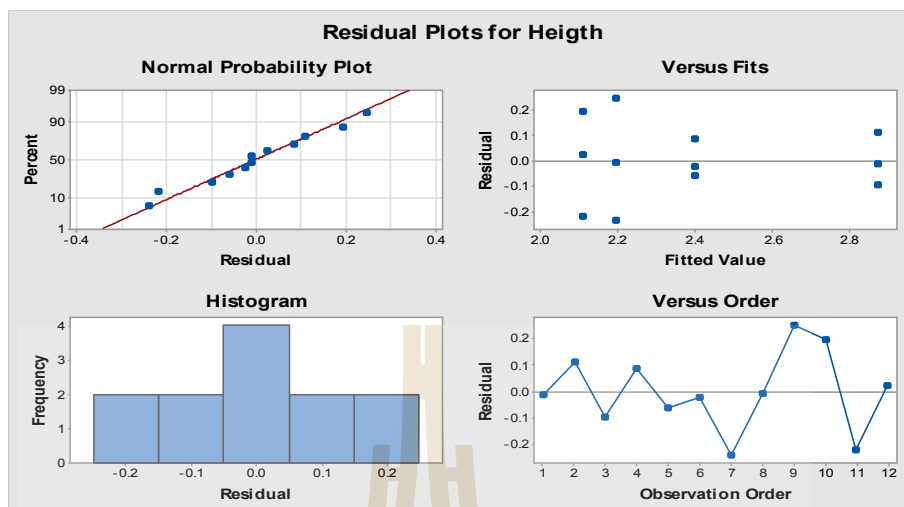
รูปที่ ก.2 การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



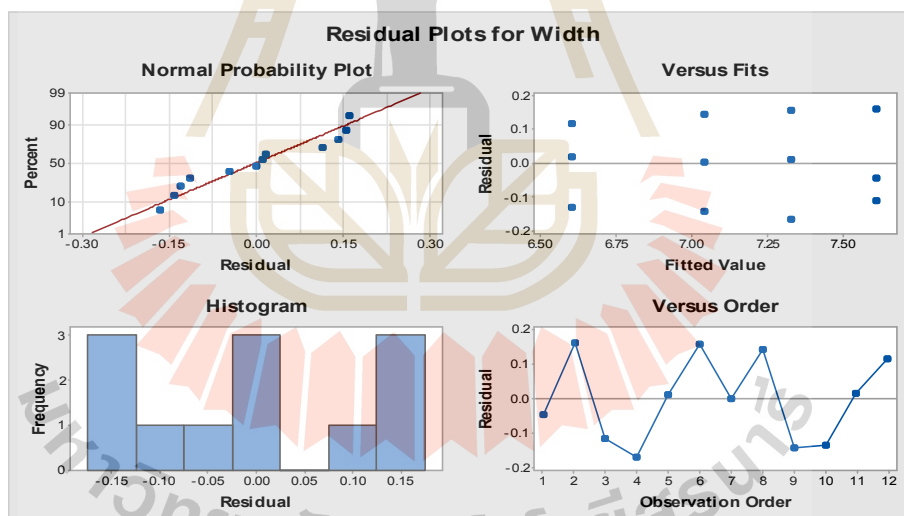
รูปที่ ก.3 การวิเคราะห์ข้อมูลความกว้างของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



รูปที่ ก.4 การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมลึกของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316



รูปที่ ก.5 การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316



รูปที่ ก.6 การวิเคราะห์ข้อมูลความกว้างของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316



ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400  
ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored

Flux cored(C)						Avg.
Rank	Travel Speed	Penetration				
		1	2	3		
1	20	0.80	0.76	0.84	0.80	
2	25	1.01	0.72	0.68	0.80	
3	30	0.68	0.80	0.80	0.76	
4	35	0.57	0.57	0.67	0.60	

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ใน  
โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored

Flux cored(C)						Avg.
Rank	Travel Speed	Height				
		1	2	3		
1	20	3.16	3.16	3.12	3.15	
2	25	2.79	2.66	2.49	2.64	
3	30	2.41	2.41	2.19	2.33	
4	35	2.25	2.18	2.31	2.25	

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ใน  
โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored

Flux cored(C)						Avg.
Rank	Travel Speed	Width				
		1	2	3		
1	20	8.74	9.12	8.65	8.83	
2	25	7.85	8.27	8.49	8.20	
3	30	7.64	7.30	7.55	7.50	
4	35	6.49	6.65	6.68	6.60	

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบการหลอมลึกของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ใน  
โหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored

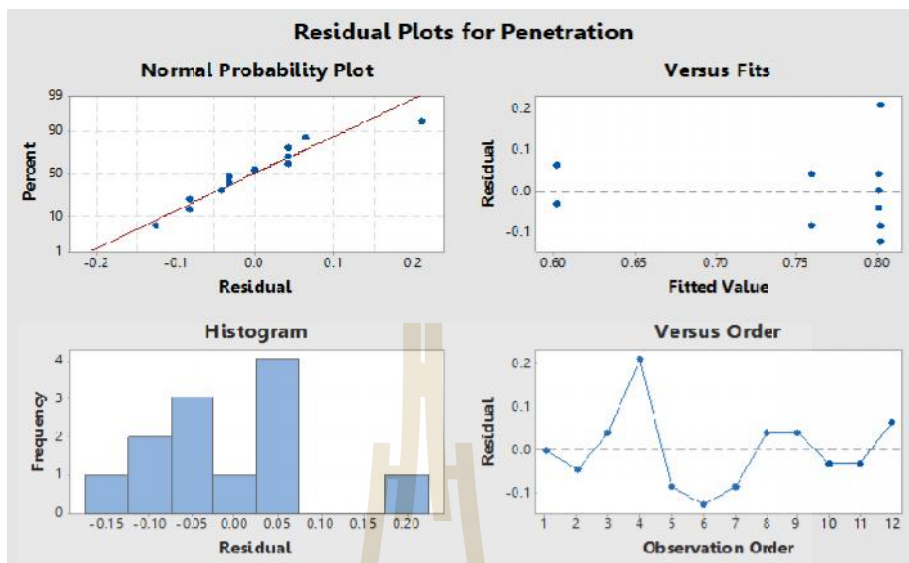
Flux cored(S)						Avg.
Rank	Travel Speed	Penetration				
		1	2	3		
1	20	0.98	0.80	0.72	0.83	
2	25	1.00	0.70	0.78	0.83	
3	30	0.72	0.87	0.77	0.79	
4	35	0.95	0.95	0.95	0.95	

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบความสูงของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมด  
การเชื่อมแบบ Flux Cored

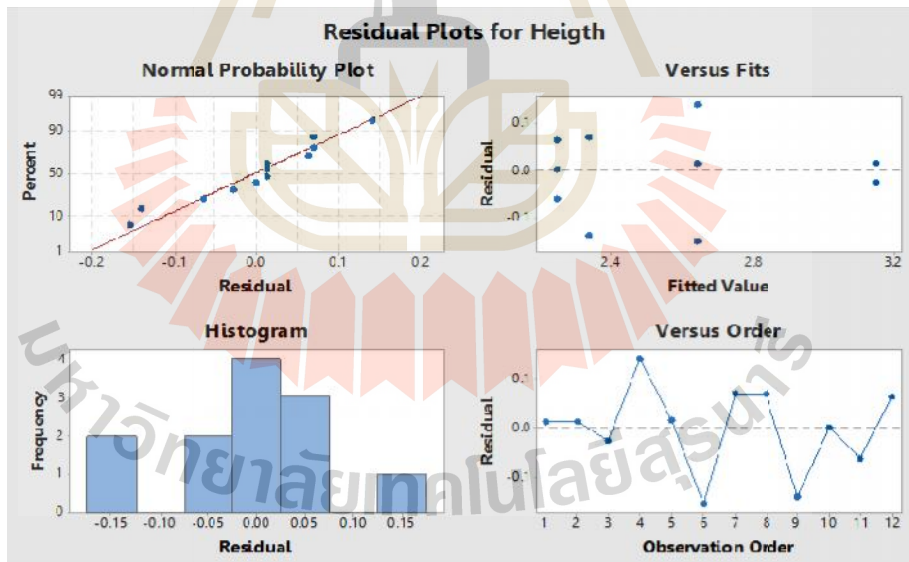
Flux cored(S)						Avg.
Rank	Travel Speed	Height				
		1	2	3		
1	20	2.70	2.63	2.55	2.63	
2	25	2.13	2.39	2.30	2.28	
3	30	2.09	1.98	2.12	2.07	
4	35	2.07	1.95	1.90	1.97	

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบความกว้างของรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมด  
การเชื่อมแบบ Flux Cored

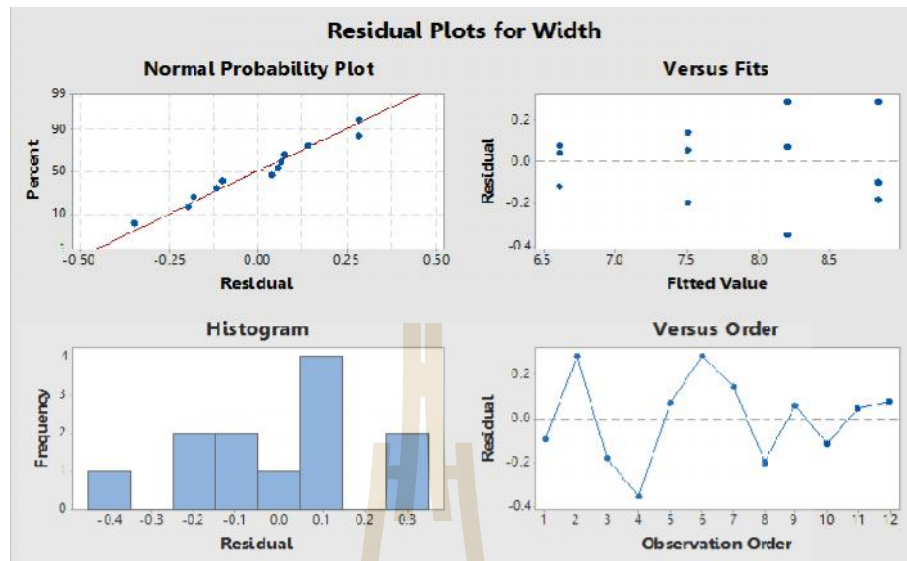
Flux cored(S)						Avg.
Rank	Travel Speed	Width				
		1	2	3		
1	20	11.19	11.26	11.30	11.25	
2	25	10.39	10.17	10.74	10.44	
3	30	9.81	9.59	9.79	9.73	
4	35	9.20	9.30	9.33	9.28	



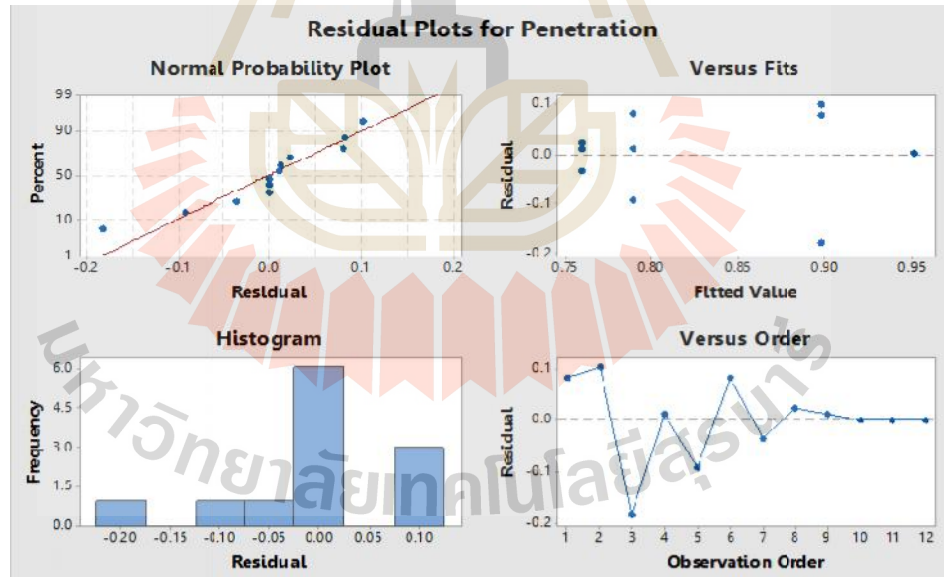
รูปที่ ก.7 การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมลึกของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



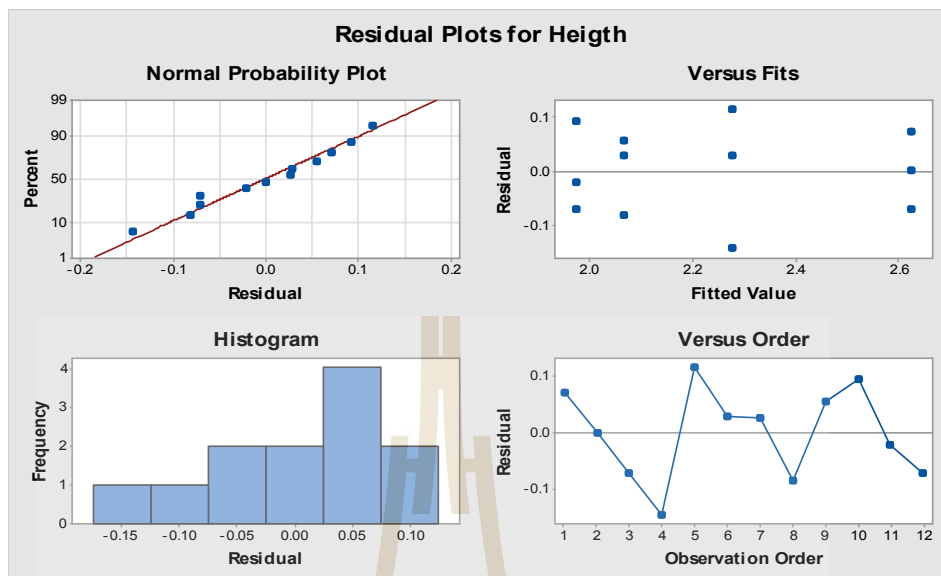
รูปที่ ก.8 การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



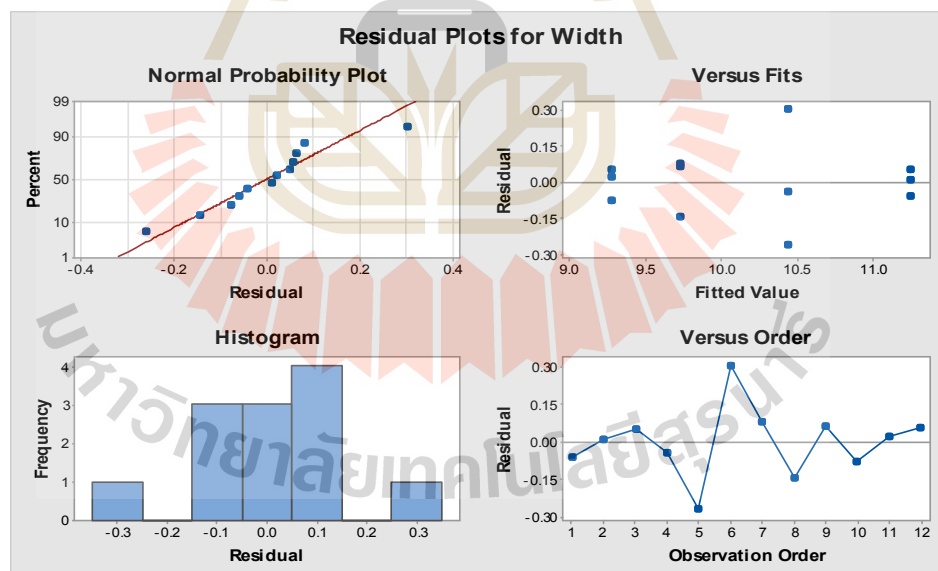
รูปที่ ก.9 การวิเคราะห์ข้อมูลความกว้างของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



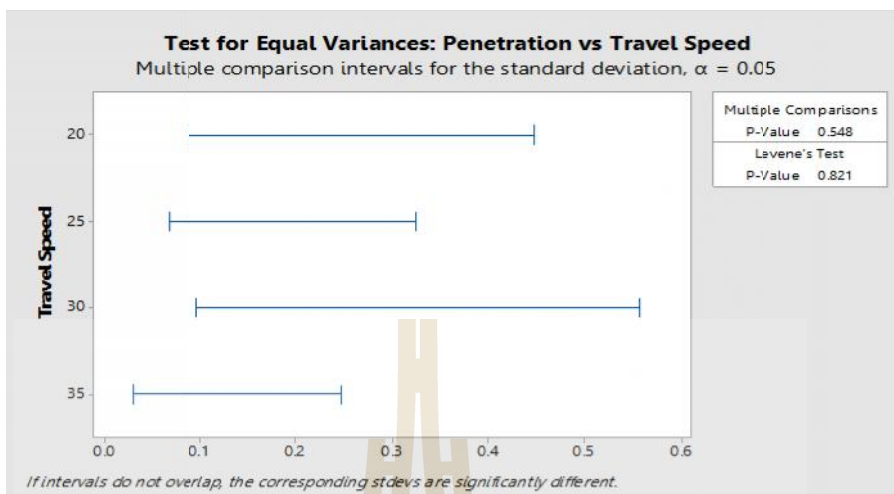
รูปที่ ก.10 การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมลึกของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316



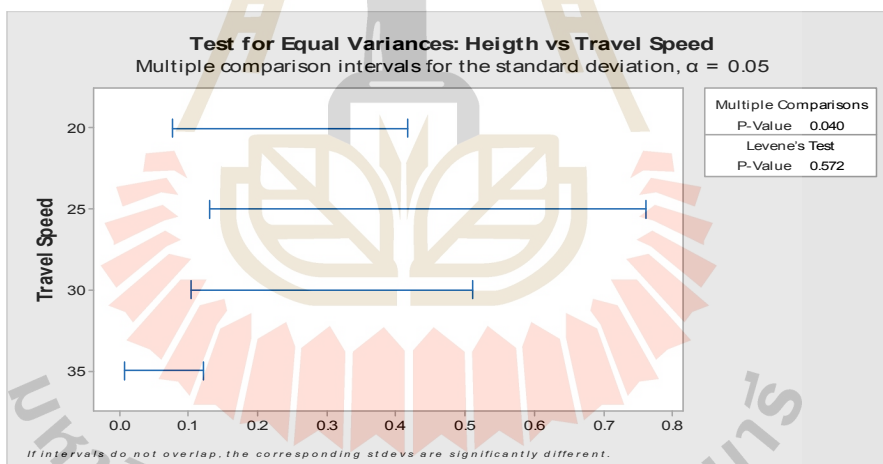
รูปที่ ก.11 การวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316



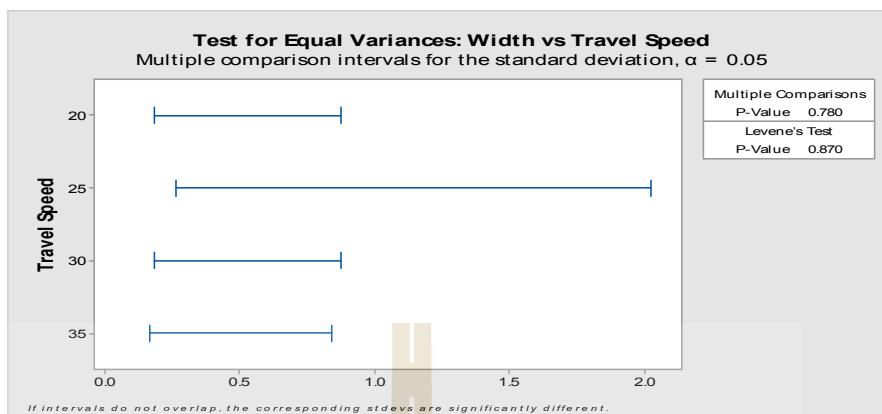
รูปที่ ก.12 การวิเคราะห์ข้อมูลความกว้างของรอยเชื่อมด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316



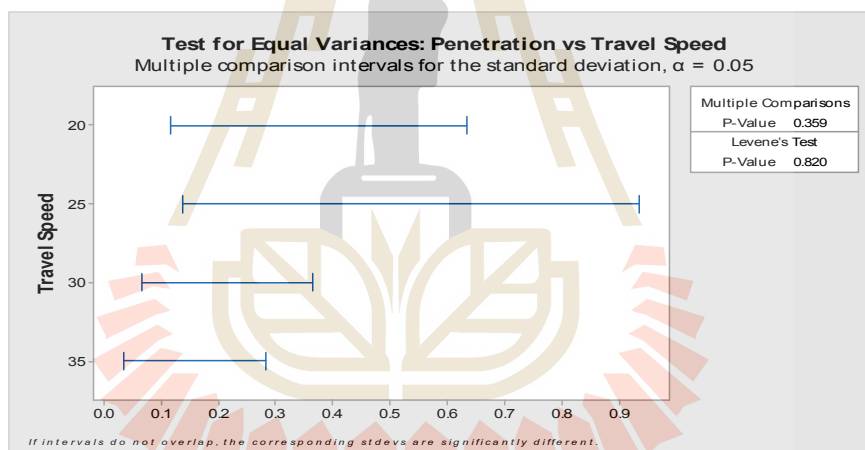
รูปที่ ก.13 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนการหลอมลึกของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse



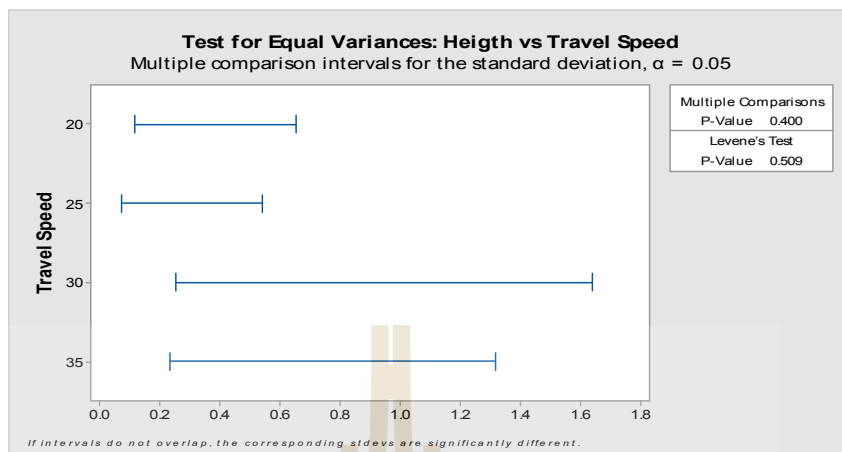
รูปที่ ก.14 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความสูงของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse



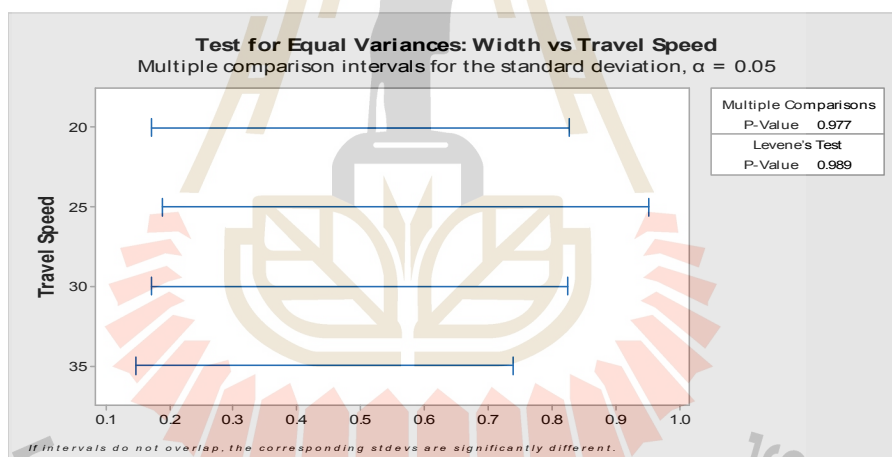
รูปที่ ก.15 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความกว้างของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse



รูปที่ ก.16 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนการหลอมลึกของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

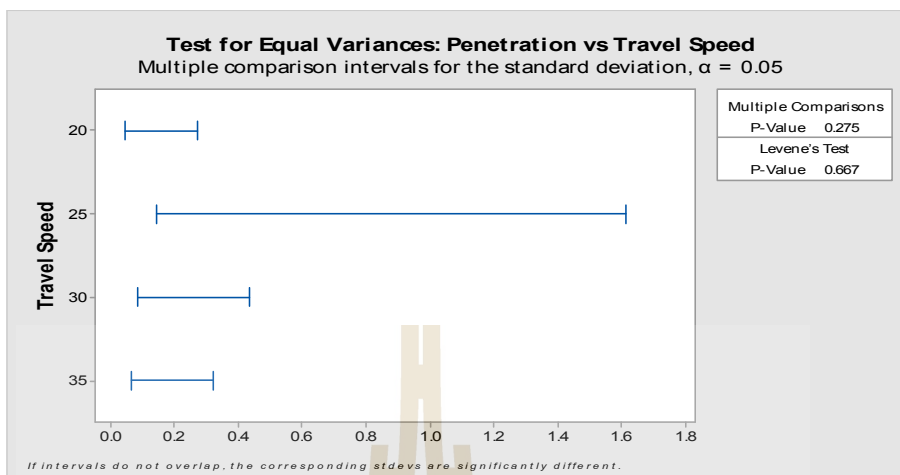


รูปที่ ก.17 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความสูงของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

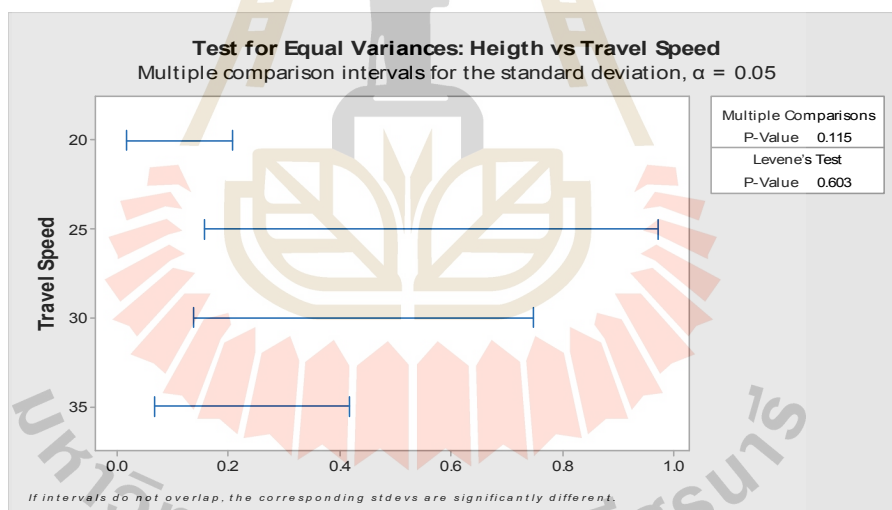


รูปที่ ก.18 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความกว้างของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ ColdArc\_Pulse

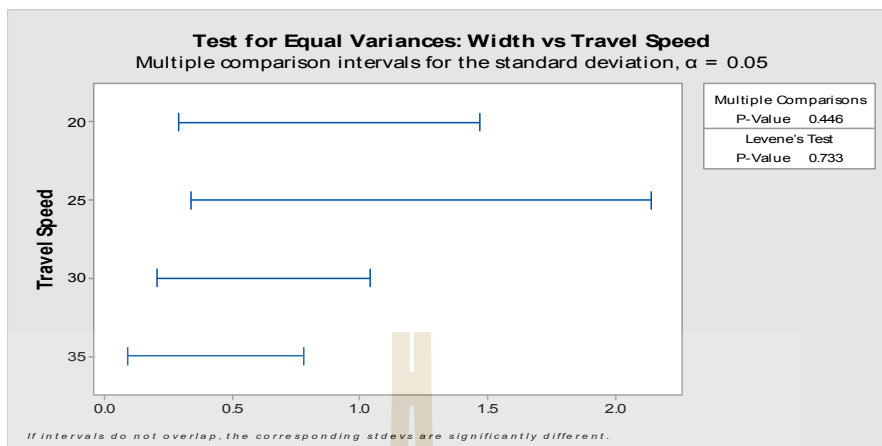




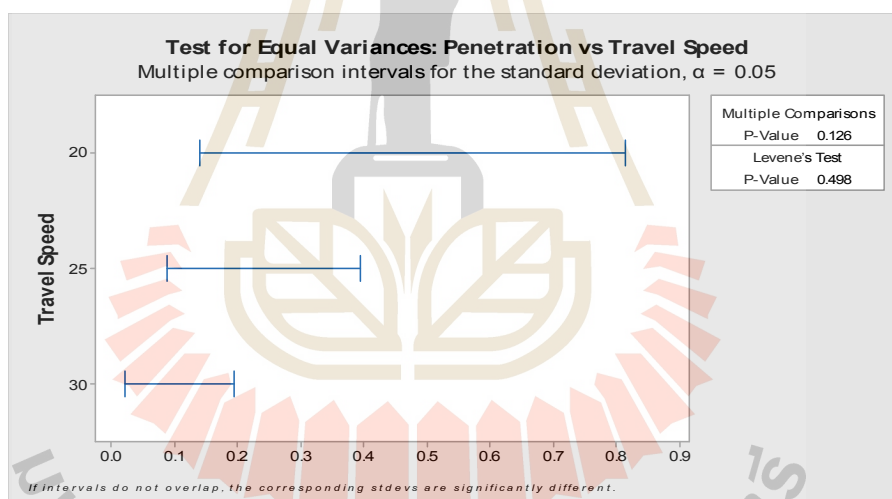
รูปที่ ก.19 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนการหลอมลึกของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored



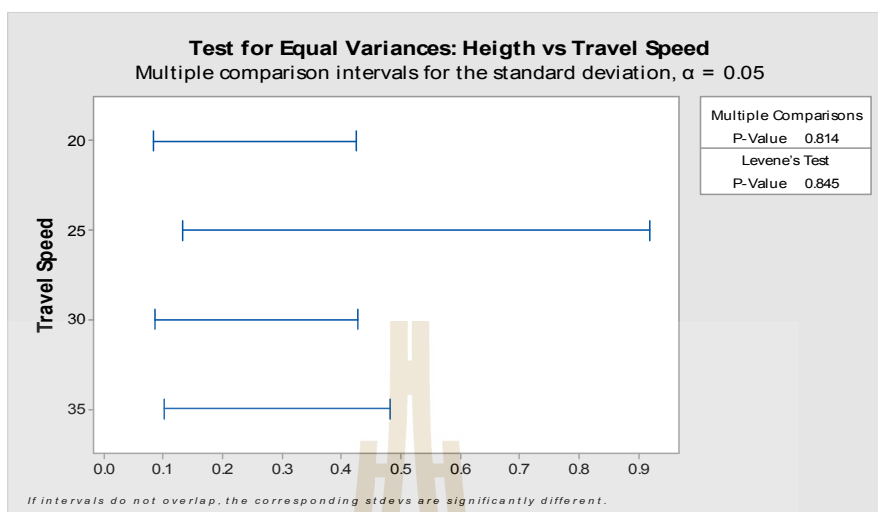
รูปที่ ก.20 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความสูงของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored



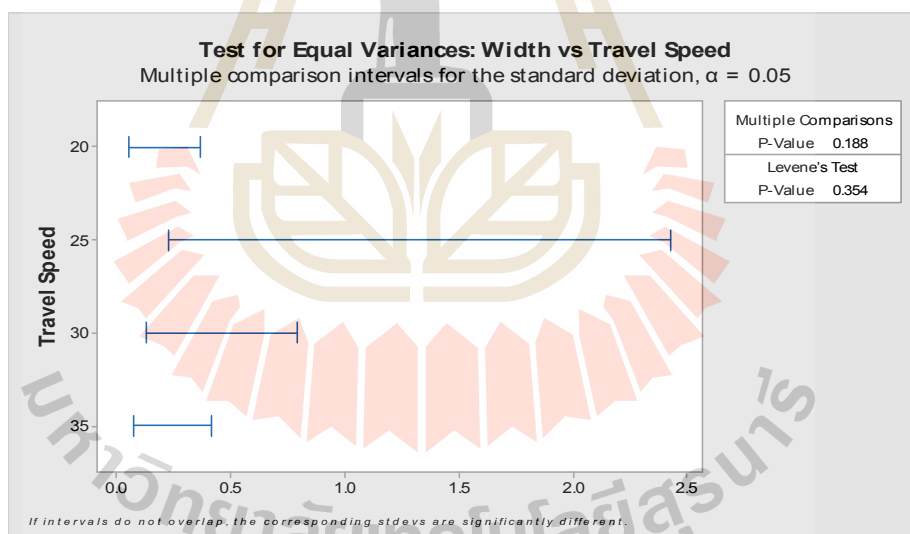
รูปที่ ก.21 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความกว้างของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored



รูปที่ ก.22 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนการหลอมลึกของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored



รูปที่ ก.23 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความสูงของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored



รูปที่ ก.24 กราฟการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนความกว้างของรอยเชื่อม  
สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ในโหมดการเชื่อมแบบ Flux Cored



ภาคผนวก ข

ตารางค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400  
และเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 25 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.88	214.5	226.9	220.1	220.5
-2.64	207.7	217.2	220.0	215.0
-2.40	208.8	220.3	227.0	218.7
-2.16	220.5	225.1	220.9	222.2
-1.92	218.6	215.0	219.1	217.6
-1.68	211.8	212.8	220.4	215.0
-1.44	219.8	223.6	215.8	219.7
-1.20	213.3	214.6	212.7	213.5
-0.96	220.6	208.7	207.1	212.1
-0.72	213.3	212.1	204.9	210.1
-0.48	216.7	214.1	219.1	216.6
-0.24	226.1	211.6	222.9	220.2
0.24	146.8	159.0	166.6	157.5
0.48	152.1	152.3	161.4	155.3
0.72	147.7	163.9	163.1	158.2
0.96	155.8	164.3	158.7	159.6
1.20	144.5	163.0	158.9	155.5
1.44	150.2	163.3	158.3	157.3
1.68	144.9	155.2	150.4	150.2
1.92	146.1	155.8	152.2	151.4
2.16	147.4	158.5	157.2	154.4

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc (ต่อ)

2.40	157.0	162.0	162.9	160.6
2.64	146.6	158.3	156.2	153.7
3.12	146.7	162.2	157.5	155.5
3.36	145.5	160.8	155.9	154.1
3.60	143.8	157.5	156.9	152.7
3.84	143.8	147.6	155.1	148.8
4.08	143.8	151.6	153.6	149.7
4.32	143.9	146.4	151.4	147.2
4.56	146.6	153.3	150.3	150.1
4.80	151.7	148.4	150.1	150.1
5.04		155.7	153.6	154.7
5.28				



ตารางที่ ข.2 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 30 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.88	218.9	214.6		216.8
-2.64	212.7	211.1	216.9	213.6
-2.40	208.4	214.4	217.2	213.3
-2.16	214.9	211.9	218.9	215.2
-1.92	210.7	217.1	211.8	213.2
-1.68	216.6	207.5	218.5	214.2
-1.44	215.2	215.1	222.3	217.5
-1.20	223.1	227.1	223.9	224.7
-0.96	210.9	205.0	219.6	211.8
-0.72	209.1	209.1	224.8	214.3
-0.48	212.5	213.0	220.5	215.3
-0.24	216.0	217.1	216.9	216.7
0.24	156.1	157.1	171.7	161.6
0.48	158.2	164.7	157.8	160.2
0.72	153.8	152.2	160.6	155.5
0.96	157.7	157.2	154.8	156.6
1.20	154.2	157.1	165.3	158.9
1.44	143.6	151.8	145.7	147.0
1.68	149.9	155.5	152.5	152.6
1.92	149.7	156.9	150.5	152.4
2.16	154.7	152.5	153.2	153.5
2.40	151.6	147.3	144.7	147.9
2.64	150.9	150.8	152.4	151.4
3.12	148.5	147.4	149.6	148.5

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 30 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
3.36	150.2	155.4	148.1	151.2
3.60	146.9	146.6	150.4	148.0
3.84	147.1	150.7	147.4	148.4
4.08	150.9	145.5	150.5	149.0
4.32	141.8	156.4	152.7	150.3
4.56	148.0	149.8	148.3	148.7
4.80	149.7	146.5	150.6	148.9
5.04	147.1		146.8	147.0
5.28			144.5	144.5

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 35 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.88	219.9			219.9
-2.64	218.4	216.9		217.7
-2.40	213.6	216.0	226.4	218.7
-2.16	207.8	217.0	225.8	216.9
-1.92	207.4	216.3	224.3	216.0
-1.68	208.8	220.2	217.9	215.6
-1.44	217.1	218.8	225.6	220.5
-1.20	216.4	214.3	225.8	218.8
-0.96	214.8	225.0	213.6	217.8
-0.72	216.8	214.1	220.2	217.0



ตารางที่ ข.3 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc (ต่อ)

ระยะห่าง ระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 35 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-0.48	216.4	217.9	221.0	218.4
-0.24	216.6	214.9	229.3	220.3
0.24	166.1	176.5	179.8	174.1
0.48	175.4	164.4	165.5	168.4
0.72	165.5	163.6	158.1	162.4
0.96	168.5	161.7	164.0	164.7
1.20	157.9	163.9	165.0	162.3
1.44	151.6	160.0	160.5	157.4
1.68	154.8	160.5	161.1	158.8
1.92	152.4	160.8	158.1	157.1
2.16	160.7	156.9	162.5	160.0
2.40	165.6	156.1	158.9	160.2
2.64	154.4	159.7	162.7	158.9
3.12	153.9	156.9	155.4	155.4
3.36	149.7	158.0	155.4	154.4
3.60	145.9	154.9	153.7	151.5
3.84	152.4	154.9	158.6	155.3
4.08	148.3	155.3	154.6	152.7
4.32	159.9	154.5	155.1	156.5
4.56	153.4	156.2	156.5	155.4
4.80	149.5	155.7	151.9	152.4
5.04	148.1	159.0	158.4	155.2
5.28	152.8	153.6	147.2	151.2

ตารางที่ ข.4 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 25 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.88	232.2	227.0	265.8	241.7
-2.64	227.4	232.5	248.4	236.1
-2.40	228.8	222.0	243.1	231.3
-2.16	228.1	221.4	238.9	229.5
-1.92	218.3	219.4	227.1	221.6
-1.68	218.2	231.5	239.3	229.7
-1.44	224.6	226.2	234.3	228.4
-1.20	224.6	222.0	216.6	221.1
-0.96	198.5	227.2	223.4	216.4
-0.72	234.6	231.4	231.0	232.3
-0.48	228.2	230.1	228.4	228.9
-0.24	225.6	223.7	220.3	223.2
0.24	162.3	164.9	171.0	166.1
0.48	175.3	153.2	169.1	165.9
0.72	156.2	155.7	155.1	155.7
0.96	156.4	171.5	152.2	160.0
1.20	157.7	141.2	169.0	156.0
1.44	149.2	147.8	158.4	151.8
1.68	157.0	154.1	138.4	149.8
1.92	167.5	145.6	155.7	156.3
2.16	163.1	130.2	163.7	152.3
2.40	147.5	157.0	151.0	151.8
2.64	157.4	150.2	164.2	157.3
3.12	144.5	153.2	163.7	153.8

ตารางที่ ข.4 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 25 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
3.36	146.1	147.3	148.1	147.2
3.60	140.7	158.1	148.0	148.9
3.84	133.9	143.3	146.9	141.4
4.08	150.6	147.4	168.7	155.6
4.32	150.1	144.1	152.4	148.9
4.56	140.7	150.8	160.0	150.5
4.80	135.9	156.6	164.9	152.5
5.04	149.3	147.2	147.5	148.0
5.28	148.5	148.4	155.9	150.9

ตารางที่ ข.5 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 30 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.88	230.8	239.8		235.3
-2.64	225.5	238.0	228.5	230.7
-2.40	228.8	231.0	226.6	228.8
-2.16	221.5	231.5	227.2	226.7
-1.92	227.7	235.5	225.5	229.6
-1.68	226.1	227.6	219.9	224.5
-1.44	235.9	237.4	229.3	234.2
-1.20	230.3	252.0	224.4	235.6
-0.96	230.1	220.9	224.8	225.3
-0.72	227.6	224.4	230.8	227.6
-0.48	227.6	223.8	226.0	225.8

ตารางที่ ข.5 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse (ต่อ)

-0.24	234.1	233.2	233.7	233.7
0.24	167.3	157.8	169.8	165.0
0.48	151.7	160.1	158.1	156.6
0.72	151.5	146.8	163.4	153.9
0.96	165.6	168.4	164.9	166.3
1.20	167.6	161.3	161.6	163.5
1.44	163.6	148.9	148.9	153.8
1.68	148.8	159.4	163.9	157.4
1.92	151.5	138.8	139.4	143.2
2.16	163.7	148.6	155.7	156.0
2.40	149.4	153.9	142.6	148.6
2.64	143.3	156.2	147.3	148.9
3.12	143.9	150.4	144.3	146.2
3.36	149.9	157.2	161.5	156.2
3.60	153.2	160.9	161.5	158.5
3.84	152.7	152.5	144.2	149.8
4.08	142.6	156.9	155.2	151.6
4.32	153.2	150.8	160.0	154.7
4.56	145.5	145.1	156.1	148.9
4.80	157.6	147.8	157.1	154.2
5.04	164.7	141.1	163.0	156.3
5.28	156.3	152.4	156.9	155.2

ตารางที่ ข.6 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 35 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.88		216.9	212.8	214.9
-2.64	225.0	218.5	235.3	226.3
-2.40	217.7	225.9	221.1	221.6
-2.16	219.8	221.2	226.5	222.5
-1.92	215.8	220.1	228.4	221.4
-1.68	222.6	212.0	226.1	220.2
-1.44	226.5	217.2	214.5	219.4
-1.20	217.8	221.9	219.8	219.8
-0.96	218.9	216.9	215.9	217.2
-0.72	217.8	221.4	221.6	220.3
-0.48	217.9	219.8	211.9	216.5
-0.24	223.8	230.2	229.7	227.9
0.24	166.6	170.5	172.5	169.9
0.48	158.8	162.9	167.9	163.2
0.72	158.6	159.5	169.7	162.6
0.96	158.3	161.5	161.7	160.5
1.20	152.5	155.9	156.6	155.0
1.44	150.8	155.5	154.6	153.6
1.68	153.9	156.4	154.8	155.0
1.92	156.6	153.9	151.1	153.9
2.16	154.8	147.7	157.0	153.2
2.40	140.3	157.3	159.9	152.5
2.64	139.8	152.8	161.7	151.4
3.12	144.4	155.8	153.8	151.3
3.36	148.5	154.7	158.6	153.9

ตารางที่ ข.6 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 35 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
3.60	146.6	153.1	158.2	152.6
3.84	153.7	151.4	158.9	154.7
4.08	141.7	151.3	158.6	150.5
4.32	147.3	152.5	154.8	151.5
4.56	143.7	155.8	157.7	152.4
4.80	146.9	154.0	161.2	154.0
5.04	151.0	157.4	165.8	158.1
5.28	143.7	149.5	159.5	150.9

ตารางที่ ข.7 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux\_cored

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 25 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.88	204.2	236.9	214.4	218.5
-2.64	209.6	202.0	217.8	209.8
-2.40	214.6	217.6	209.5	213.9
-2.16	213.0	203.5	214.0	210.2
-1.92	216.6	212.1	205.1	211.3
-1.68	211.4	203.3	209.9	208.2
-1.44	220.5	215.7	214.0	216.7
-1.20	210.7	214.3	202.0	209.0
-0.96	216.6	203.4	211.2	210.4
-0.72	220.0	212.1	210.8	214.3
-0.48	213.8	204.7	210.3	209.6
-0.24	212.2	226.3	218.2	218.9

ตารางที่ ข.7 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมคการเชื่อมแบบ Flux\_cored (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 25 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
0.24	155.9	150.0	162.6	156.2
0.48	156.4	154.0	152.2	154.2
0.72	149.0	160.0	160.9	156.6
0.96	152.5	157.1	151.7	153.8
1.20	152.5	147.9	153.2	151.2
1.44	150.4	148.5	154.7	151.2
1.68	156.4	147.9	147.3	150.5
1.92	151.6	147.2	140.6	146.5
2.16	154.8	143.7	147.2	148.6
2.40	140.3	141.7	149.6	143.9
2.64	139.8	142.6	147.6	143.3
3.12	144.4	152.6	155.8	150.9
3.36	148.5	146.7	150.5	148.6
3.60	146.6	149.6	151.6	149.3
3.84	153.7	147.0	152.3	151.0
4.08	141.7	141.3	140.1	141.0
4.32	147.3	146.2	152.9	148.8
4.56	143.7	149.1	160.0	150.9
4.80	146.9	147.1	149.0	147.7
5.04	151.0	151.0	147.0	149.7
5.28	143.7	143.7		143.7

ตารางที่ ข.8 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมคการเชื่อมแบบ Flux\_cored

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 30 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเคลือบ (HV)
-2.88	192.0	223.8	215.9	210.6
-2.64	220.7	205.0	218.3	214.7
-2.40	217.2	206.1	216.1	213.1
-2.16	222.7	228.4	203.5	218.2
-1.92	210.7	230.2	214.3	218.4
-1.68	220.6	218.3	215.4	218.1
-1.44	216.2	194.7	214.5	208.5
-1.20	219.1	226.5	221.5	222.4
-0.96	213.1	231.5	204.5	216.4
-0.72	207.0	221.9	207.7	212.2
-0.48	213.2	224.1	205.2	214.2
-0.24	216.3	220.9	211.3	216.2
0.24	163.1	162.7	166.2	164.0
0.48	157.3	155.6	141.0	151.3
0.72	151.2	159.0	138.4	149.5
0.96	154.8	158.4	165.0	159.4
1.20	151.3	150.5	160.6	154.1
1.44	150.7	165.9	153.2	156.6
1.68	155.1	145.8	150.1	150.3
1.92	156.0	150.3	138.3	148.2
2.16	149.1	150.7	150.5	150.1
2.40	156.4	157.3	144.6	152.8
2.64	156.5	162.0	148.3	155.6
3.12	144.8	155.0	140.0	146.6
3.36	148.5	150.9	151.9	150.4



ตารางที่ ข.8 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux\_cored (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 30 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
3.60	151.3	150.8	141.3	147.8
3.84	152.2	154.7	144.7	150.5
4.08	148.4	159.4	146.2	151.3
4.32	152.7	141.2	143.2	145.7
4.56	144.1	163.0	145.9	151.0
4.80	153.8	153.8	146.5	151.4
5.04	150.9	150.9	149.4	150.4
5.28				

ตารางที่ ข.9 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux\_cored

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 35 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.88	217.5	210.9	225.3	217.9
-2.64	223.6	212.8	236.5	224.3
-2.40	224.4	206.9	229.6	220.3
-2.16	224.8	213.7	217.8	218.8
-1.92	221.9	206.4	214.3	214.2
-1.68	217.2	212.3	215.8	215.1
-1.44	220.8	212.2	204.2	212.4
-1.20	226.4	213.0	207.8	215.7
-0.96	219.1	214.6	215.5	216.4
-0.72	224.0	202.2	212.1	212.8
-0.48	220.2	209.2	213.6	214.3
-0.24	216.4	209.1	216.5	214.0

ตารางที่ ข.9 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมคการเชื่อมแบบ Flux\_cored (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกค (mm.)	ความเร็วที่ 35 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
0.24	169.8	169.9	168.2	169.3
0.48	168.9	167.1	165.2	167.1
0.72	168.0	160.0	159.9	162.6
0.96	167.1	164.8	165.2	165.7
1.20	160.4	161.5	160.8	160.9
1.44	145.9	164.0	158.8	156.2
1.68	163.8	164.0	160.4	162.7
1.92	155.1	159.8	158.7	157.9
2.16	156.0	159.5	158.2	157.9
2.40	149.1	159.5	158.1	155.6
2.64	156.4	160.4	158.1	158.3
3.12	156.5	159.6	158.7	158.3
3.60	148.5	157.9	162.0	156.1
3.84	151.3	162.6	159.1	157.7
4.08	152.2	158.0	156.5	155.6
4.32	148.4	158.9	158.8	155.4
4.56	152.7	159.9	158.6	157.1
4.80	144.1	157.6	159.4	153.7
5.04	153.8	155.6	153.5	154.3
5.28	150.9	160.7		155.8

ตารางที่ ข.10 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 25 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.64	235.4	230.0	263.3	242.9
-2.40	232.4	231.7	243.6	235.9
-2.16	240.5	255.5	240.8	245.6
-1.92	232.4	238.9	231.1	234.1
-1.68	229.3	232.1	238.6	233.3
-1.44	235.8	235.0	222.0	230.9
-1.20	229.7	240.7	229.8	233.4
-0.96	253.2	257.3	207.3	239.3
-0.72	220.9	236.9	208.7	222.2
-0.48	231.8	235.8	211.4	226.3
-0.24	229.3	234.6	219.4	227.8
0.24	190.2	180.8	176.1	182.4
0.48	183.5	194.0	179.9	185.8
0.72	195.7	192.6	190.4	192.9
0.96	198.4	198.2	189.6	195.4
1.20	191.0	197.8	181.3	190.0
1.44	188.0	200.1	194.1	194.1
1.68	189.5	201.2	194.8	195.2
1.92	199.4	203.8	199.8	201.0
2.16	194.0	193.2	200.7	196.0
2.40	188.4	200.6	195.1	194.7
2.64	192.0	189.5	201.0	194.2
3.12	185.7	201.1	191.3	192.7
3.36	192.2	199.5	189.8	193.8
3.60	188.9	202.0	191.2	194.0

ตารางที่ ข.10 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 25 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
3.84	198.9	191.1	191.7	193.9
4.08	188.9	188.6	194.4	190.6
4.32	182.2	179.8	175.2	179.1
4.56	177.1	190.6	176.8	181.5
4.80	174.8	184.2	194.6	184.5
5.04	174.3	196.4	185.1	185.3
5.28	178.0	178.7	181.4	179.4
5.52	173.0	164.8	174.5	170.8
5.76	174.9	170.8	173.0	172.9
6.00	169.1	179.0	173.5	173.9
6.24	164.8	188.6	177.0	176.8
6.48	168.1	179.1	179.1	175.4
6.72	177.0	167.7	170.9	171.9
6.96	164.6	173.4	180.7	172.9
7.20	174.3	179.1	172.7	175.4
7.44	169.2	179.2	172.0	173.5
7.68	173.6	177.8	174.0	175.1
7.92	166.6	178.8	174.9	173.4
8.16	177.9	170.0	170.5	172.8
8.40	171.9	183.3	175.9	177.0

ตารางที่ ข.11 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 30 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.64		243.0	235.7	239.4
-2.40	228.9	238.4	239.7	235.7
-2.16	229.6	236.5	237.3	234.5
-1.92	220.7	242.9	233.5	232.4
-1.68	228.4	241.3	231.3	233.7
-1.44	234.0	242.3	241.5	239.3
-1.20	224.2	218.8	236.7	226.6
-0.96	225.8	224.5	231.2	227.2
-0.72	232.4	223.3	237.1	230.9
-0.48	222.5	232.1	227.6	227.4
-0.24	220.9	221.9	228.7	223.8
0.24	188.1	189.3	192.8	190.1
0.48	188.0	181.9	190.0	186.6
0.72	186.9	195.1	188.2	190.1
0.96	196.3	202.6	190.8	196.6
1.20	192.9	202.6	187.4	194.3
1.44	201.5	191.7	200.1	197.8
1.68	201.8	196.1	194.5	197.5
1.92	189.2	197.6	195.6	194.1
2.16	197.8	196.3	199.0	197.7
2.40	198.6	193.1	189.1	193.6
2.64	189.1	193.2	187.5	189.9
3.12	198.5	183.1	186.7	189.4
3.36	182.1	187.0	182.1	183.7
3.60	191.9	178.2	175.7	181.9

ตารางที่ ข.11 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 30 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
3.84	180.1	198.8	185.8	188.2
4.08	182.9	178.6	184.5	182.0
4.32	172.9	176.1	187.7	178.9
4.56	169.3	173.4	164.7	169.1
4.80	184.8	171.4	172.6	176.3
5.04	179.9	170.7	169.0	173.2
5.28	178.6	171.4	162.4	170.8
5.52	163.4	156.8	176.6	165.6
5.76	176.2	173.4	176.1	175.2
6.00	167.7	171.2	177.4	172.1
6.24	162.8	162.5	173.0	166.1
6.48	170.1	171.9	171.4	171.1
6.72	170.1	161.8	171.9	167.9
6.96	176.4	161.6	165.4	167.8
7.20	159.8	167.4	177.5	168.2
7.44	168.2	167.9	157.3	164.5
7.68	172.9	175.1	174.9	174.3
7.92	165.0	164.0	173.7	167.6
8.16	177.4	171.0	170.6	173.0
8.40	179.3	169.0	173.9	174.1

ตารางที่ ข.12 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 35 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.64				
-2.40	236.1	233.2	233.4	234.2
-2.16	237.7	230.2	222.0	230.0
-1.92	237.4	227.0	234.6	233.0
-1.68	233.9	225.7	233.5	231.0
-1.44	225.5	240.2	232.4	232.7
-1.20	221.5	234.8	228.5	228.3
-0.96	222.9	243.2	225.0	230.4
-0.72	230.0	230.2	226.0	228.7
-0.48	232.6	232.1	229.7	231.5
-0.24	229.3	231.3	230.8	230.5
0.24	185.6	187.2	184.9	185.9
0.48	191.0	185.6	185.1	187.2
0.72	193.0	192.1	196.9	194.0
0.96	186.9	193.2	199.4	193.2
1.20	188.3	194.6	193.5	192.1
1.44	192.3	203.5	196.4	197.4
1.68	193.1	191.8	191.5	192.1
1.92	199.8	192.1	194.4	195.4
2.16	187.9	190.9	193.4	190.7
2.40	188.3	196.2	198.0	194.2
2.64	181.7	182.7	193.2	185.9
3.12	177.1	184.7	188.1	183.3
3.36	181.8	184.0	186.3	184.0
3.60	177.5	177.1	179.3	178.0

ตารางที่ ข.12 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Coldarc\_pulse (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 35 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
3.84	174.5	169.2	177.7	173.8
4.08	175.0	172.1	184.5	177.2
4.32	172.0	179.0	173.4	174.8
4.56	175.6	181.5	175.4	177.5
4.80	160.9	160.1	179.2	166.7
5.04	159.3	162.3	162.0	161.2
5.28	167.5	180.5	169.4	172.5
5.52	158.4	167.8	164.7	163.6
5.76	162.8	160.4	161.4	161.5
6.00	165.9	163.1	156.9	162.0
6.24	164.0	167.7	172.3	168.0
6.48	154.0	176.8	176.5	169.1
6.72	168.5	163.2	161.2	164.3
6.96	161.5	163.9	164.7	163.4
7.20	154.3	164.9	174.7	164.6
7.44	155.3	171.4	167.0	164.6
7.68	169.6	170.9	164.0	168.2
7.92	168.3	164.9	167.9	167.0
8.16	168.4	161.4	168.3	166.0
8.40	169.0	181.5	171.5	174.0



ตารางที่ ข.13 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux\_cored

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 25 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.64	223.2	253.4	225.4	234.0
-2.40	222.1	228.4	216.5	222.3
-2.16	228.5	231.1	232.1	230.6
-1.92	223.1	212.7	223.3	219.7
-1.68	226.1	230.0	230.2	228.8
-1.44	220.6	231.1	219.3	223.7
-1.20	222.8	237.4	224.5	228.2
-0.96	218.8	225.1	222.1	222.0
-0.72	211.6	216.9	208.5	212.3
-0.48	220.2	218.2	221.4	219.9
-0.24	212.9	211.9	213.9	212.9
0.24	182.0	192.2	186.0	186.7
0.48	182.0	196.8	177.8	185.5
0.72	196.1	193.8	181.8	190.6
0.96	189.7	193.7	185.5	189.6
1.20	185.3	194.2	184.3	187.9
1.44	193.3	188.3	179.4	187.0
1.68	203.8	208.7	187.6	200.0
1.92	185.5	207.5	187.7	193.6
2.16	210.5	195.1	191.3	199.0
2.40	212.0	191.8	183.9	195.9
2.64	214.3	198.4	203.8	205.5
3.12	198.7	210.0	184.4	197.7
3.36	197.2	196.9	202.1	198.7
3.60	197.0	196.5	191.0	194.8

ตารางที่ ข.13 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 25 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux\_cored (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกุด (mm.)	ความเร็วที่ 25 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
3.84	191.2	200.9	194.6	195.6
4.08	185.4	203.4	174.4	187.7
4.32	186.7	210.9	183.3	193.6
4.56	205.6	192.4	168.2	188.7
4.80	176.9	186.9	176.0	179.9
5.04	197.7	184.8	179.3	187.3
5.28	176.4	184.2	165.0	175.2
5.52	183.2	178.7	173.6	178.5
5.76	171.6	184.4	172.6	176.2
6.00	162.8	174.2	168.9	168.6
6.24	183.3	174.6	174.3	177.4
6.48	192.7	176.5	164.6	177.9
6.72	180.0	179.6	167.9	175.8
6.96	185.1	168.4	164.3	172.6
7.20	186.3	175.2	179.2	180.2
7.44	181.8	179.4	167.9	176.4
7.68	184.3	180.0	168.4	177.6
7.92	187.0	188.0	176.7	183.9
8.16	192.2	169.8	173.2	178.4
8.40	185.8	158.3	173.8	172.6

ตารางที่ ข.14 แสดงค่าความแข็งที่ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux\_cored

ระยะห่างระหว่างรอยกวด (mm.)	ความเร็วที่ 30 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.64	234.4	232.1	250.1	238.9
-2.40	223.8	225.8	239.5	229.7
-2.16	233.0	222.4	221.3	225.6
-1.92	227.5	226.0	221.4	225.0
-1.68	218.8	224.3	225.4	222.8
-1.44	232.3	234.3	226.9	231.2
-1.20	230.1	225.0	214.0	223.0
-0.96	222.7	226.0	204.1	217.6
-0.72	217.5	223.5	208.4	216.5
-0.48	219.8	214.7	211.7	215.4
-0.24	230.8	219.2	210.5	220.2
0.24	184.6	192.4	188.3	188.4
0.48	189.7	186.1	187.5	187.8
0.72	185.1	181.6	180.4	182.4
0.96	189.9	189.4	197.3	192.2
1.20	188.0	189.7	183.3	187.0
1.44	188.0	176.2	185.0	183.1
1.68	188.0	184.8	189.8	187.5
1.92	184.0	185.0	191.0	186.7
2.16	188.3	188.0	184.8	187.0
2.40	197.9	189.9	193.2	193.7
2.64	186.7	191.8	189.7	189.4
3.12	199.1	193.0	175.5	189.2
3.36	193.6	192.1	195.0	193.6
3.60	187.7	195.4	196.5	193.2

ตารางที่ ข.14 แสดงค่าความแข็งที่ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 30 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux\_cored (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 30 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
3.84	191.3	191.9	185.8	189.7
4.08	188.6	182.0	177.1	182.6
4.32	189.7	184.8	178.9	184.5
4.56	189.7	181.4	179.3	183.5
4.80	181.7	175.2	172.4	176.4
5.04	171.4	177.7	170.3	173.1
5.28	175.2	176.4	178.2	176.6
5.52	173.0	177.5	170.7	173.7
5.76	172.8	178.5	161.2	170.8
6.00	178.7	167.7	169.7	172.0
6.24	161.8	179.0	186.4	175.7
6.48	190.0	160.1	173.8	174.6
6.72	174.3	161.8	174.1	170.1
6.96	170.6	162.3	179.2	170.7
7.20	167.6	175.0	171.0	171.2
7.44	174.3	180.2	171.9	175.5
7.68	182.3	165.6	171.3	173.1
7.92	174.6	170.6	172.1	172.4
8.16	181.7	171.8	167.0	173.5
8.40	181.1	177.8	168.4	175.8

ตารางที่ ข.15 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux\_cored

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 35 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
-2.64				
-2.40	217.8	213.1	225.0	218.6
-2.16	219.8	232.3	234.1	228.7
-1.92	220.3	231.3	221.0	224.2
-1.68	226.1	215.4	215.8	219.1
-1.44	216.9	222.5	221.5	220.3
-1.20	216.9	228.1	217.1	220.7
-0.96	233.7	226.4	217.1	225.7
-0.72	222.3	222.0	215.0	219.8
-0.48	218.5	221.5	214.2	218.1
-0.24	218.3	229.5	221.5	223.1
0.24	185.1	194.1	181.9	187.0
0.48	182.8	195.1	184.9	187.6
0.72	185.6	195.2	183.0	187.9
0.96	184.6	190.4	194.2	189.7
1.20	179.8	183.0	193.9	185.6
1.44	197.5	185.2	192.6	191.8
1.68	191.9	185.1	197.4	191.5
1.92	196.1	197.7	201.7	198.5
2.16	194.2	191.8	181.6	189.2
2.40	194.4	196.0	185.2	191.9
2.64	184.9	198.0	196.2	193.0
3.12	188.8	190.2	192.5	190.5
3.36	194.2	188.0	183.5	188.6
3.60	191.1	191.7	189.3	190.7

ตารางที่ ข.15 แสดงค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่ความเร็วในการเชื่อม 35 cm/min ด้วยโหมดการเชื่อมแบบ Flux\_cored (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างรอยกด (mm.)	ความเร็วที่ 35 cm/min			
	รอยเชื่อมที่ 1	รอยเชื่อมที่ 2	รอยเชื่อมที่ 3	ความแข็งเฉลี่ย (HV)
3.84	185.8	184.7	194.8	188.4
4.08	179.3	182.4	188.5	183.4
4.32	177.3	175.7	180.7	177.9
4.56	175.0	171.4	184.7	177.0
4.80	182.3	180.8	175.6	179.6
5.04	160.4	182.3	176.4	173.0
5.28	165.9	174.2	180.6	173.6
5.52	163.7	170.1	164.0	165.9
5.76	166.2	173.1	170.1	169.8
6.00	165.1	163.2	170.5	166.3
6.24	176.9	164.5	182.5	174.6
6.48	173.1	165.7	166.7	168.5
6.72	163.4	183.2	174.4	173.7
6.96	175.2	177.4	164.9	172.5
7.20	176.9	176.5	182.3	178.6
7.44	167.7	184.1	168.2	173.3
7.68	161.2	175.4	180.3	172.3
7.92	172.6	177.1	180.5	176.7
8.16	169.1	173.0	184.7	175.6
8.40	176.3	165.1	175.5	172.3

## ประวัติผู้เขียน

นายเอกราช ชุ่นสั้น เกิดเมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดตรัง จบการศึกษาระดับประถมศึกษาและระดับมัธยมตอนต้น จากโรงเรียนครูโณทัย จังหวัดตรัง จากนั้น เริ่มศึกษาต่อในระดับมัธยมตอนปลาย ที่โรงเรียนวิเชียรมาตุ จังหวัดตรัง และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ.2555 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2555 และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ.2559

ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2559 ขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งทำให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ SOUTH EAST ASIAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM SYMPOSIUM 2020 (SEATUC 2020) ครั้งที่ 14 ประจำปี พ.ศ.2563

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี