



การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม โดยการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์  
Hardfacing of 3.5% Cr Steel by Flux Cored Wire Arc Welding Process

ธีรโชติ ตรีเกรี

Teerachod Treeparee

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Materials Engineering  
Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



**การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม โดยการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์**  
**Hardfacing of 3.5% Cr Steel by Flux Cored Wire Arc Welding Process**

**ธีรโชติ ตรีเกรี**

**Teerachod Treeparee**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา**

**วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ**

**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**Master of Engineering in Materials Engineering**

**Prince of Songkla University**

**2561**

**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

ชื่อวิทยานิพนธ์      การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม โดยการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์  
 ผู้เขียน                นายธีร โชติ ศรีเกียร  
 สาขาวิชา              วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
.....	.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)	(ดร.สมใจ จันทร์อุดม)
	..... กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)
	..... กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล)
	.....กรรมการ
	(ดร.กนิษฐ ตะปะสา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
 วัสดุ

.....  
 (ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ศักดิ์ ฟ้ารุ่งสว่าง)  
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายธีร โชติ ตรีเกรี)

นักศึกษา



ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายธีรโชติ ศรีเกรี)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม โดยการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์
ผู้เขียน	นายธีรโชติ ตรีเกียร
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2560

### บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกแข็งเป็นเทคนิคหลักในการปรับปรุงและยืดอายุการใช้งานสำหรับพื้นผิวของเครื่องไม่ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ ซึ่งงานวิจัยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของชั้นพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยงานวิจัยนี้มีการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมเข้าไปด้วย การเชื่อมด้วยกัน 2 แบบคือการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ มีการวิเคราะห์หลักได้แก่ โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค การทดสอบความแข็งและการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี ในการทดลองจะมีลวดเชื่อม 2 ชนิด ได้แก่ ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกในการเชื่อมชั้นรองพื้นและลวดเชื่อมเหล็กกล้าชนิดมาเทนซิติกในการเชื่อมชั้นพอกแข็ง การเชื่อมทั้งหมดมี 16 เงื่อนไข การเชื่อมชั้นพอกแข็งเชื่อม 1 ชั้น และ 3 ชั้น การให้ความร้อนชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย ไม่อุ่นชิ้นงาน อุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส 300 องศาเซลเซียส และ 350 องศาเซลเซียส โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงานตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีของชั้นพอกแข็งตามมาตรฐาน ASTM G65 จากผลการทดสอบพบว่าไม่พบข้อบกพร่องในบริเวณกระทบริ้อนและบริเวณอื่นๆ บริเวณกระทบริ้อนมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ลักษณะคล้ายเข็มซึ่งการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมช่วยลดการเกิดปริมาณมาร์เทนไซต์บริเวณนี้ โครงสร้างชั้นรองพื้นมีโครงสร้างเป็นออสเทนนิติก ในส่วนของโครงสร้างชั้นพอกแข็งมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนซิติกซึ่งโครงสร้างนี้มีความแข็งแรงช่วยในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีได้ดี โครงสร้างการเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติมีความต้านทานการสึกหรอสูงการเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติ เนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซต์มากกว่าจึงทำให้มีค่าความแข็งมากกว่า นอกจากนี้การเชื่อมพอกแข็งแบบ 3 ชั้นมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบ 1 ชั้น เนื่องจากเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้นน้อยกว่า โดยงานวิจัยนี้สภาวะการเชื่อมพอกแข็งที่ดีที่สุดคือการเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น

**Thesis Title**                      Hardfacing of 3.5% Cr Steel by Flux Cored Wire Arc Welding Process  
**Author**                                Teerachod Treeparee  
**Major Program**                    Materials Engineering  
**Academic Year**                    2017

### ABSTRACT

Hardfacing weld is a technique which mainly extends the service life of engineering components. The purpose of this research is to study wear behavior of hardfacing welded on 3.5% chromium cast steel by Flux Cored Wire Arc Welding (FCAW) process. Preheating was also done in this study. Automatic and semiautomatic welding processes were conducted in the present research. Macrostructure, microstructure, micro-hardness and abrasive wear resistance of the welded sample were studied. Austenitic stainless steel and martensitic hardfacing wire electrodes were chosen to deposit as the buffer and hardfacing layer respectively. Sixteen parameters in welding procedure were investigated. Single layer and three layer hardfacing were deposited. Four different kinds of preheating temperature included without preheating (room temperature), 250 °C, 300 °C and 350 °C were applied. Optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM) were used to characterize the microstructure of hardfacing. These results showed that there was no defect in the Heat Affected Zone (HAZ) and welded layers. HAZ of the base metal revealed needle shape martensite microstructure. Preheating of the base metal reduce quantity of martensite phase in HAZ. Buffer layer showed the austenitic microstructure with grain boundaries. Martensitic steel type electrode was used to weld all hardfacing layers because of its high hardness and good abrasive wear resistance. The abrasive wear resistance of hardfacing deposits was determined by dry sand rubber wheel machine according to procedure A of ASTM G65 standard. Comparing semi-automatic process to automatic process, abrasive wear resistance of the sample welded using semi-automatic process was higher than that of the sample welded using automatic process due to martensite content and hardness of hardfacing. Moreover, the abrasive wear resistance of three layers hardfacing was totally better than that of single layer hardfacing because single layer hardfacing was more diluted with buffer layer than three layers hardfacing. Eventually, the best condition in this research is semiautomatic process with three layers hardfacing.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องด้วยการประสิทธิประสาทความรู้และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาตรวจทานและให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในการเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์แลเครื่องมือในการทำการวิจัยและให้การสนับสนุนเงินทุน

ธีร โชติ ตรีเกรี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 เป้าหมายของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎี	4
2.1.1 การสึกหรอ	4
2.1.2 ลักษณะของภาวะและวัสดุที่กระทำกับชิ้นส่วน	4
2.1.3 ประเภทของการสึกหรอ	7
2.1.4 การควบคุมการสึกหรอ	9
2.1.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสึกหรอ	10
2.1.6 การเชื่อมพอกแข็ง	10
2.1.7 การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์	11
2.2 โลหะวิทยาของเนื้อโลหะพอกแข็ง	15
2.2.1 โลหะวิทยาแนวเชื่อม	15
2.2.2 โลหะวิทยาของเนื้อโลหะพอกแข็ง	16
2.3 การเลือกลวดเชื่อม	16
2.3.1 ลวดเชื่อมรองพื้น	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 การเลือกลวดเชื่อมพอกแข็ง	17
2.4 บทบาทของธาตุผสมแต่ละชนิด	18
2.5 การทดสอบความแข็ง	20
2.6 การทดสอบการสึกหรอ	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	26
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย	26
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	35
3.3 การเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม	35
3.4 กรรมวิธีการเชื่อม	36
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค	40
3.6 การวัดปริมาณมาร์เทนไซต์	42
3.7 การตรวจสอบค่าความแข็ง	44
3.8 การตรวจสอบการสึกหรอแบบขัดสี	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	46
4.1 โลหะฐาน	46
4.2 ลักษณะทางกายภาพของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ	47
4.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคแต่ละเงื่อนไข	48
4.4 ปริมาณของเฟสมาร์เทนไซต์	60
4.5 ผลการตรวจสอบความแข็ง	61
4.6 ผลการตรวจสอบการสึกหรอแบบขัดสี	67
4.7 เปรียบเทียบผลของการเชื่อมพอกแข็งโดยใช้กระบวนการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์ กับการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการทดลอง	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
บรรณานุกรม	73

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	75
ก ค่าความแข็งของการเชื่อมแต่ละเงื่อนไข	75
ข บทความวารสาร	106
ประวัติผู้เขียน	122

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของโลหะฐาน โลหะรองพื้น และโลหะพอกแข็ง	17
2.2 โลหะพอกแข็ง	18
2.3 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าผสมโครเมียม – โมลิบดีนัม (ในสภาพนอร์มัลไรซิง – ออบคาลาย)	22
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม	26
3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมชั้นรองพื้น	27
3.3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง	27
3.4 ตัวแปรของอุปกรณ์ทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี	34
3.5 ตัวแปรการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม	38
3.6 เงื่อนไขการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม	38
4.1 ส่วนผสมทางเคมีของแต่ละสเปคตรัมของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1	59
4.2 ส่วนผสมทางเคมีของแต่ละสเปคตรัมของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3	59
4.3 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีของการเชื่อมพอกแข็ง 3.5 % โครเมียม	68



## รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องบดถ่านหินที่ใช้งานในเมืองแม่เมาะ	1
1.2 พินโม้ของเครื่องบดถ่านหิน	2
2.1 พื้นฐานการเสียดทาน	4
2.2 การสัมผัสกันแบบไถล	5
2.3 ลักษณะการสัมผัสแบบกึ่ง	5
2.4 ลักษณะการสัมผัสแบบกึ่งผสมไถล	6
2.5 การหมุน	6
2.6 การสัมผัสแบบการกระแทก	7
2.7 สองวัตถุที่สัมผัสกันโดยตรง	7
2.8 การสัมผัสที่มีตัวกลาง	7
2.9 การเกิดการสึกหรอบนผิวกับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและการทำงานของพินโม้	9
2.10 การเกิดการสึกหรอจากการกระแทก	9
2.11 กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมใส่ฟลักซ์	12
2.12 หน้าตัดของลวดเชื่อม	13
2.13 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค	15
2.14 โครงสร้างแบบอสเทนนิติก	17
2.15 โครงสร้างมาร์เทนซิติก	18
2.16 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	21
2.17 ใคอะแกรมเครื่องมือทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65	22
2.18 ฟังไคอะแกรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่ของเหล็กกล้าโครเมียม 2.25 Cr-1 Mo	23
3.1 เหล็กกล้า 3.5 % โครเมียม	26
3.2 เครื่องเชื่อมและชุดป้อนลวด	28
3.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	28
3.4 แผ่นให้ความร้อนเซรามิก	29
3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน	29
3.6 เครื่องตัดไฟเบอร์	30
3.7 เครื่องกัดแนวตั้ง	30

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 เครื่องขัดชิ้นงาน	31
3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	32
3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	32
3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	33
3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	33
3.13 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี	34
3.14 แผนผังแสดงขั้นตอนดำเนินการวิจัยของการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม	35
3.15 ชิ้นงานเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมก่อนการเชื่อม	36
3.16 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อม	37
3.17 ตัวทำความร้อนเซรามิกแผ่น	37
3.18 รูปแบบการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม	39
3.19 ชิ้นงานหลังการเชื่อม	40
3.20 ชิ้นงานแสดงรูปแบบการตัด	40
3.21 ชิ้นงานที่ทำเรือนแบบเย็น	41
3.22 การขัดชิ้นงานด้วยผงอลูมินา	41
3.23 วิธีการเปลี่ยนรูปโครงสร้างจุลภาคเป็น 8 บิต	42
3.24 เปลี่ยนเป็นรูปภาพแบบขาวดำ	42
3.25 การเซตสเกลของรูปโครงสร้างจุลภาค	43
3.26 วิธีการกดคำสั่ง Threshold	43
3.27 ปรับค่าเฉลี่ยและปรับ B&W	43
3.28 การกดคำสั่ง Analyze Particles	44
3.29 ผลของการประมาณผลและแสดงค่าของปริมาณมาร์เทนไซต์	44
3.30 ชิ้นทดสอบการสึกหรอ	45
4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม กำลังขยาย 200 เท่า	46
4.2 ลักษณะทางกายภาพหลังการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ	47
4.3 ลักษณะทางกายภาพหลังการเชื่อมแบบอัตโนมัติ	47

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 โครงสร้างมหภาค (ก) NP-1-1-S (ข) 250-1-1-S (ค) 300-1-1-S (ง) 350-1-1-S (จ) NP-1-1-A (ฉ) 250-1-1-A (ช) 300-1-1-A (ซ) 350-1-1-A	48
4.5 โครงสร้างมหภาค (ก) NP-1-1-S (ข) 250-1-1-S (ค) 300-1-1-S (ง) 350-1-1-S (จ) NP-1-1-A (ฉ) 250-1-1-A (ช) 300-1-1-A (ซ) 350-1-1-A	49
4.6 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบของการอุ้มน้ำที่อุณหภูมิ (ก) ไม่มีการอุ้มน้ำ (ข) 250 °C (ค) 300 °C (ง) 350 °C	50
4.7 โครงสร้างจุลภาคของชั้นรองพื้น	51
4.8 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 (ก) NP-1-1-S (ข) 250-1-1-S (ค) 300-1-1-S (ง) 350-1-1-S	52
4.9 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 (ก) NP-1-1-A (ข) 250-1-1-A (ค) 300-1-1-A (ง) 350-1-1-A	53
4.10 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 (ก) NP-1-3-S (ข) 250-1-3-S (ค) 300-1-3-S (ง) 350-1-3-S	54
4.11 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 (ก) NP-1-3-A (ข) 250-1-3-A (ค) 300-1-3-A (ง) 350-1-3-A	55
4.12 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 (ก) NP-1-3-S (ข) 250-1-3-S (ค) 300-1-3-S (ง) 350-1-3-S	56
4.13 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 (ก) NP-1-3-A (ข) 250-1-3-A (ค) 300-1-3-A (ง) 350-1-3-A	57
4.14 มุมมองการตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของผิวด้านบน	57
4.15 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 (ก) ผิวด้านบน (ข) ด้านตามขวาง	58
4.16 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 (ก) ผิวด้านบน (ข) ด้านตามขวาง	58
4.17 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1	59
4.18 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3	59
4.19 ปริมาณของเฟสคาร์บอนไฮดรอกซีของการเชื่อมพอกแข็ง	60
4.20 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น โดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ	61
4.21 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น โดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ	62

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น โดยการเชื่อมแบบอัตโนมัติ	63
4.23 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น โดยการเชื่อมแบบอัตโนมัติ	64
4.24 ค่าความแข็งผิวด้านบนของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น	65
4.25 ค่าความแข็งผิวด้านบนของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น	65
4.26 น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ	66

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในอุตสาหกรรมด้านเหมืองแร่ อุปกรณ์หลัก เช่น เครื่องบด (Crusher) เกิดการสึกหรออย่างมาก จึงต้องการที่จะป้องกันผิวของเครื่องบดไม่ให้เกิดการสึกหรอเร็ว เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายของการหยุดทำงานของเครื่องจักร และลดค่าใช้จ่ายสำหรับการซื้อชิ้นส่วนสำรองซึ่งมีราคาสูง การต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีและการกระแทกจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ เพื่อยืดระยะเวลาของเครื่องจักรและอุปกรณ์ให้ใช้ได้ยาวนานและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในด้านเหมืองแร่มีการทำงานของเครื่องบด (รูปที่ 1.1) ในแต่ละวันมีการใช้งานเครื่องบดเป็นเวลาหลายชั่วโมงทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องบดและเมื่อมีการสึกหรอเกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องบดลดลง และในที่สุดก็ใช้งานเครื่องบดนั้นไม่ได้ ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนเครื่องบดใหม่ทำให้ต้องมีการเสียค่าใช้จ่ายสูง



รูปที่ 1.1 เครื่องบดถ่านหินที่ใช้งานในเหมืองแม่เมาะ

ในปัจจุบันเหมืองแม่เมาะมีเครื่องโม่ถ่านหิน ซึ่งทำงานต่อเนื่องเป็นเวลาหลายชั่วโมงต่อหนึ่งวัน ซึ่งเมื่อมีการใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง จะพบว่ามีการสึกหรอของฟันโม่ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานต่ำลง และในที่สุดจะใช้งานไม่ได้ ทำให้ต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนนั้นใหม่ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการเปลี่ยนแต่ละครั้ง ดังนั้น เมื่อเกิดการสึกหรอของบริเวณผิวของฟันโม่จึงต้องมี

การซ่อมเพื่อลดค่าใช้จ่าย ในปัจจุบันกระบวนการที่ใช้ในการเชื่อมซ่อมคือกระบวนการเชื่อมแบบ ลวดหุ้มฟลักซ์อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระบวนการนี้มีอัตราการเติมเนื้อเชื่อมที่ช้า และสมบัติ ทางด้านโลหะวิทยาที่ดีในระดับหนึ่ง มีความต้านทานการสึกหรอที่ต่ำ และประสิทธิภาพทางด้าน ความร้อนที่สูญเสียสูง



(ก)

(ข)

**รูปที่ 1.2** ฟันโม้มของเครื่องบดถ่านหิน (ก) ฟันโม้มเดิม (ข) ฟันโม้มที่เกิดสึกหรอ

จากปัญหาข้างต้นทำให้เกิดแนวคิดที่จะซ่อมฟันโม้มของเครื่องโม่ถ่านหินโดยการเติมเนื้อเชื่อมที่เกิดจากการสึกหรอด้วยกระบวนการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์ซึ่งมีอัตราในการเติมเนื้อเชื่อมที่สูงกว่า และอาจมีสมบัติด้านโลหะวิทยาและสมบัติด้านทานการสึกหรอดีกว่าเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบลวดหุ้มฟลักซ์ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่เหมือนแม่เมาะใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์มีการใช้ลวดเชื่อมทั้งหมด 2 ชนิด คือ ลวดเชื่อมเหนียวใช้สำหรับเชื่อมชั้นรองพื้น (Buffer) และลวดเชื่อมชนิดแข็งใช้สำหรับเชื่อมชั้นพอกแข็ง (Hardfacing) ซึ่งมีการเชื่อมทั้งหมด 2 รูปแบบคือ การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ และแบบอัตโนมัติ พร้อมทั้งหาอุณหภูมิของการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheating) ที่เหมาะสมต่อการเชื่อมพอกแข็ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเชื่อมพอกแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติด้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง

1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง

## 1.3 เป้าหมายของงานวิจัย

1.3.1 ได้วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมพอกแข็งที่เหมาะสม

1.3.2 ได้ทราบถึงกรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็งที่ถูกต้องและเหมาะสม

## 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1 ทราบกรรมวิธีที่ถูกต้องและเหมาะสมในการเชื่อมพอกแข็งแบบลวดไส้ฟลักซ์

1.4.2 ทราบตัวแปรในการเชื่อมพอกแข็งแบบลวดไส้ฟลักซ์

1.4.3 ทราบถึงการต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีและ โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็งแบบลวดไส้ฟลักซ์

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

โดยศึกษาขั้นตอนการเชื่อมพอกแข็งเพื่อป้องกันการสึกหรอแบบขัดสีของชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม

โดยการเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม โดยใช้ลวดเชื่อมรองพื้นและลวดเชื่อมพอกแข็ง ซึ่งใช้กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ การเชื่อมมีทั้งเชื่อมแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ หลังจากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางด้านโลหะวิทยาเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคและในส่วนสุดท้ายทำการทดสอบความแข็งด้านโลหะ (Hardness) และ ความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear Resistance)

## 1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ทบทวนเอกสารต่างๆ และออกแบบทดลอง

1.6.2 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ในการทดลองเบื้องต้น รวมทั้งดำเนินการเชื่อม

1.6.3 ทำการทดลองหาค่าสมบัติทางด้านโลหะวิทยา ได้แก่ โครงสร้างทางจุลภาค และ โครงสร้างมหภาค ของบริเวณเนื้อเชื่อม และบริเวณที่มีผลกระทบอื่น

1.6.4 ทำการทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งและการต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี

1.6.5 วิเคราะห์ผลการทดลองและทำการทดลองซ้ำ

1.6.6 สรุปและจัดรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์

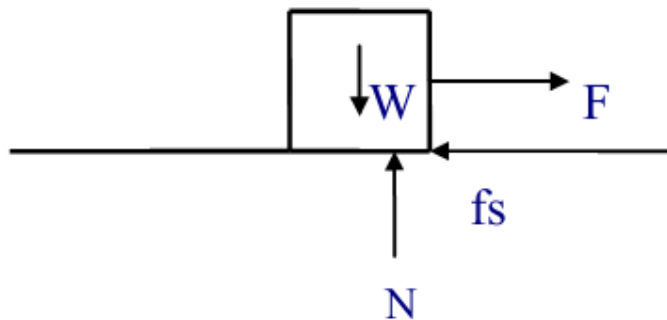
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เหมือนแม่เมาะใช้เครื่องโม่ถ่านหินชนิดโม่เตี้ยและเกิดการสึกหรอที่บริเวณพื้น โม่แต่ละบริเวณไม่เท่ากันแต่การเชื่อมในปัจจุบันนี้ทำให้เกิดการสึกหรอแบบเดิมได้อีกแต่ถ้าหากใช้ความรู้การเชื่อมพอกแข็ง เข้ามาช่วยปรับปรุงจากวิธีเดิมเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วน เกิดการสึกหรอเท่ากันทั้งชิ้นงาน และมีประสิทธิภาพในการใช้งานหลังจากการเชื่อมสูงขึ้น

#### 2.1 ทฤษฎี

2.1.1 การสึกหรอ (Wear) [1] คือ การสูญเสียเนื้อวัสดุจำนวนหนึ่งออกไปจากชิ้นวัตถุโดยไม่ปรารถนา โดยกลไกทางกลเกิดจากผิววัสดุเคลื่อนที่สัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.1

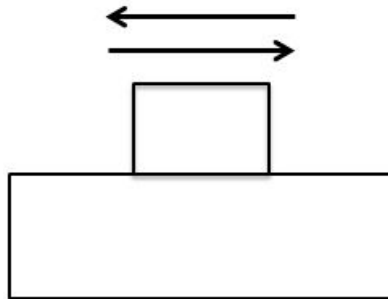


รูปที่ 2.1 พื้นฐานการเสียดทาน [1]

2.1.2 ลักษณะของภาวะและวัตถุที่กระทำกับชิ้นส่วน คือ ลักษณะการสัมผัสระหว่างการสึกหรอกับวัสดุ เป็นการทำงานของชิ้นส่วนที่สัมผัสกันระหว่าง ซึ่งสามารถแยกตามลักษณะของวิธีการสัมผัสดังนี้ [1]

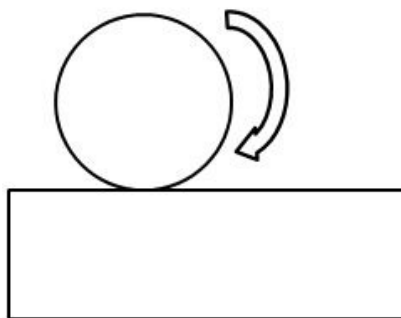
(1) การสัมผัสแบบไถล (Slide Contact) การสัมผัสกันของวัตถุ 2 ผิวสัมผัสทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส พฤติกรรมของการสึกหรอขึ้นกับ ชนิดของวัตถุ แรงที่กดลงบนผิว ความเร็วในการเสียดสี วัสดุที่ทนทานต่อลักษณะการสัมผัสดังกล่าว ต้องมีความแข็งแรงกดสูงมีความแข็งสูง ลักษณะของการสึกหรอจากการสัมผัสดังกล่าว จะเป็นการสึกหรอดังในรูปที่ 2.2





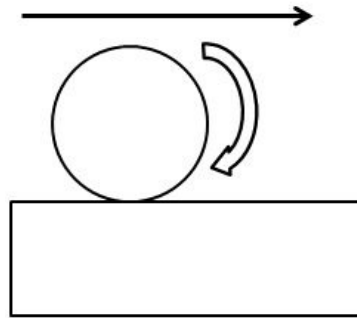
รูปที่ 2.2 การสัมผัสกันแบบไถล [1]

(2) การสัมผัสแบบกลิ้ง (Rolling Contact) การสัมผัสกันของวัตถุ 2 ผิวสัมผัสที่ผิวหนึ่ง มีลักษณะกลมและมีการกลิ้งไปบนอีกผิวหนึ่ง ทำให้เกิดแรงกดสูงมากระหว่างที่ผิวสัมผัสกัน ขณะเดียวกันก็เกิดความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ซึ่งผลให้เกิดการชำรุดในลักษณะแตกร้าวได้ผิว และหลุดออกเป็นแผ่นบางๆ ซึ่งวัสดุที่จะทนทานต่อการสัมผัสดังกล่าวต้องมีความแข็งแรงการดึงสูงมากถึง 2-3 จิกะปาสคาล และมีความแข็งสูง 50 ร้อยเคลสเกลซีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



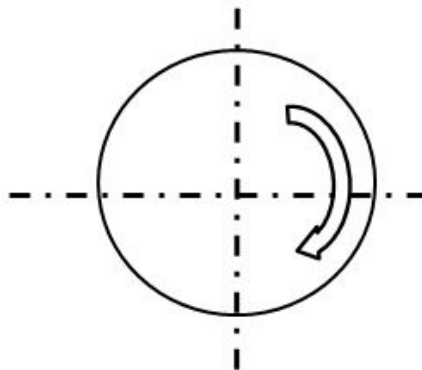
รูปที่ 2.3 ลักษณะการสัมผัสแบบกลิ้ง [1]

(3) การสัมผัสแบบกลิ้งผสมไถล (Rolling/Sliding Contact) เป็นการสัมผัสของวัตถุในลักษณะของการผสมกันทั้งการกลิ้งและลื่นไถลไปพร้อมๆ กัน เช่นการเคลื่อนที่ของเม็ดลูกปืนในรางของตลับลูกปืน ลักษณะของการสึกหรอจากการสัมผัสดังแสดงในรูปที่ 2.4



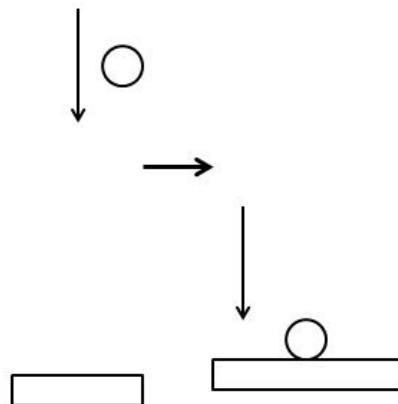
รูปที่ 2.4 ลักษณะการสัมผัสแบบกลิ้งผสมไถล [1]

(4) การหมุน (Rotation) เป็นการสัมผัสของโลหะจากการหมุนของเพลา (Shaft) หมุด (Pin) กับชิ้นส่วนประกอบเช่น แบริ่ง (Bearing) บุช (Bushing) ปลอกเก็ลิว (Sleeve) หรือการทำงานที่ลักษณะที่คล้ายกัน ซึ่งการสึกหรอที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะการสึกหรอแบบขัดสี ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การหมุน [1]

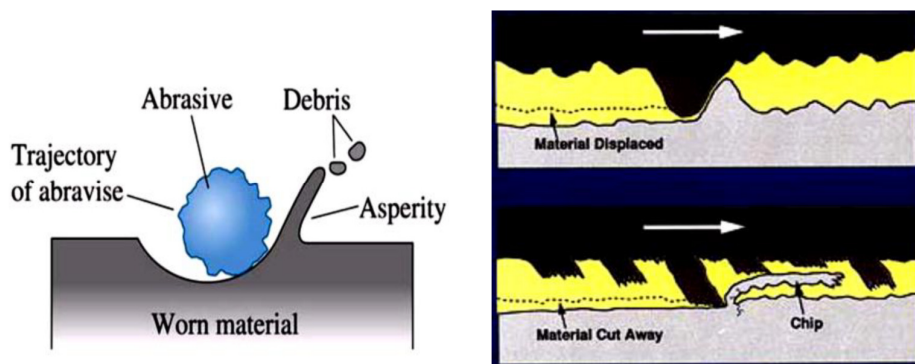
(5) การสัมผัสแบบกระแทก (Impact) การสัมผัสกันของวัตถุ ซึ่งอาจจะเป็นของแข็งกับของแข็ง ของเหลวกับของแข็ง ที่มีความเร็วเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ผิวที่ถูกระแทก เกิดการเสียรูป เปลี่ยนขนาด และแตกร้าวทั้งบนผิวและใต้ผิว ซึ่งการสึกหรอที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะการสึกหรอแบบกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การสัมผัสแบบการกระแทก [1]

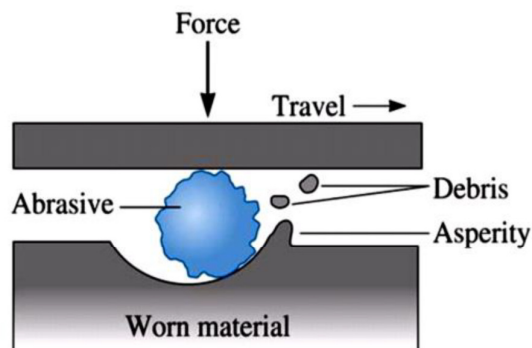
ความสัมพันธ์การสัมผัสกันของชิ้นส่วนไม่ว่าจะเป็นโลหะกับวัสดุอื่นๆ หรือโลหะกับโลหะ เช่น ถ่านหิน ทราาย เป็นต้น สามารถแบ่งความสัมพันธ์ได้ 2 ประเภทได้ดังนี้

1. ความสัมผัส 2 วัตถุ (Two-Body) [1] เกิดจากการสัมผัสกัน ระหว่างวัตถุกับชิ้นงาน โดยตรง เช่น รางกับทราาย รถตักกับทราาย ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สองวัตถุที่สัมผัสกันโดยตรง [2]

2. การสัมผัสที่มีตัวกลาง (Three-Body) [1] เกิดการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับวัตถุ โดยที่ ชิ้นงานมี 2 ชิ้นและมีวัตถุอยู่ตรงกลางระหว่างวัตถุทั้ง 2 เช่น เครื่องไม้อ่านหิน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การสัมผัสที่มีตัวกลาง [3]

2.1.3 ประเภทของการสึกหรอ (Type of Wear) สำหรับการสึกหรอ จะมีลักษณะที่แตกต่างกันตามลักษณะกลไกการเกิด โดยแบ่งประเภทการสึกหรอได้ดังนี้

1. การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear)
2. การสึกหรอที่เกิดจากการกระแทก (Impact Wear)
3. การสึกหรอแบบกัดกร่อน (Erosion)
4. การสึกหรอที่เกิดจากโลหะสัมผัสโลหะ (Metal to Metal Contact Wear)

การสึกหรอแบบขัดสี [1] คือ การสึกหรอที่เกิดจากวัตถุที่มีค่าความแข็งสูงเคลื่อนที่ผ่านอีกวัตถุหนึ่งโดยมีแรงกระทำส่งผลให้วัตถุนั้นเกิดการเสียนเนื้อไป

#### สมการการสึกหรอจากการขัดสี

สมการการสึกหรอจากการขัดสีดังสมการที่ 1

เมื่อให้  $V$  เป็นอัตราปริมาตรการสูญหายของเนื้อวัสดุต่อหน่วยความยาวของการไถล

$$V = K \frac{WL}{H} \quad (1)$$

เมื่อ  $L$  = ระยะของการไถล

$W$  = ภาระที่กระทำ โดยวัสดุ

$H$  = ความแข็งของผิววัตถุ

$K$  = สัมประสิทธิ์การสึกหรอ

ดังนั้น อัตราการสูญหายของเนื้อวัตถุขึ้นอยู่กับ ปริมาณภาระที่กระทำ ความแข็งของวัตถุ ชนิดวัสดุ และขนาดที่เคลื่อนที่ผ่าน

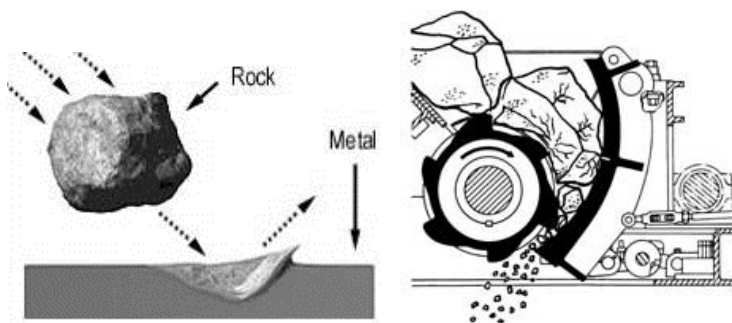
ประเภทของการสึกหรอแบบขัดสี แบ่งออกเป็นดังนี้

1. การสึกหรอแบบครูด (Gouging Abrasion)

2. การเสียดสีแบบความเค้นต่ำ (Low Stress Abrasion)

3. การเสียดสีความเค้นสูง (High Stress Abrasion)

1. การสึกหรอแบบครูด เป็นการสึกหรอแบบสองมิติ (2 Body Wear) เกิดจากมุม ขอบที่แข็งแกร่งเคลื่อนที่ครูด ขีด บนผิวของชิ้นงาน ด้วยแรงที่สูงทำให้จุดที่เกิดการขูดขีดมีความเค้นสูง (High Stress) เช่น ฟันขูด ฟันบด ฟันม่ หัวเจาะกรณีการสึกหรอที่ศึกษาเป็นการสึกหรออยู่ในกลุ่มของการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear) แบบครูด (Gouging Wear) ดังรูปที่ 2.9

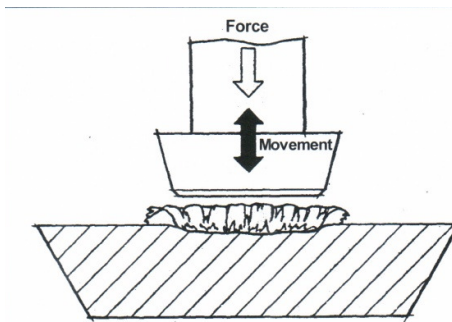


รูปที่ 2.9 การเกิดสึกหรอแบบครูดของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและการทำงานของฟันม่ [1]

2. การเสียดสีแบบความเค้นต่ำ เกิดจากวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุ และมุม ขูด ให้เนื้อวัสดุค่อยๆ หลุดหายอย่างช้าๆ อัตราการสูญเสียเนื้อขึ้นอยู่กับ อัตราการเคลื่อนที่ เกิดขึ้นกับ แรงต่งแร่ กระบะรถกระทุก บั้งกีรกดักทรายเล็ก

3. การเสียดสีความเค้นสูง เกิดการขูดขีดครูดภายใต้ความเค้นสูง ทำให้เกิดมีความเค้นเฉพาะจุดบนวัตถุจึงเกิดการแตกหลุดของเนื้อไป เช่น เสื่อสูบกับลูกสูบ เพลากับแบร้ง

การสึกหรอจากการกระแทก เป็นภาวะที่เกิดจากวัตถุที่มีความเร็วว้งมากระแทก (Impact) กับชิ้นส่วน ดังรูปที่ 2.10 ทำให้มีการถ่ายเทพลังงานจลน์ จากวัตถุเข้าสู่ชิ้นงาน ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นรูปของแรงกด ที่มีขนาดสูง ทำให้บริเวณที่ถูกกระแทก มีความเค้นสูงจากผลของความเค้นสัมผัส (Contact Stress) เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) ซึ่งเป็นจุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress) บริเวณใต้ผิว เนื่องจาก ความแข็งแรงคลากทางแนวเฉือน (Shear yield Strength) ของวัสดุกลุ่มเหล็ก จะมีค่าเป็น 0.67 ของ ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และความแข็งแรงทางแนวเฉือน (Shear Strength) จะมีค่าน้อยกว่า 0.8 ของความต้านทานแรงดึง[1]



รูปที่ 2.10 การลิกหรือแบบกระแทก [4]

#### 2.1.4 การควบคุมการลิกหรือ [1]

ความเสียหายและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการลิกหรือ ในแต่ละปีหลายร้อยล้านบาทที่ต้องสูญเสียไป เพื่อที่ควบคุมค่าใช้จ่าย ลดต้นทุนการบำรุงรักษา ช่วยให้ต้นทุนของการผลิตลดลง ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น การควบคุมการลิกหรือจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่ระบบ

จะเห็นได้ว่าแรงที่กระทำต่อวัสดุกับความแข็งของวัสดุเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้อัตราการลิกหรือสูง

**แรงที่กระทำต่อวัสดุ** เป็นตัวแปรที่ควบคุมยากเนื่องจากแต่ละเครื่องจักรมีการทำงานไม่เหมือนกัน

**ความแข็งของวัสดุ** ในส่วนของความแข็งของวัสดุเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากถ้าวัสดุนั้นมีค่าความแข็งที่สูงจะช่วยให้การลิกหรือลดลงด้วย และเมื่อค่าความแข็งที่ได้สูงวัสดุนั้นสามารถใช้งานได้นานและมีประสิทธิภาพสูงในการใช้งาน

**กระบวนการเชื่อม** ใช้กระบวนการเชื่อมพอกผิว การเชื่อมพอกผิวช่วยซ่อมแซมที่หลุดหรือเสียหายออกไปของวัสดุนั้นเพื่อป้องกันการลิกหรือที่เกิดจากการเสียดสีอีกด้วย โดยการเลือกลวดเชื่อมเพื่อนำไปใช้ในการเชื่อมซ่อมส่วนที่ลิกหรือไป สำหรับลวดเชื่อมพอกแข็ง มีความแข็ง 48-67 ร็อกเวลสเกลซี ซึ่งมีลักษณะเด่นในการเชื่อม คือ

1. เลือกใช้วิธีการเชื่อมได้หลายวิธี เช่น การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ การเชื่อมทิก มิก การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ และการเชื่อมแบบอาร์กใต้ฟลักซ์
2. ทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน เชื่อมที่หน้างานได้
3. สำหรับค่าใช้จ่ายในการเชื่อมพอกผิวถูกมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ
4. สามารถทำซ้ำได้ เมื่อชิ้นงานเดิมลิกหรือ

### 2.1.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสึกหรอ [1]

1. ความแข็งของโลหะ โครงสร้างของเนื้อโลหะ
2. ขนาดของเกรนและรูปร่างของเกรน ในปริมาณของเกรน และการกระจายตัวของเกรน ในเนื้อโลหะ ความคมของเกรน ความแข็งของเกรน
3. ชนิดของวัตถุที่สัมผัสโลหะขนาดของแรง ระยะทางการเคลื่อนที่
4. ชนิดของการสึกหรอ
5. ความสูงของการตกกระทบ ความเร็วในการตกกระทบ มุมตกกระทบ
6. อัตราการไหล
7. อุณหภูมิ
8. ความชื้น

### 2.1.6 การเชื่อมพอกแข็ง [4]

การเชื่อมพอกแข็งคือ การเติมเนื้อโลหะลงบนเนื้อโลหะเดิมโดยกระบวนการเชื่อมเพื่อป้องกันการสึกหรอหรือเติมเนื้อที่หายไป เป็นใช้วิธีการเชื่อมวัสดุที่มีความแข็งสูงทนทานต่อการสึกหรอ ลงบนชิ้นส่วนที่ต้องการ เพื่อให้ชิ้นส่วนนั้นมีความต้านทานต่อการสูญเสียเนื้อ โดยที่เนื้อโลหะของชิ้นส่วนเครื่องจักรไม่เกิดการสึกหรอ

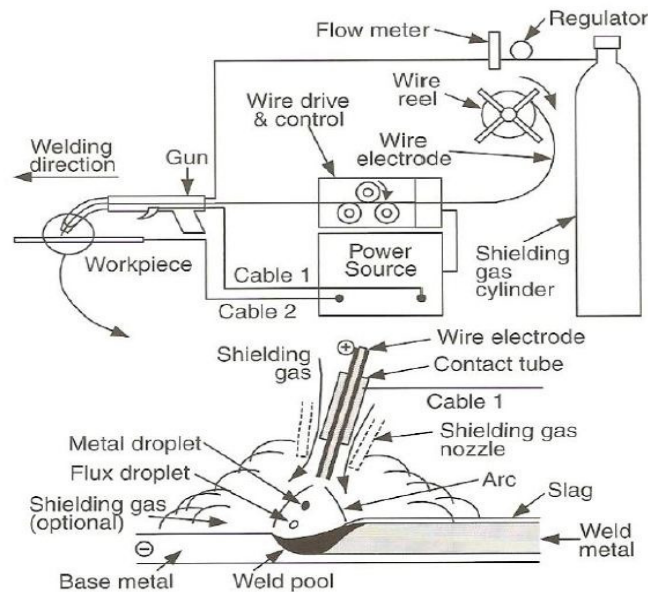
#### วัตถุประสงค์ของการเชื่อมพอกแข็ง [4]

1. ลดต้นทุนการผลิต โดยสามารถลดต้นทุนประมาณ 25-70 เปอร์เซ็นต์ ของการเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่
2. ยืดอายุการใช้งาน 30-300 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเดิมของชิ้นส่วนที่ไม่เชื่อมพอกแข็ง
3. ลดเวลาการซ่อมบำรุง ซึ่งการเปลี่ยนชิ้นส่วนใช้เวลานานกว่าการเชื่อมพอกแข็ง
4. ลดปริมาณอะไหล่สำรอง เนื่องจากสามารถใช้การเชื่อมพอกแข็งทดแทนชิ้นส่วนใหม่ได้

### 2.1.7 การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Wire Arc Welding, FCAW)

การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ซึ่งใช้เชื่อมพอกผิวแข็งเพื่อป้องกันการสึกหรอ โดยการใส่ผงฟลักซ์ที่เป็นธาตุผสมในแกนของลวดเชื่อมเหล็กกล้า

หลักการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยทั่วไปจะเหมือนกับการเชื่อมมิกและแมกที่ใช้ลวดเชื่อมตัน โดยเป็นการเชื่อมแบบหลอมละลาย ลวดเชื่อมซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นโลหะ และมีฟลักซ์ที่เป็นธาตุผสมอยู่ในแกนกลางของลวด การเชื่อมจะเริ่มต้นด้วยการจุดอาร์คระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ความร้อนที่ได้จากการอาร์คก็จะทำให้โลหะและลวดเชื่อมหลอมละลาย [3]



รูปที่ 2.11 กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

#### เหตุผลในการเลือกการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

กระบวนการนี้มีอัตราการเติมเนื้อที่สูง สามารถเชื่อมได้ต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพทางความร้อนที่สูง เมื่อเทียบกับกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ การเชื่อมด้วยลวดไส้ฟลักซ์สามารถเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ และอัตโนมัติได้ ฟลักซ์ที่อยู่แกนกลางของลวดช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านโลหะวิทยาที่ดีขึ้น เช่นการเติม นิกเกิล โครเมียม โมลิบดีนัม แมงกานีส เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลและสมบัติทางโลหะวิทยาของเนื้อเชื่อม การอาร์คเรียบ

#### หลักการของการเชื่อมมิกแมกและการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ [5]

การเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์มีข้อดีในด้านอัตราการเติมเนื้อเชื่อมที่สูงและทางด้านโลหะวิทยาที่ดีกว่าการเชื่อมแบบลวดหุ้มฟลักซ์เนื่องจากฟลักซ์ที่อยู่ในลวดช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านโลหะวิทยาที่ดีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่ใช้แก๊สคลุม ทว่าไปใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) หรือ แก๊สอาร์กอนผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ar} + \text{CO}_2$ )
2. การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่ไม่ใช้แก๊สคลุม (Self-Shielded Flux Core Wire)



### คุณลักษณะของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะมีลักษณะคล้ายกับท่อ แสดงดังรูป 2.12 โดยจะมีส่วนที่เป็นโลหะหุ้มอยู่ข้างนอกและมีผงฟลักซ์อยู่ด้านใน โดยที่ผงฟลักซ์จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของลวดเชื่อม [5]

#### หน้าที่ของผงฟลักซ์ที่แกนลวดเชื่อม [5]

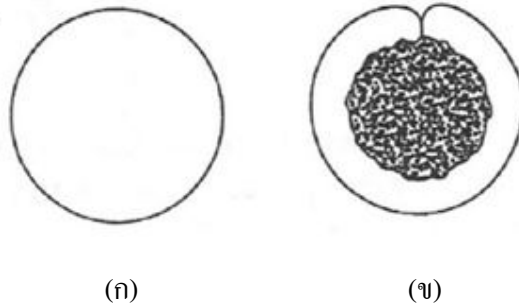
1. ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของเนื้อเชื่อมด้วยการเติมธาตุบางอย่าง เช่น แมงกานีสและซิลิกอนเพื่อลดออกซิเจน (Anti-Oxidising )
  2. มีการเติมธาตุที่ช่วยในการสร้างสแลกเพื่อช่วยปกป้องแนวเชื่อมขณะที่แข็งตัวและเพื่อให้รูปร่างแนวเชื่อมสวยงาม นอกจากนี้ยังช่วยในการเชื่อมทำต่างๆ ได้
  3. ช่วยให้อาร์กเรียบ และไม่มีเม็ดโลหะเกาะติดแนวเชื่อม
  4. ช่วยเติมธาตุเจือลงในเนื้อเชื่อม เช่น นิกเกิล โครเมียม โมลิบดีนัม และแมงกานีส เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลและสมบัติทางโลหะวิทยาของเนื้อเชื่อม
  5. ช่วยเพิ่มอัตราการเติมเนื้อโลหะเชื่อม เช่น ในกรณีของผงเหล็ก
- การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์นิยมนำมาเชื่อมใช้สำหรับงานเชื่อมพอกแข็ง สามารถเชื่อมได้ทั้งแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติทำให้เชื่อมได้อย่างต่อเนื่อง และรวดเร็วกว่าการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ดังนั้นการควบคุมคุณภาพของเนื้อเชื่อมจึงสามารถทำได้ง่ายกว่า

#### ความร้อนเข้า (Heat Input) [5]

ความร้อนเข้ามีความสำคัญมาก จะเป็นตัวกำหนดอัตราการเย็นตัวของเนื้อเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีสูตรในการหาความร้อนเข้า ดังนี้

$$H = \frac{E I 60}{1000V} f_1 \quad (2)$$

- เมื่อ
- H = ความร้อนเข้า (กิโลจูลต่อมิลลิเมตร)
  - E = แรงดัน (โวลต์)
  - I = กระแส (แอมแปร์)
  - V = ความเร็วในการเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที)
  - $f_1$  = ประสิทธิภาพ (\*)
  - \*มิก/แมก: 0.9



รูปที่ 2.12 หน้าตัดของลวดเชื่อม (ก) ลวดเชื่อมมิก/แมก (ข) ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ [5]

#### ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อแนวเชื่อม [6]

1. ความเร็วเชื่อม มีผลต่อขนาดของแนวเชื่อม ในกรณีความเร็วเชื่อมมาก แนวเชื่อมจะกว้างแต่ซึมลึกน้อย มีความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดใต้แนวเชื่อม รูพรุน หลอมละลายไม่หมด เป็นต้น ส่วนถ้าความเร็วเชื่อมช้า แนวเชื่อมจะไม่นูนแต่ซึมลึกมาก มักมีความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกร้อนและเกิดการฝั่งตัวของสแลก

2. ขั้วกระแสเชื่อม มีผลต่อการซึมลึกของแนวเชื่อม ถ้าใช้กระแสขั้วบวก (DC+) การซึมลึกจะสูงกว่ากระแสขั้วลบ (DC-) หมายความว่า การเชื่อมโดยใช้กระแสขั้วลบเหมาะสมสำหรับการเชื่อมเคลือบเพื่อป้องกันผสมรวมกันระหว่างเนื้อเชื่อมกับโลหะฐานและอัตราการเติมเนื้อจะเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ขั้วกระแสลบ

3. แรงดันเชื่อม มีผลต่อความกว้างของแนวเชื่อม การใช้แรงดันเชื่อมมากทำให้แนวเชื่อมกว้างและซึมลึกน้อย ซึ่งเหมาะสมกับงานที่มีช่องว่างของแนวเชื่อมมาก ทำให้ง่ายต่อการเติมโลหะผสมลงไป ในแนวเชื่อมแต่มีข้อเสียคือ เสี่ยงที่จะเกิดการกัดใต้แนวเชื่อม สแลกเกาะออกยาก สำหรับการเชื่อมที่แรงดันต่ำจะให้แนวเชื่อมที่นูน

4. กระแสเชื่อม มีผลทั้งการซึมลึกและอัตราการเติมเนื้อเชื่อม กระแสเชื่อมที่สูงจะทำให้แนวเชื่อมมีอัตราการเติมเนื้อที่สูง แนวเชื่อมกว้าง ซึมลึกกว้าง และซึมลึกมาก แต่แนวเชื่อมจะไม่นูน เสี่ยงต่อการเกิดการกัดใต้แนวเชื่อม และการแตกร้อน ซึ่งไม่เหมาะกับการเชื่อมแบบฟิลเลต

5. ระยะเวลาของลวดเชื่อม มีผลต่อการซึมลึกและอัตราการเติมเนื้อโลหะ ถ้ามีระยะย่นลวดเชื่อมน้อยจะมีการซึมลึกที่ดี ถ้ามีระยะย่นลวดเชื่อมมากจะมีความร้อนที่ลวดเชื่อมมาก การซึมลึกจึงน้อยลงแต่มีอัตราการเติมเนื้อโลหะจะสูงขึ้น การเชื่อมโดยทั่วไปจะใช้ระยะย่นลวดเชื่อม 25-30 มิลลิเมตร

6. มุมลวดเชื่อม มีผลต่อรูปร่างและการซึมลึกของลวดเชื่อม ในกรณีมุมลวดเชื่อม นำหน้า (Forehand) แนวเชื่อมจะกว้างกว่า ซึ่งปรับปรุงได้โดยการเพิ่มความเร็วเชื่อมให้มากขึ้น แนวเชื่อมก็จะเล็กลง

#### การเงาของเนื้อเชื่อม [7]

ซึ่งกระบวนการเชื่อมที่มีการหลอมละลายเกิดการรวมกันของโลหะที่เชื่อมและโลหะฐาน ทำให้สมบัติของเนื้อเชื่อมที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากที่ผู้ผลิตได้กำหนด ซึ่งสมบัติที่ได้ใหม่ จะแตกต่างทั้งส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกล เรียกพฤติกรรมที่เกิดว่าการเงาของเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเนื้อเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1 เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมเปลี่ยนไป เพราะฉะนั้นจำนวนชั้นพอกแข็งที่มากขึ้นก็ช่วยลดปัญหาการเงาของเนื้อเชื่อมของผิวเชื่อมได้

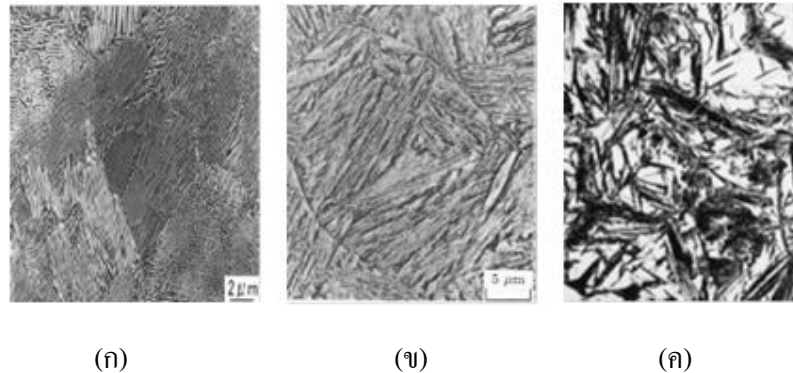
#### ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเงาเนื้อเชื่อม [8]

1. ความเร็วในการเชื่อม ถ้าความเร็วในการเชื่อมน้อยจะเกิดการเงาเนื้อเชื่อมมาก
2. ความร้อนขึ้นงานก่อนเชื่อม ถ้าความร้อนมากจะเกิดการเงาเนื้อเชื่อมมาก ดังนั้นต้องให้ความร้อนขึ้นงานก่อนเชื่อมที่เหมาะสม
3. กระแสเชื่อม ถ้าใช้กระแสเชื่อมมาก การเงาเนื้อเชื่อมจะมากขึ้น
4. จำนวนชั้นพอกแข็ง เมื่อจำนวนชั้นพอกแข็งมากขึ้น การเงาจะลดน้อยลง
5. ระยะยื่นลวดเชื่อม (Electrode Extension) การเพิ่มระยะยื่นลวดเชื่อมสามารถลดการเงาเนื้อเชื่อมได้
6. กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มีการเงาเท่ากับ 20-45 เปอร์เซ็นต์

## 2.2 โลหะวิทยาของเนื้อเชื่อมพอกแข็ง

### 2.2.1 โลหะวิทยาแนวเชื่อม

สำหรับกระบวนการเชื่อมเกิดการหลอมละลายที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) มีอุณหภูมิ 1000-1450 องศาเซลเซียส ความร้อนที่เกิดการปลดปล่อยอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างทางจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น เบนไนต์ (Bainite) เปลี่ยนแปลงเป็น ออสเทนไนต์ (Austenite) หรือเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ดังรูปที่ 2.13 ที่ขนาดของเกรนโตขึ้น ความร้อนที่เกิดการปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นมาเทนไซต์ (Martensite) ซึ่งทำให้สมบัติทางกลของโครงสร้างที่เปลี่ยนไปเกิดสมบัติที่ต่างกัน[8]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างจุลภาค (ก) เฟอไรต์และเพอร์ไรต์ (ข) เบนไนต์ (ค) มาร์เทนไซต์ [9]

Bailey [8] ได้แสดงความสัมพันธ์ของความแข็งสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณกระตบร้อนในกรณีที่มีบริเวณกระตบร้อนมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ( $HV_M$ ) และเบนไนต์ ( $HV_B$ ) แสดงดังสมการ 3 และ 4

$$HV_M = 802C + 305 \quad (3)$$

$$HV_B = 350 \left( C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \right) + 101 \quad (4)$$

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแตกร้าวในขณะที่เชื่อมปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าจะเป็นตัวแสดงความสามารถในการเชื่อม (Weldability) ของวัสดุ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมและหลังเชื่อม ดังตารางที่ 2.1 สถาบันการเชื่อมระหว่างประเทศ ได้กำหนดสมการปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าจากองค์ประกอบทางเคมีไว้ดังสมการที่ 5

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5} \quad (5)$$

จากปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (CE) สามารถกำหนดอุณหภูมิอุ่นขึ้นงานได้ดังนี้

1. ค่าคาร์บอนเทียบเท่าน้อยกว่า 0.45 ควรมีการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม 100 องศาเซลเซียส
2. ค่าคาร์บอนเทียบเท่าอยู่ในช่วง 0.45-0.60 ควรมีการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม 100-250 องศาเซลเซียส
3. ค่าคาร์บอนเทียบเท่าอยู่ในช่วง 0.60-0.80 ควรมีการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม 250-300 องศาเซลเซียส

4. ค่าคาร์บอนเทียบเท่ามากกว่า 0.80 ควรมีการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม 300-350 องศาเซลเซียส

### 2.2.2 โลหะวิทยาเนื้อเชื่อมพอกแข็ง

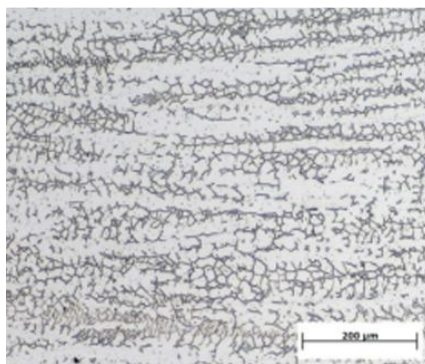
ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอ (Abrasive Resistance) ของการเชื่อมพอกแข็งมีหลายปัจจัย เช่น ประเภทของเฟสซึ่งมีความแข็ง ลักษณะและรูปร่างของเฟสที่ทำให้แข็ง การกระจายของเฟสที่แข็ง เป็นต้น

สำหรับปริมาณคาร์บอนกับโครเมียม เป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มความแข็งของแนวเชื่อม ลวดเชื่อมโครเมียมสูง เป็นลวดเชื่อมที่มีการใช้งานในหลายอุตสาหกรรม มีค่าใช้จ่ายไม่สูง ราคาถูก โดยคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นหลังการเชื่อมจะช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานสึกหรอ ถ้าหากลวดเชื่อมมีส่วนผสมของโมลิบดีนัม และวานาเดียมก็จะช่วยเพิ่มสมบัติทนการสึกหรอ การสึกหรอแบบขัดสี เนื่องมาจากความเค้นต่ำ สามารถใช้ลวดเชื่อมชนิดเหล็กโครเมียมได้เนื่องจากมีความแข็ง สำหรับกรณีที่วัตถุหรือชิ้นงานรับแรงที่เกิดจากการกระแทกด้วยนั้น ลวดเชื่อมชนิดที่มีโครเมียมสูงอย่างเดียวไม่พอเนื่องจากโครเมียมมีสมบัติที่แข็งแต่เปราะ ดังนั้นควรมีการเลือกลวดเชื่อมที่มีความเหนียวหรือมีส่วนผสมของนิกเกิลเพื่อช่วยให้โครงสร้างมีความเหนียวอีกด้วย [9]

## 2.3 การเลือกลวดเชื่อม

### 2.3.1 ลวดเชื่อมรองพื้น

ชั้นรองพื้นเป็นชั้นที่ทำหน้าที่ยึดติดระหว่างชั้น โลหะฐานและชั้นพอกแข็ง การเชื่อมชั้นรองพื้นมีความจำเป็น เช่น ในกรณีโลหะฐานและชั้นพอกแข็งมีสมบัติที่ต่างกันมาก ทำให้ถ้าไม่เชื่อมชั้นรองพื้นก่อนส่งผลให้การยึดติดระหว่างชั้น โลหะฐานกับชั้นพอกแข็งเกิดการหลุดและแตกร้าว บริเวณรอยต่อของแต่ละชั้นได้ สำหรับการเลือกลวดเชื่อมรองพื้นตามตารางที่ 2.1 จากงานวิจัยนี้ได้มีการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมซึ่งมีโครเมียมต่ำ ลวดเชื่อมรองพื้นที่เหมาะสมควรเป็นชนิดชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก (Cr-Ni Stainless Steel) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.14 [10]



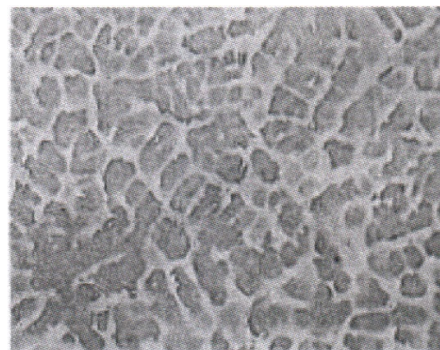
รูปที่ 2.14 โครงสร้างแบบออสเทนิติก [11]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของโลหะฐาน โลหะรองพื้น และโลหะพอกแข็ง [10]

ประเภทของโลหะฐาน	ชนิดของลวดเชื่อมรองพื้น	ชนิดของลวดเชื่อมพอกแข็ง
เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสมต่ำ	ลวดชนิดไฮโดรเจนต่ำ ชนิดเพอริตติกความแข็งต่ำ ชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติก	ชนิดเพอริตติกความแข็งสูง ชนิดมาร์เทนซิดิก ชนิดแมงกานีสสูง ชนิดโครเมียมสูง
เหล็กกล้าแมงกานีสสูง	ชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติก	ชนิด 13% แมงกานีส ชนิดมาร์เทนซิดิก

### 2.3.2 การเลือกลวดเชื่อมพอกแข็ง

การเลือกลวดเชื่อมพอกแข็งที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งการเชื่อมพอกแข็งไม่ควรจะเชื่อมเกิน 2-3 ชั้น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของนำความร้อนต่ำ ส่งผลให้เกิดชั้นพอกแข็งเกิดการหลุดและแตกได้ง่าย ดังนั้นจึงควรเชื่อมชั้นรองพื้นด้วยโลหะที่มีความแข็งที่น้อยกว่าชั้นพอกแข็ง โดยงานวิจัยนี้เลือกลวดเชื่อมพอกแข็งชนิดมาร์เทนซิดิกซึ่งมีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.15 [12]



Martensitic type 50  $\mu$

รูปที่ 2.15 โครงสร้างมาร์เทนซิดิก [12]

ตารางที่ 2.2 โลหะพอกแข็ง [12]

ชนิดของโลหะเคลือบ	คุณสมบัติ	การนำไปใช้งาน
เหล็กกล้าผสมต่ำและคาร์บอนต่ำ	เหนียวทน	สร้างเนื้อ/ทนต่อการเสียดสี
เหล็กกล้าผสม 14%แมงกานีส	เหนียวทนและสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้	ทนต่อแรงกระแทก
มาร์เทนซิติค	เหนียวทนและแข็ง	ทนต่อแรงกระแทกและการขัดถู
โครเมียมคาร์ไบด์ ทังสเตนคาร์ไบด์	แข็งและเปราะ	ทนต่อการขัดถู
โคบอลต์และนิเกิล	แข็งที่อุณหภูมิสูง	เหล็กกล้าเครื่องมือ ทนต่อการกัดกร่อน งานที่อุณหภูมิสูง

#### 2.4 บทบาทของธาตุผสมแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้า

##### 1. คาร์บอน (Carbon) - สัญลักษณ์ทางเคมี คือ C

เป็นธาตุที่สำคัญที่สุด จะต้องผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคุณสมบัติทำให้เหล็กแข็งเพิ่มขึ้นหลังจากนำไปชุบแข็ง (Heat Treatment) โดยรวมตัวกับเนื้อเหล็ก เป็นสารที่เรียกว่า มาร์เทนไซด์ (Martensite) และซีเมนไต์ (Cementite) นอกจากนั้น คาร์บอนยังสามารถรวมตัวกับเหล็ก และธาตุอื่น ๆ กลายเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็ก อย่างไรก็ตาม คาร์บอนจะลดความยืดหยุ่น (Elasticity) ความสามารถในการตีขึ้นรูป (Forging) และความสามารถในการเชื่อม (Welding) และไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน [13]

##### 2. โครเมียม (Chromium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cr

ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่ายขึ้น เพราะลดอัตราการเย็นตัววิกฤตลงอย่างมาก สามารถชุบในน้ำมันหรืออากาศได้ (Oil or Air Quenching) เพิ่มความแข็งแรงให้เหล็ก แต่ลดความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) ลง โครเมียมที่ผสมในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็นสารประกอบพวกคาร์ไบด์ ซึ่งแข็งมาก ดังนั้น จึงทำให้เหล็กทนทานต่อแรงเสียดสี และบริเวณที่เป็นรอยคมหรือความคมไม่ลบง่าย ทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ยาก เพิ่มความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารต่าง ๆ ได้ดีขึ้น [13]

### 3. ทองแดง (Copper) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu

เพิ่มความแข็งแรง ถ้ามีทองแดงผสมอยู่ในเหล็กแม้เพียงเล็กน้อย เหล็กจะไม่เกิดสนิมเมื่อใช้งานในบรรยากาศ ทองแดงจะไม่มีผลเสียต่อความสามารถในการเชื่อมของเหล็ก [13]

### 4. แมงกานีส (Manganese) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mn

ใช้เป็นตัวไล่กำมะถัน (S) ซึ่งเป็นตัวที่ไม่ต้องการในเนื้อเหล็ก จะถูกกำจัดออกในขณะที่หลอม ทำให้เหล็กอบชุบแข็งง่ายขึ้น เนื่องจากเป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ทำให้เหล็กทนทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กเมื่อถูกความร้อน แต่จะลดคุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้า และความร้อน นอกจากนี้ แมงกานีสยังมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปหรือเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น จะทนต่อการเสียดสีได้ดีขึ้นมาก [13]

### 5. โมลิบดีนัม (Molybdenum) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mo

ปกติจะใช้ผสมรวมกับธาตุอื่น ๆ เป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้อบชุบง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper Brittleness) ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด เพิ่มความทนทานต่อแรงดึงแก่เหล็กมากขึ้น สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ง่ายมาก ดังนั้น จึงปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดโลหะ (Cutting) ของเหล็กไฮสปีดได้ดีขึ้น เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) แก่เหล็ก อย่างไรก็ตาม เหล็กที่มีโมลิบดีนัมสูงจะตีขึ้นรูปยาก [14]

### 6. นิกเกิล (Nickel) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ni

เป็นตัวที่เพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของเหล็ก ดังนั้น จึงใช้ผสมในเหล็กที่จะนำไปชุบแข็งที่ผิว ใช้ผสมกับโครเมียม ทำให้เหล็กทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิมง่าย ทนความร้อน [14]

### 7. ซิลิคอน (Silicon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si

ซิลิคอนจะปรากฏในเหล็กทุกชนิด เนื่องจากสินแร่เหล็กมักมีซิลิคอนผสมอยู่ด้วยเสมอ ซิลิคอนไม่ใช่โลหะ แต่มีสภาพเหมือนโลหะ ใช้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง (Oxidizing) ทำให้เหล็กแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น เพิ่มค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield Point) ของเหล็กให้สูงขึ้นมาก ดังนั้น จึงใช้ผสมในการทำเหล็กสปริง (Spring Steels) ช่วยทำให้เหล็กทนทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงใช้ผสมในเหล็กทนความร้อน เหล็กกล้าที่มีซิลิคอนสูงจะมีเกรนหยาบ [14]

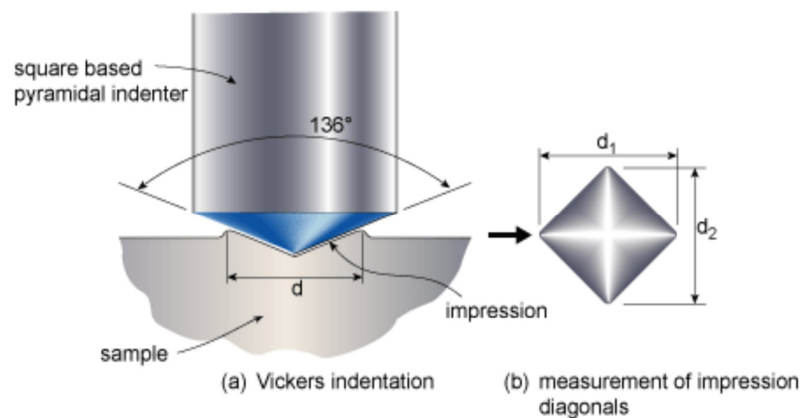


## 8. วานเดียม (Vanadium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ V

ทำให้เหล็กทนต่อความร้อนได้ดี เพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็ก โดยไม่ทำให้คุณสมบัติในการเชื่อม และการดึงเสียไป ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด รวมตัวกับคาร์บอนที่เป็นคาร์ไบด์ได้ง่าย จึงทำให้ทนทานต่อการสึกกร่อน มักจะผสมในเหล็กขึ้นรูปร้อน (Hot Working Steels) และเหล็กไฮสปีด [14]

### 2.5 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM E 92-82 (Reapproved) โดยมีหัวกด (Indenter) เป็นเพชรรูปที่มีพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมด้านเท่า มีมุมระหว่างหน้า พีระมิด  $136^\circ$  แรงกด (Load) โดยทั่วไปใช้ขนาด 1-120 กิโลกรัมแรง การวัดค่าความแข็งแสดงดังรูปที่ 2.16 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณออกมาเป็นค่าความแข็งดังสมการที่ 6 [15]



รูปที่ 2.16 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ [16]

$$HV = \frac{P \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} \quad (6)$$

เมื่อ

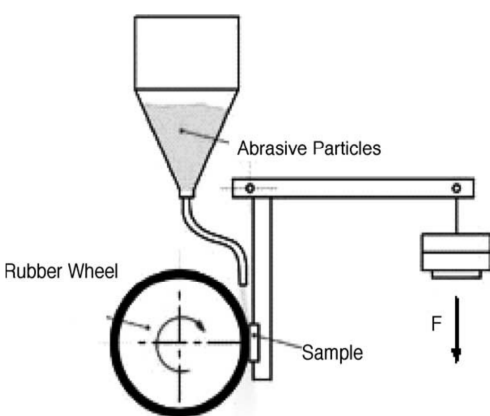
$P$  = แรงกด (kgf)

$\theta = 136^\circ$

$d$  = เส้นทแยงมุม (mm)

## 2.6 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 โดยทรายที่นำมาทดสอบมีขนาด 50-70 เมช และต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และก็ปล่อยให้เย็นก่อนนำไปทดสอบ ซึ่งชิ้นงานที่ทดสอบจะเสียดสีระหว่างทรายกับล้ออย่างดั่งรูปที่ 2.17 ภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ ล้อยางหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยมีอัตราการป้อนทราย 250 กรัมต่อนาที น้ำหนักทดสอบ 13.5 กิโลกรัม ทดสอบจนได้ระยะทางในการเสียดสี 4309 เมตร [17]



รูปที่ 2.17 ไลอะแกรมเครื่องมือทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 [9]

### 2.6.1 เหล็กกล้าทนการสึกหรอ

โดยทั่วไปเหล็กที่มีความแข็งสูง สามารถทนต่อการสึกหรอ แต่มักจะทนต่อแรงกระแทกได้น้อยเนื่องจากมีความแข็งสูงเมื่อได้รับแรงกระแทกโดยตรงทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย ลักษณะงานบางอย่าง เช่น การบดแร่ จำเป็นต้องมีสมบัติทนต่อการสึกหรอแบบขัดสี และสามารถรับแรงกระแทกได้ดี [11]

### 2.6.2 เหล็กกล้าผสมต่ำชนิดโครเมียมเป็นธาตุหลัก

โครเมียมเป็นธาตุที่มีบทบาทเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งให้เหล็กกล้า ในสภาพออร์มาลโรซิง จะมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง แต่ความเหนียวจะลดลง ในการผลิตมักเติมธาตุอื่นๆ ลงไปเพื่อเสริมคุณสมบัติทางด้านความเหนียว ดังแสดงในตารางที่ 2.3 [18]

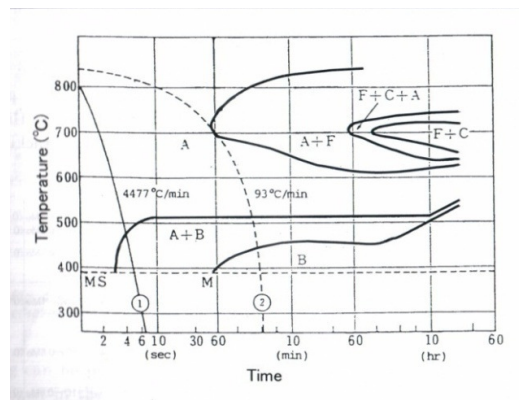
ตารางที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าผสมโครเมียม – โมลิบดีนัม [18]

%C	%Mn	%Cr	%Mo	ความเค้นจุด คราก (ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)	ความเค้นแรงดึง สูงสุด (ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)	อัตราการยืด ตัว (เปอร์เซ็นต์)
0.28 - 0.35	0.60 - 0.85	0.80 - 0.10	0.15 - 0.30	52,000 - 62,000	90,000 - 96,000	25-22
0.20	0.50 - 0.8	4.0 - 6.50	0.45 - 0.65	40,000	70,000	20

เหล็กกล้าโครเมียมที่ประยุกต์ใช้ในการทนการสึกหรอ มีการผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม เพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง โดยสามารถชุบแข็งได้โดยการปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ทำให้มีความแข็งแรงสูง แต่เมื่อทำการเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียมจะทำให้เกิด การแตกแบบเย็น (Cold Crack) เนื่องจาก [4]

1. แนวเชื่อมมีความเหนียวต่ำ
2. ความเค้นตกค้าง
3. การกระจายตัวของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C

รูปที่ 2.18 เป็นผังไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่ของเหล็กกล้าโครเมียม 2.25 Cr-1 Mo ของเหล็กกล้าโครเมียม 2.25Cr-1Mo ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ของธาตุโครเมียมใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.18 ผังไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่ของเหล็กกล้าโครเมียม 2.25 Cr-1 Mo [11]

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยจาก **V. T. Bhanu Kiran และคณะ** [19] ได้ศึกษาการพัฒนาและคุณลักษณะของ ลวดเคม เพื่อไม่ให้มีรอยแตกของเนื้อเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยงานวิจัยได้ใช้ลวด เชื่อมชั้นพอกแข็งที่มีส่วนผสมทางเคมีโดยมี คาร์บอน 4.8 เปอร์เซ็นต์ แมงกานีส 1.1 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอน 1.4 เปอร์เซ็นต์ โครเมียม 30.0 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 0.5 เปอร์เซ็นต์ โมลิบดีนัม 1.7 เปอร์เซ็นต์ วาเนเดียม 0.2 เปอร์เซ็นต์ และ เหล็ก 60.3 เปอร์เซ็นต์ และมีลวดเชื่อมชั้นรอง ที่มี ส่วนผสมทางเคมี คาร์บอน 1.1 เปอร์เซ็นต์ แมงกานีส 13 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอน 0.8 เปอร์เซ็นต์ ซัลเฟอร์ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัส 0.05 เปอร์เซ็นต์ และ เหล็ก 85 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบโดยการ เชื่อมลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี คาร์บอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ แมงกานีส 0.9 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอน 0.2 เปอร์เซ็นต์ ซัลเฟอร์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัส 0.03 เปอร์เซ็นต์ และเหล็ก 98.6 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัยได้มีการเชื่อมพอกแข็งดังนี้ ชั้นที่ 1 เชื่อมพอกโดยใช้ลวดเชื่อมที่มี ส่วนผสมทางเคมี คาร์บอน 4.8 เปอร์เซ็นต์ แมงกานีส 1.1 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอน 1.4 เปอร์เซ็นต์ โครเมียม 30.0 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 0.5 เปอร์เซ็นต์ โมลิบดีนัม 1.7 เปอร์เซ็นต์ วาเนเดียม 0.2 เปอร์เซ็นต์ และ เหล็ก 60.3 เปอร์เซ็นต์ เชื่อมพอก 1 ชั้นลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยชั้นของเชื่อม พอกหนา 4 มิลลิเมตร ชั้นที่ 2 เชื่อมพอกโดยใช้ลวดตัวเคมแต่จะเชื่อม 2 ชั้นลงบนเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ ชั้นที่ 3 เชื่อมพอกโดยใช้ลวดตัวเคมแต่จะเชื่อมพอก 3 ชั้นลงบนเหล็กกล้าคาร์บอน ต่ำ ชั้นที่ 4 เชื่อมพอกโดยมีเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี คาร์บอน 1.1 เปอร์เซ็นต์ แมงกานีส 13 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอน 0.8 เปอร์เซ็นต์ ซัลเฟอร์ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัส 0.05 เปอร์เซ็นต์ และ เหล็ก 85 เปอร์เซ็นต์ โดยการเชื่อมชั้นรองพื้นก่อน 1 ชั้น ลงบนเหล็กกล้าคาร์บอน ต่ำ และตามด้วยลวดเชื่อมแบบพอกแข็งลงไปอีก 1 ชั้น ชั้นที่ 5 เชื่อมรองพื้นก่อน 1 ชั้นลงบน เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แล้วตามด้วยลวดเชื่อมแบบพอกแข็งอีก 2 ชั้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การเชื่อมหลายชั้นให้ค่าความแข็งต่ำสุด 60 ร็อคเวลสเกลซี และสมบัติด้านการสึกหรอเทียบเท่ากับ เหล็กกล้าผสมโครเมียมสูง อย่างไรก็ตามการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้นโดยไม่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนทำ การเชื่อม จะไม่มีแนวแตกส่วนการเชื่อมพอกแข็ง 3ชั้น โดยไม่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม จะเกิดการ แตกเกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัวของแนวเชื่อม ดังนั้นสำหรับการเชื่อมสำหรับการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นที่มีความหนามากกว่า 15 มิลลิเมตรต้องมีการอุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ก่อนทำ การเชื่อมเพื่อป้องกันการแตก

งานวิจัยจาก **J.J. Coronado และคณะ** [20]ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกระบวนการ เชื่อมที่มีผลต่อสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear) สำหรับเนื้อเชื่อมพอก แข็ง โดยงานวิจัยนี้มีการเปรียบเทียบ โดยการใช้กระบวนการเชื่อมแบบลวดหุ้มฟลักซ์กับ

กระบวนการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ในกรณีของการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมพอก 1 ชั้นจะมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์โดยมีออสเทนไนต์อยู่รอบๆ โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมพอก 3 ชั้น โดยมีลักษณะเป็นเดนไดรต์อยู่ในโครงสร้างออสเทนไนต์ ในโครงสร้างหลักยูเทคติก ผลการทดสอบการต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสี เนื้อเชื่อมพอก 3 ชั้นของการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ให้ผลที่ดีกว่าเนื้อเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น

งานวิจัยจาก **M. Kirchganer และคณะ** [21] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้าภายใต้การรับแรงแบบการขัดสีและแรงกระแทก ในงานวิจัยนี้ใช้การเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์ โดยการเชื่อมพอกแข็ง 2 ชั้นลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพื่อจะนำไปทดสอบการสึกหรอ โดยชิ้นงานที่เชื่อมพอกแข็งแล้วมีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ ชั้นที่ 1 คาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ โครเมียม 6 เปอร์เซ็นต์ ไนโอเบียม 3 เปอร์เซ็นต์ โมลิบดีนัม วาเนเดียม ทั้งสแตน ไททานเนียม นิกเกิล รวมกัน 1.5 เปอร์เซ็นต์ และ เหล็ก-88.5 เปอร์เซ็นต์ ชั้นที่ 2 คาร์บอน 5.5 เปอร์เซ็นต์ โครเมียม 21 เปอร์เซ็นต์ ไนโอเบียม 7 เปอร์เซ็นต์ โมลิบดีนัม วาเนเดียม ทั้งสแตน ไททานเนียม นิกเกิล รวมกัน 1 เปอร์เซ็นต์ และ เหล็ก 65.5 เปอร์เซ็นต์ ชั้นที่ 3 คาร์บอน 2.5 เปอร์เซ็นต์ โครเมียม 7 เปอร์เซ็นต์ โบรอน 1 เปอร์เซ็นต์ โมลิบดีนัม วาเนเดียม ทั้งสแตน ไททานเนียม นิกเกิล รวมกัน 1 เปอร์เซ็นต์ และ เหล็ก 88.5 เปอร์เซ็นต์ ชั้นที่ 4 คาร์บอน 1 เปอร์เซ็นต์ โบรอน 4 เปอร์เซ็นต์ โมลิบดีนัม วาเนเดียม ทั้งสแตน ไททานเนียม นิกเกิล รวมกัน 1.5 เปอร์เซ็นต์ และ เหล็ก 93.5 เปอร์เซ็นต์ ชั้นที่ 5 คาร์บอน 1.3 เปอร์เซ็นต์ โครเมียม 15.4 เปอร์เซ็นต์ ไนโอเบียม 4.2 เปอร์เซ็นต์ โบรอน 4.2 เปอร์เซ็นต์ โมลิบดีนัม วาเนเดียม ทั้งสแตน ไททานเนียม นิกเกิล รวมกัน 11.5 เปอร์เซ็นต์ และ เหล็ก 63.4 เปอร์เซ็นต์ ชั้นที่ 6 โครเมียม 1 เปอร์เซ็นต์ โมลิบดีนัม วาเนเดียม ทั้งสแตน ไททานเนียม นิกเกิล รวมกัน 1.8 เปอร์เซ็นต์ และ เหล็ก 97.2 เปอร์เซ็นต์ นำชิ้นงานไปทดสอบกับเครื่องที่ทดสอบแบบขัดสีและกระแทกใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยมาตรฐาน ASTM G65 แบบการสัมผัสที่มีตัวคันระหว่างกลาง (3 Body Abrasion) ผลการทดลองได้ว่า ชิ้นงานที่มีโครงสร้างที่เป็นมาร์เทนซิติคจะให้ค่าของการสึกหรอแบบขัดสีและแบบกระแทกอยู่เกณฑ์ที่ดี และมีค่าความแข็งที่พอเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในชิ้นส่วนที่รับแรงกระแทกและถูกขัดสี

งานวิจัยของ **O. O. Zollinger และคณะ** [22] ได้อธิบายเกี่ยวกับสมบัติของโลหะที่ใช้ในการพอกแข็ง มีด้วยกัน 3 กลุ่มคือ กลุ่มโลหะมาร์เทนซิติค กลุ่มโลหะออสเทนนิค และกลุ่มโลหะคาร์ไบด์ โดยโลหะกลุ่มมาร์เทนซิติคมีความสามารถในการต้านทานต่อการกระแทกและต้านทานการสึกหรอได้ดี เหมาะสำหรับการทำเป็นชั้นพอกแข็ง ความแข็งของโลหะชนิดขึ้นอยู่กับคาร์บอนของโลหะนั้นถ้าการเย็นตัวเกิดได้เร็วขึ้นจะมีความแข็งสูง ลักษณะของมาร์เทนซิติคขึ้นอยู่กับชนิด

ของโลหะฐานและจำนวนของชั้นที่พอกแข็งด้วย ในกลุ่มของโลหะออสเทนนิคเป็นกลุ่มที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเนื้อให้กับชิ้นงานที่เกิดจากการสึกหรอ เพราะมีความแข็งและเหนียว แต่ต้านทานการสึกหรอได้ในระดับปานกลาง เชื่อมได้ดีกับโลหะที่มีสมบัติที่แตกต่างกัน ในกลุ่มของโลหะกลุ่มคาร์ไบด์ จะมีความแข็งและต้านทานต่อการสึกหรอได้ดี

**งานวิจัยของ K. M. Kenchi และคณะ [23]** ศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอแบบเสียดสีของการเชื่อมพอกแข็ง ซึ่งได้อธิบายการทำงานของการทำงานของการสึกหรอแบบการสัมผัสที่มีตัวคั่นระหว่างกลาง ซึ่งเปิดการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสี ได้อธิบายว่าเมื่อมีการปล่อยทรายในทิศทางเดียวอย่างเป็นอิสระ ทรายก็ได้ได้รับพลังงานจากการหมุนของล้อยาง หลังจากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานมาสัมผัสกับล้อยางที่มีทรายอยู่ตรงกลาง จากนั้นทรายก็เกิดการไปฝังอยู่ในล้อยาง ทำให้เกิดการสึกหรอแบบ 2 วัดดู หลังจากนั้นทรายจะชูดกับผิวชิ้นงาน เกิดการเปลี่ยนแปลงที่หน้าผิวชิ้นงานจากการทดลองจึงพบว่าชิ้นงานที่มีความแข็งมากจะยอมให้ทรายปริมาณมากไหลผ่านบริเวณผิวสัมผัสทำให้เกิดการกระจายของความเค้นที่มาจากแรงกด ส่งผลทำให้อัตราการสึกหรอลดลงไปด้วย

**งานวิจัยของ S. A. Mohamat และคณะ [24]** ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของกระบวนการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยเงื่อนไขของตัวแปรที่แตกต่างกัน ในการวิจัยนี้ใช้ลวดเชื่อมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มม. ตามมาตรฐาน K-71T AWS A5.20 และใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 100 % ในการเชื่อม โดยเชื่อมบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในการศึกษานี้ใช้ความต่างศักย์ 22 26 และ 30 โวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 90 150 และ 210 แอมแปร์ และใช้ความเร็วในการเชื่อม 20 40 และ 60 เซนติเมตร ต่อนาที ผลการทดลองพบว่า เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นทำให้การแทรกซึมสูงขึ้นทำให้สรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อการแทรกซึมของแนวเชื่อม ความเร็วในการเชื่อมต่ำลงทำให้เกิดการแทรกซึมสูงขึ้น ขนาดของขอบเกรนสูงขึ้นเมื่อความเร็วการเชื่อมต่ำลง ค่าของความแข็งสำหรับเนื้อเชื่อมจะสูงกว่าบริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน ค่าความแข็งจะลดลงเมื่อค่าของความต่างศักย์ และ ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

**งานวิจัยของ A. Gualco และคณะ [25]** ได้ศึกษาผลกระทบจากกระบวนการเชื่อมที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของชั้นพอกแข็งมาร์เทนซิติกของเหล็กในเครื่องมือ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการเชื่อมแบบแมกโดยเชื่อมลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ งานวิจัยได้เปรียบเทียบตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อม ได้แก่ชนิดของแก๊สปกคลุม ความร้อนที่ให้กับชิ้นงานและความร้อนที่ทำให้ชิ้นงานหลังการเชื่อม เชื่อมพอกแข็งโดยใช้ลวดที่เป็นมาร์เทนซิติก ซึ่งก่อนเชื่อมได้มีการอุ่นชิ้นงานด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยลักษณะของโครงสร้างจุลภาคในกรณีของการเชื่อมพอกแข็งที่ไม่อุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมนั้น จะพบว่าโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซด์ที่มีออสเทนไนต์ และจะมีเดนไดรติก

กระจายตัวอยู่ แต่เมื่อมีการให้อุณหภูมิกับชิ้นงานที่จะเชื่อมมากขึ้นทำให้โครงสร้างแบบออสเทนไนต์ จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์มากขึ้น โดยโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ให้กับ ชิ้นงานและจำนวนชั้นพอกแข็งมีมากขึ้น ทำให้ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอีกด้วย

**งานวิจัยของ Winarto และคณะ [26]** ได้ศึกษาผลกระทบจากการให้ความร้อนก่อนเชื่อม และการเชื่อมชั้นรองพื้น ที่มีผลต่อความต้านทานการสึกหรอและการแตกของการเชื่อมพอกแข็ง เหล็กกล้า HSLA พบว่าการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมพอกแข็งช่วยลดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นของชั้น รองพื้น โดยเมื่อมีการเชื่อมชั้นรองพื้นทำให้ช่วยในการประสานระหว่างชั้นเชื่อมพอกแข็งและ โลหะเดิมได้ดี และลดการแตกร้าวจากชั้นพอกแข็งสู่โลหะเดิมอีกด้วย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ **M. Adamiak และคณะ [27]** ได้ศึกษาความต้านทานการสึกหรอของเหล็กหล่อโครเมียมกับแผ่น เหล็ก พบว่าการเชื่อมพอกผิวระหว่างวัสดุที่อ่อนกับวัสดุที่มีความแข็งสูง ควรต้องมีเหล็กสแตนเลส เป็นชั้นรองพื้นเพื่อป้องกันการแตกสู่วัสดุอ่อน

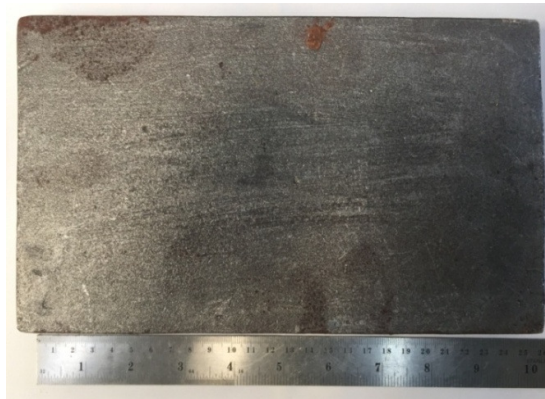
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเชื่อมพอกแข็งของพิน โมถ่านหินเครื่องบดในเหมืองแม่เมาะ เพื่อป้องกันการสึกหรือจากการใช้งาน โดยวิธีการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยทำการเชื่อมพอกแข็งลงบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม โดยหลังการเชื่อม นำชิ้นงานไปทดสอบและเปรียบเทียบกับทางด้านโลหะวิทยาเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคทั้งตามแนวขวางและพิกัดด้านบนของชั้นพอกแข็ง นอกจากนี้ยังทำการทดสอบสมบัติทางกลคือ การทดสอบการต้านทานการสึกหรือแบบขัดสี

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

3.1.1 เหล็กกล้า 3.5% โครเมียม ซึ่งได้จากการหล่อ (รูปที่ 3.1) เป็นเหล็กกล้าผสมต่ำที่มีค่าความแข็งประมาณ 200 วิกเกอร์ ประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์ และเบนไนต์ ซึ่งวัสดุชนิดนี้ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ทางเหมืองแร่ โดยเฉพาะพินของเครื่องโมถ่านหินของเหมืองแม่เมาะ ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ 3.5 เปอร์เซนต์ โครเมียมแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เหล็กกล้า 3.5 เปอร์เซนต์ โครเมียม



ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า 3.5 เปอร์เซนต์ โครเมียม (เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
0.38	0.40	0.52	0.17	3.42	0.30	0.04	Balance

### 3.1.2 ลวดเชื่อม (Wire) ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยลวดเชื่อมทั้งหมด 2 ชนิด ได้แก่

(1) ลวดเชื่อมสำหรับชั้นรองพื้นคือลวดเชื่อมตามมาตรฐาน EN14700: TFe8 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร โดยตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมชั้นรองพื้น

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมชั้นรองพื้น (เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
0.1	0.5	6.0	19.0	9.0	Balance

(2) ลวดเชื่อมสำหรับชั้นพอกแข็งคือ ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน EN14700: TFe10 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร โดยตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมชั้นพอกแข็ง (เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก)

C	Si	Mn	Cr	Fe
0.5	2.5	1.3	8.5	Balance

3.1.3 เครื่องเชื่อม (Power source) และชุดป้อนลวด (Wire Feeder) เป็นระบบอินเวอร์เตอร์ยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPlus Synegic 400 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถปรับค่าตัวแปรในการเชื่อมได้ โดยมีจอแสดงค่าต่างๆที่ปรับ ในส่วนชุดป้อนลวดยี่ห้อ Fronius มีตัวขับเคลื่อนลวดเชื่อม (Roller) แบบร่องตะเข็บสำหรับใช้กับลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์จำนวน 2 คู่



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมและชุดป้อนลวด

3.1.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple and Data Logger) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิก่อนการเชื่อมและในระหว่างเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.3 อันประกอบด้วยเครื่องเก็บข้อมูลยี่ห้อ Picolog รุ่น USB TC-08 ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลของอุณหภูมิ และเทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

3.1.5 แผ่นให้ความร้อนเซรามิก (Flexible Ceramic Pad Heater) เป็นแผ่นให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการเชื่อม โดยแผ่นเซรามิกต่อเข้ากับแหล่งให้พลังงาน โดยมีขดลวดต้านทานเป็นตัวให้ความร้อนสู่ชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผ่นให้ความร้อนเซรามิก

3.1.6 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน (Band Saw) รุ่น UE-712A ใช้ในการตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ โดยในขณะตัดจะใช้น้ำหล่อเย็นช่วยในการระบายความร้อน ดังแสดงในรูป 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน

3.1.7 เครื่องตัดไฟเบอร์ (Abrasive Cut-off Machine) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น CC 14ST ใช้ในการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบทางด้านโลหะวิทยาและการด้านทานการสึกหรอแบบขัดสี ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องตัดไฟเบอร์

3.1.8 เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) ยี่ห้อ HELLER รุ่น 2S ใช้สำหรับการเตรียมผิวของชิ้นงานสำหรับการทดสอบการสึกหรอ และชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Mount) เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องกัดแนวตั้ง

3.1.9 เครื่องขัดชิ้นงาน (Grinder-Polisher) ยี่ห้อ PACE TECHNOLOGIE รุ่น NANO 1000T GRIDER-POLISHER ใช้ในการขัดเตรียมผิวชิ้นงานก่อนนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และโครงสร้างมหภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องขัดชิ้นงาน

**3.1.10** น้ำยาเคมี (Etching reagent) ใช้สำหรับการกัดผิวชิ้นงานก่อนนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และโครงสร้างมหภาค โดยใช้น้ำยาเคมีทั้งหมด 2 ชนิด คือ

- (1) สารละลายไนตอล 2 เปอร์เซนต์ (กรดไนตริก 2 มิลลิเมตร+ แอลกอฮอล์ 98 มิลลิเมตร) ใช้ในการกัดบริเวณเนื้อโลหะเดิม และบริเวณกระทบร้อน
- (2) สารละลายวิเอร่า (ไฮโดรคลอริก 5 มิลลิเมตร + กรดฟอสฟอริก 2 กรัม+ แอลกอฮอล์ 100 มิลลิเมตร) ใช้ในการกัดบริเวณชั้นรองพื้น และชั้นพอกแข็ง

**3.1.11** กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ

- (1) กล้องสเตอริโอ (Stereo Camera) ยี่ห้อ Olympus รุ่น SZ2-ET ใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ซึ่งมีกำลังขยายตั้งแต่ 4-28 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กล้องสเตอริโอ

(2) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น Scope.A1 ใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งมีกำลังขยายตั้งแต่ 25-500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

(3) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ FEI Quanta 400 รุ่น SEM-Quanta ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างที่กำลังขยายสูง โดยโหมดที่ใช้คือ Backscattered Electron ดังแสดงในรูปที่ 3.11



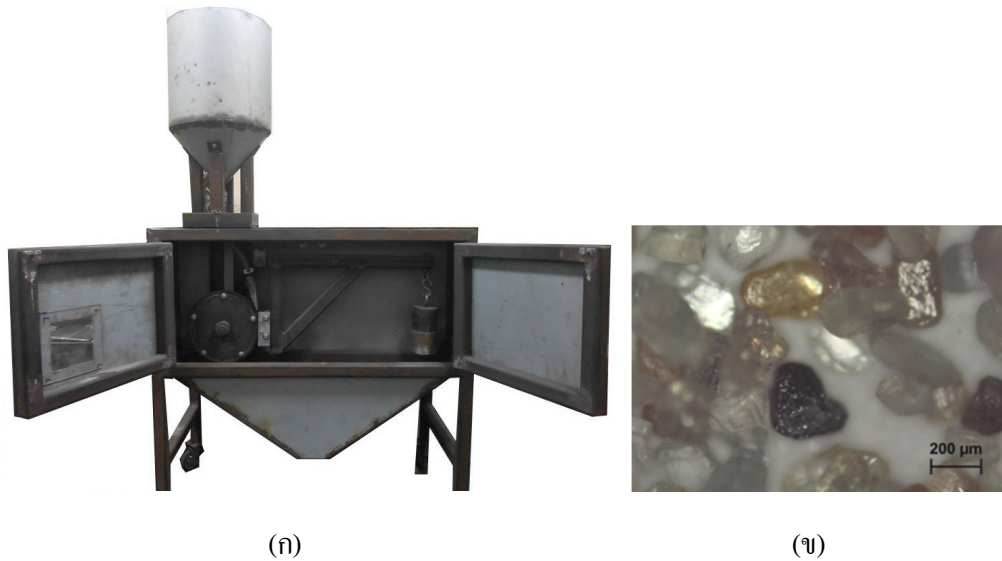
รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.1.12 เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Vickers Hardness) ยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น MMT-X78 เป็นเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค มีหัวกดเป็นเพชรรูปทรงปิรามิดสี่เหลี่ยม โดยสามารถใช้โหลดได้ตั้งแต่ 1-2,000 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

3.1.13 อุปกรณ์ทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear Instrument) เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีตามมาตรฐาน ASTM G65 ขั้นตอน A ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ



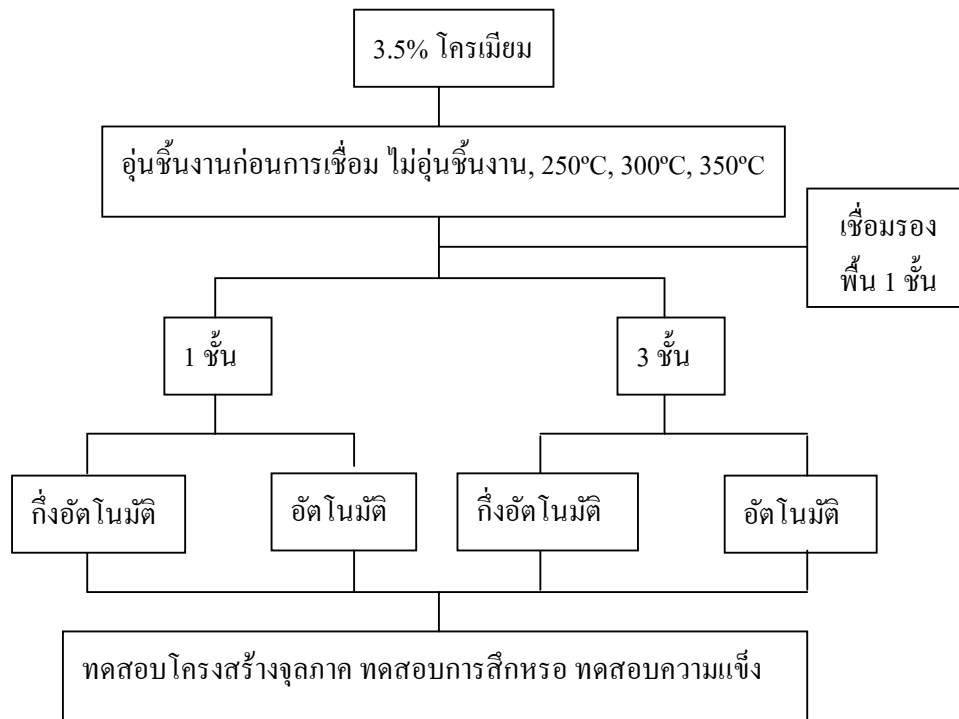
รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ทดสอบการสึกหรอ(ก) เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีและ  
(ข) ขนาดของทรายที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.1.14 อุปกรณ์อื่นๆ

- (1) สว่าน (Driller)
- (2) เวอร์เนีย (Vernier)
- (3) หินเจียร (Grinder)
- (4) ค้อนเคาะสแลก (Slag Hammer)
- (5) กระดาษทราย (SiC Paper)
- (6) เครื่องเป่าลม (Blower)
- (7) ติ๊ปเกลียวมือ (Screw Tap)
- (8) ผงอะลูมินา (Alumina Oxide Powder)
- (9) แผ่นสักหลาด (Polish Pad)
- (10) แปรงทองเหลือง (Brass Brush)
- (11) ผงเบเคอร์ไรต์ (Bakelite)
- (12) เต้าเดินราง (Mechanize)



### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.14 แผนผังแสดงขั้นตอนดำเนินการวิจัยของการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม

### 3.3 การเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อม

ทำการตัดวัสดุเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมขนาดกว้าง 75 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร และหนา 20 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.15 ตัดชิ้นงานจำนวน 16 ชิ้น จากนั้นนำชิ้นงานไปเจาะรูจำนวน 4 รู โดยแต่ละรูมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตรและลึกประมาณ 12 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำไปตีแปปเกลียวขนาด M8×1.5 เพื่อทำการยึดชิ้นงานติดกับแท่นรองเพื่อป้องกันการบิดตัวในระหว่างการเชื่อม ซึ่งแท่นรองมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงาน ทำการเจาะรู 4 รูแบบทะลุ โดยแต่ละรูจะตรงกับรูของชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อม นอกจากนี้ทำการเจาะรูที่ชิ้นงานเพื่อติดตั้งโมคัปเปิลสำหรับอ่านค่าของอุณหภูมิระหว่างการเชื่อม



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.15 การเตรียมชิ้นงานก่อนเชื่อม (ก) ชิ้นงานเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมก่อนการเชื่อม  
(ข) ชิ้นงานยึดติดกับแท่นรอง

### 3.4 กรรมวิธีการเชื่อม

ทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยมีกระบวนการเชื่อมแบบ กึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ รูปที่ 3.16 แสดงการเตรียมอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมพอกแข็ง โดยนำ ชิ้นงานที่จะเชื่อมวางบนแท่นยึด มีตัววัดอุณหภูมิและตัวบันทึกค่าอุณหภูมิในระหว่างการเชื่อม ซึ่ง ใช้กระแสตรงในการเชื่อม (DC+) โดยจะต่อขั้วบวกกับหัวเชื่อม และขั้วลบกับชิ้นงาน โดยค่าที่ บันทึกได้คือค่าอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมแต่ละแนว



(ก)

(ข)

**รูปที่ 3.16** การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการเชื่อม (ก) แบบกึ่งอัตโนมัติ และ  
(ข) แบบอัตโนมัติ

การเชื่อมแบ่งออกเป็น 16 เงื่อนไข โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการเจาะรูมาแล้วมาให้ความร้อนก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิต่างๆ คือ ไม่มีการอุ่นชิ้นงาน 250 องศาเซลเซียส 300 องศาเซลเซียส และ 350 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 3.5) ซึ่งการให้ความร้อนจะใช้แผ่นเซรามิก (ดังแสดงในรูปที่ 3.17) เมื่ออุ่นชิ้นงานจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วทำการเชื่อมชั้นรองพื้นและตามด้วยชั้นพอกแข็งตามค่าตัวแปรที่แสดงในตารางที่ 3.4



**รูปที่ 3.17** ตัวทำความร้อนเซรามิกแผ่น

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม

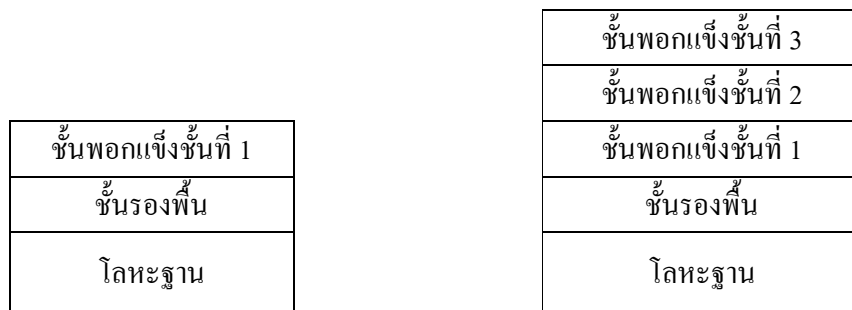
	ลวดชั้นพอกแข็ง	ลวดชั้นรองพื้น
กระแส (แอมป์)	200-220	190-210
แรงดัน (โวลต์)	23-25	23-25
ความเร็วเชื่อม (เซนติเมตรต่อนาที)	35-40	35-40
ระยะยื่นของลวด (มิลลิเมตร)	5	5
ขั้วไฟฟ้า	DCEP	DCEP
ความร้อนเข้า (กิโลจูลต่อเซนติเมตร)	7.35	6.82
แก๊สปกคลุม	90% Ar + 10%CO <sub>2</sub>	90% Ar + 10%CO <sub>2</sub>
อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม (ลิตรต่อนาที)	20	20

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม

ลำดับ	ชิ้นงาน	ความร้อนก่อนเชื่อม (°C)	จำนวนชั้นรองพื้น	จำนวนชั้นพอกแข็ง	กระบวนการเชื่อม
1.	NP-1-1-S	-	1	1	กึ่งอัตโนมัติ
2.	NP-1-3-S	-	1	3	กึ่งอัตโนมัติ
3.	NP-1-1-A	-	1	1	อัตโนมัติ
4.	NP-1-3-A	-	1	3	อัตโนมัติ
5.	250-1-1-S	250	1	1	กึ่งอัตโนมัติ
6.	250-1-3-S	250	1	3	กึ่งอัตโนมัติ
7.	250-1-1-A	250	1	1	อัตโนมัติ
8.	250-1-3-A	250	1	3	อัตโนมัติ
9.	300-1-1-S	300	1	1	กึ่งอัตโนมัติ
10.	300-1-3-S	300	1	3	กึ่งอัตโนมัติ
11.	300-1-1-A	300	1	1	อัตโนมัติ
12.	300-1-3-A	300	1	3	อัตโนมัติ
13.	350-1-1-S	350	1	1	กึ่งอัตโนมัติ
14.	350-1-3-S	350	1	3	กึ่งอัตโนมัติ

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขการเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม (ต่อ)

ลำดับ	ชิ้นงาน	ความร้อนก่อนเชื่อม (°C)	จำนวนชั้นรองพื้น	จำนวนชั้นพอกแข็ง	กระบวนการเชื่อม
15.	350-1-1-A	350	1	1	อัด โนมตี
16.	350-1-3-A	350	1	3	อัด โนมตี



รูปที่ 3.18 รูปแบบการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม (ก) ชั้นพอกแข็ง 1 ชั้น  
(ข) ชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น

โดยการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมมีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 เชื่อมชั้นรองพื้นด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ เชื่อมโดยกระบวนการเชื่อมแบบอัด โนมตีและกึ่งอัด โนมตีในท่าราบ ลวดใช้ในการเชื่อมรองพื้นใช้ลวดตามมาตรฐาน EN14700: TFe8 เป็นจำนวน 1 ชั้น

3.4.2 เชื่อมชั้นพอกแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ เชื่อมโดยกระบวนการเชื่อมแบบอัด โนมตีและกึ่งอัด โนมตีในท่าราบ ลวดใช้ในการเชื่อมพอกแข็งใช้ลวดตามมาตรฐาน EN14700: TFe10 เป็นจำนวน 1 ชั้น และ 3 ชั้น

3.4.3 หลังจากเชื่อมเสร็จแล้ว ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง (รูปที่ 3.19) หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปเตรียมเพื่อใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาค และรวมถึงชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งและทดสอบการสึกหรอ

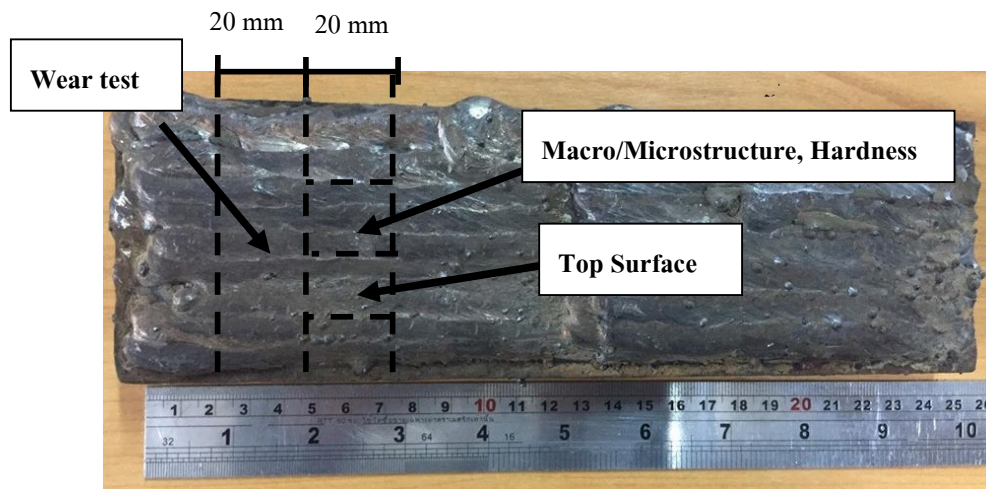


รูปที่ 3.19 ชิ้นงานหลังการเชื่อม

### 3.5 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

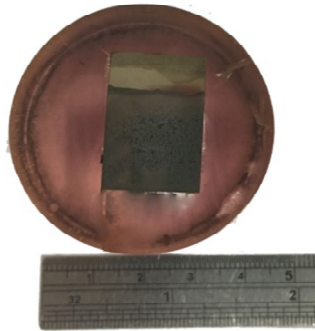
ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานมีดังนี้

3.5.1 ตัดชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมทั้ง 16 กรณี แสดงดังรูปที่ 3.20 เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาคบริเวณภาคตัดขวางและบริเวณผิวด้านบนของชิ้นพอกแข็ง



รูปที่ 3.20 ชิ้นงานแสดงรูปแบบการตัด

3.5.2 ทำเรื่อนแบบเย็น (Cold Mounting) ดังแสดงในรูป 3.21 เพื่อง่ายต่อการจับในขณะที่ทำการขัดชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบและวิเคราะห์ทางด้านโลหะวิทยาต่อไป



รูปที่ 3.21 ชิ้นงานที่ทำเรือนแบบเย็น

3.5.3 ทำการขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ P80 P120 P180 P360 P600 P800 P1200 และ P2400 ตามลำดับ

3.5.4 นำชิ้นงานทดสอบขัดด้วยผ้าสักหลาดและผงลูมินาขนาด 5 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.22 จากนั้นนำชิ้นงานไปล้างด้วยน้ำให้สะอาด เป่าให้ชิ้นงานแห้ง และนำชิ้นงานทดสอบไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator)



รูปที่ 3.22 การขัดชิ้นงานด้วยผงลูมินา

3.5.5 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดเสร็จเรียบร้อยแล้วมากัดผิวหน้าด้วยน้ำยาเคมี นำไปล้างด้วยน้ำสะอาด และทำให้ชิ้นงานแห้ง สำหรับวิธีการกัดผิวชิ้นงานในแต่ละบริเวณมีดังต่อไปนี้

(1) บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) ใช้สารละลาย ไนตอล 2 เปอร์เซนต์ เป็นเวลา 6 วินาที

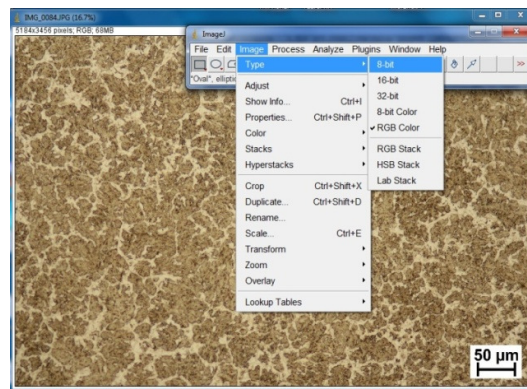


- (2) บริเวณชั้นรองพื้น ใช้สารละลายวีเอร่าเป็นเวลา 30 วินาที
- (3) บริเวณชั้นพอกแข็ง ใช้สารละลายวีเอร่าเป็นเวลา 15 วินาที
- (4) ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนสารละลายในการกัดผิวหน้าของชิ้นงาน ต้องผ่านกระบวนการขัดชิ้นงานใหม่ก่อนเปลี่ยนสารละลายทุกครั้ง

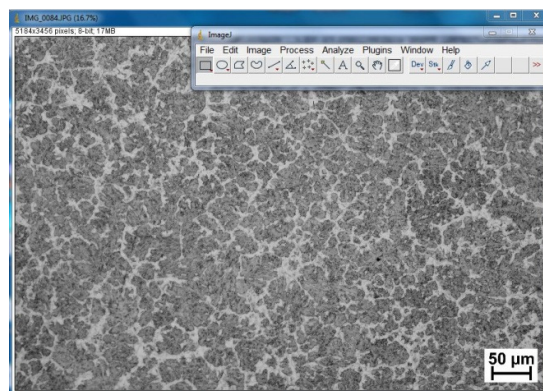
### 3.6 การตรวจวัดปริมาณมาร์เทนไซต์

การตรวจสอบปริมาณมาร์เทนไซต์ใช้โปรแกรม Image J ซึ่งมีวิธีการตรวจสอบดังนี้

- (1) นำรูปโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งเปลี่ยนเป็น 8 บิต ดังรูปที่ 3.23 หลังจากนั้นรูปโครงสร้างจุลภาคจะเปลี่ยนเป็นสีขาวกับสีทึบ โดยเฟสมาร์เทนไซต์จะเป็นสีทึบและเฟสออนเทนไนต์จะเป็นสีขาว ดังรูปที่ 3.24



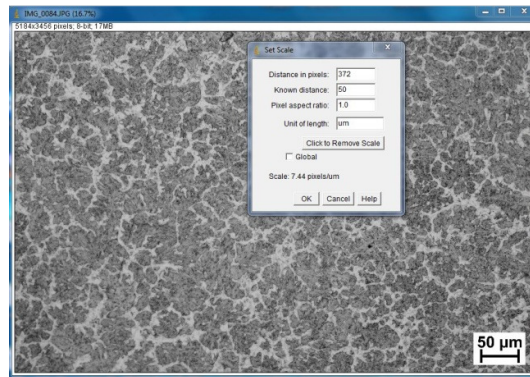
รูปที่ 3.23 วิธีการเปลี่ยนรูปโครงสร้างจุลภาคเป็น 8 บิต



รูปที่ 3.24 เปลี่ยนเป็นรูปภาพแบบขาวดำ

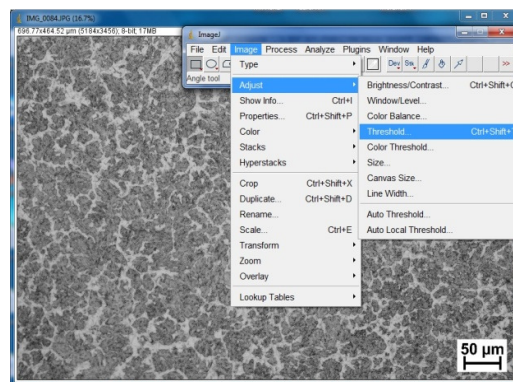
- (2) หลังจากรูปโครงสร้างเปลี่ยนเป็นขาวดำเสร็จ จากนั้นเซตสเกลของรูปดังรูปที่ 3.25



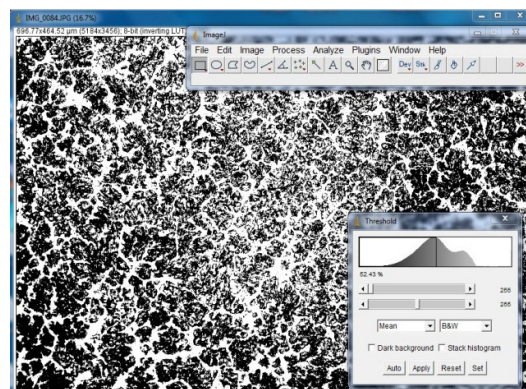


รูปที่ 3.25 การเซตสเกลของรูปโครงสร้างจุลภาค

(3) หลังจากเซตสเกลเสร็จไปที่คำสั่ง Threshold ดังรูปที่ 3.26 จากนั้นใช้ค่าเฉลี่ยและปรับเป็น B&W ดังแสดงในรูปที่ 3.27 แล้วกดยืนยัน

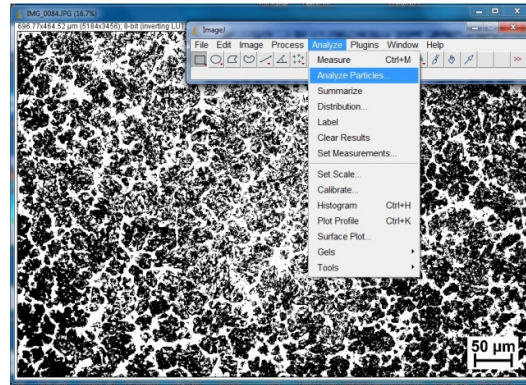


รูปที่ 3.26 วิธีการกดคำสั่ง Threshold

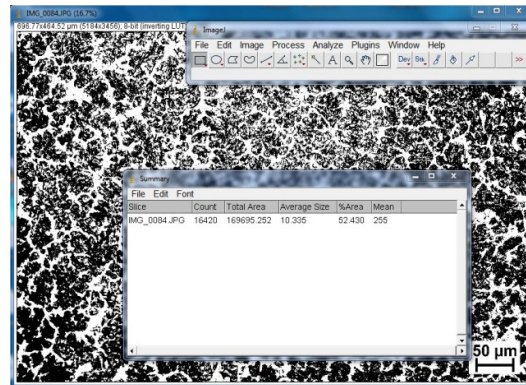


รูปที่ 3.27 ปรับค่าเฉลี่ยและปรับ B&W

(4) ขั้นตอนถัดมากดไปที่คำสั่ง Analyze Particles ดังรูปที่ 3.28 จากนั้นระบบทำการประมวลผลแล้วแสดงค่าดังรูปที่ 3.29 แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์มาร์เทนไซต์



รูปที่ 3.28 การกดคำสั่ง Analyze Particles



รูปที่ 3.29 ผลของการประมวลผลและแสดงค่าของปริมาณมาร์เทนไซต์

### 3.7 การตรวจสอบค่าความแข็ง

นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวเรียบร้อยแล้ว ทำการทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ซึ่งใช้โหลดเท่ากับ 200 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที สำหรับชิ้นงานด้านตามขวางเริ่มกดจากเนื้อโลหะเดิมถึงชั้นพอกแข็ง ซึ่งแต่ละจุดจะห่างกันเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร และชิ้นงานผิวด้านบนกดแบบสุ่ม 10 จุดโดยใช้โหลดและเวลาเท่ากับด้านตามขวาง

### 3.8 การตรวจสอบการสึกหรอแบบขัดสี

3.8.1 นำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วไปตัดในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อมให้ได้ขนาดยาว 75 มิลลิเมตร กว้าง 25.4 มิลลิเมตร และหนา 12.7 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปกัดผิวชั้นบนของชิ้นพอกแข็งให้ผิวเรียบ รูปที่ 3.30 แสดงชิ้นงานก่อนการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี



รูปที่ 3.30 ชิ้นทดสอบการสึกหรอ

3.8.2 ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีก่อนการทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีแสดงทศนิยมทั้งหมด 4 ตำแหน่ง

3.8.3 ทำการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี ด้วยเครื่องตามมาตรฐาน ASTM G65 ขั้นตอน A โดยทรายที่ใช้ต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนนำมาทดสอบ และขนาดทรายทดสอบมีขนาด 212-300 ไมโครเมตร สำหรับภาวะที่ใช้ทดสอบคือ ส้อยางหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ใช้อัตราการป้อนทราย 250 กรัมต่อนาที น้ำหนักทดสอบที่กดลงบนชิ้นงาน 13.5 กิโลกรัม ทดสอบจนได้ระยะทางในการเสียดสี 4309 เมตร

3.8.4 หลังจากการทดสอบการสึกหรอเสร็จ นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบอีกครั้ง

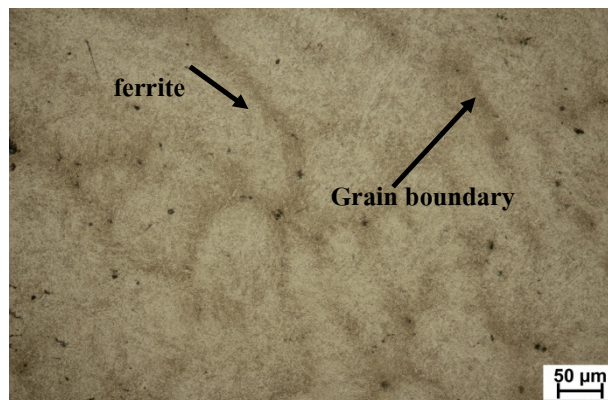
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในส่วนผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ในส่วนที่หนึ่งเป็นผลของโครงสร้างจุลภาค ค่าความแข็งและผลการทดสอบการสึกหรอ ในส่วนที่สองเป็นผลของการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแต่ละเงื่อนไขในการเชื่อม และในส่วนสุดท้ายเป็นผลของการทดสอบทางกล คือการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีและความแข็ง รวมถึงการวิเคราะห์ผลทั้งหมด

#### 4.1 โลหะฐาน

4.1.1 จากผลการตรวจดูโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่าของเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมที่กำลังขยาย 200 เท่า

จากรูปโครงสร้างจุลภาคเห็นได้ว่ามีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์เป็นหลัก โดยบริเวณที่เป็นเฟสสีขาวเป็นเฟสของเฟอร์ไรต์และในบริเวณที่เป็นเฟสสีขาวสลับดำเป็นเฟสของเฟิร์ลไลต์

4.1.2 ผลของการทดสอบค่าความแข็งของเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม มีค่าความแข็งประมาณ 200-210 วิกเกอร์

4.1.3 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม มีค่าความต้านการสึกหรออยู่ที่ 1.56 เมตรต่อมิลลิกรัมและน้ำหนักที่หายไป 2.7613 กรัม

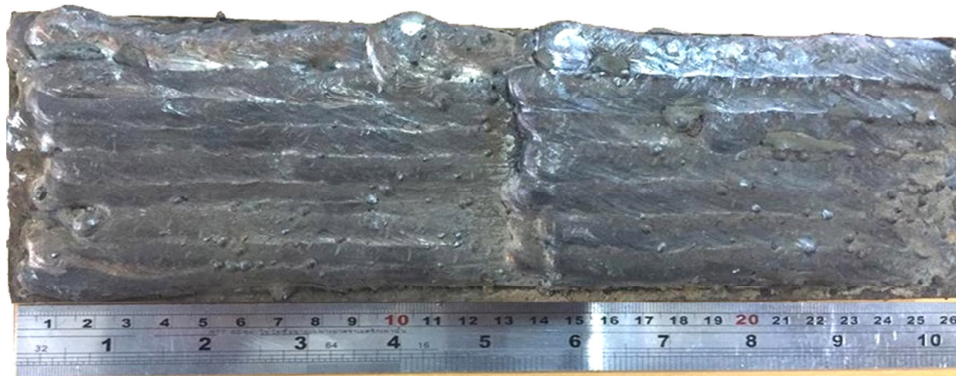


#### 4.2 ลักษณะทางกายภาพบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของหลังการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ

จากลักษณะทางกายภาพของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติพบว่าหลังจากการเชื่อมมีเม็ดโลหะเกาะบริเวณแนวเชื่อมมากกว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ ในส่วนของการเชื่อมแบบอัตโนมัติแนวเชื่อมดูสวยและเรียบกว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ ขนาดแนวเชื่อมของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติโตกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติ การเชื่อมที่ปรากฏเป็นการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นและ 3 ชั้น ดังแสดงในรูป 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ



รูปที่ 4.3 การเชื่อมแบบอัตโนมัติ

#### 4.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแต่ละเงื่อนไข

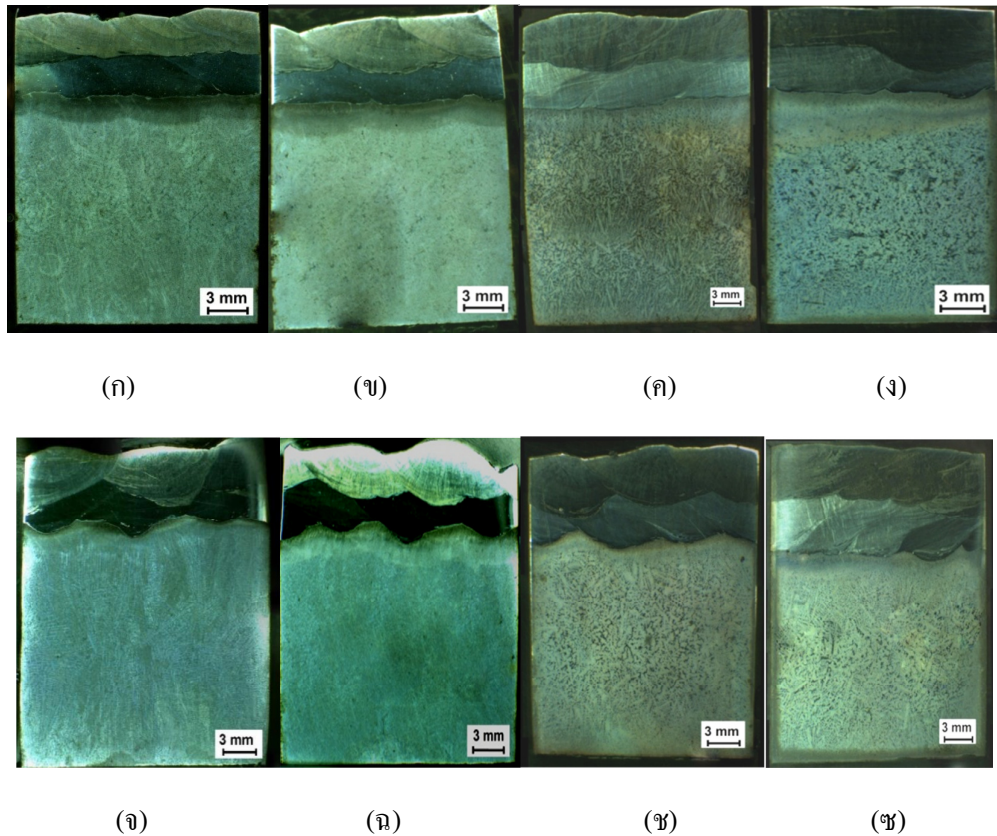
##### 4.3.1 โครงสร้างมหภาค

(1) โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมในเงื่อนไขที่มีการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น ทั้งการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ

จากโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นของทุกเงื่อนไขของการเชื่อมแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ ไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องในทุกเงื่อนไขของการเชื่อม การเชื่อม

แบบอัดโนมัตมีการซึมลึกสูงกว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมัตสังเกตจากการเชื่อมบริเวณชั้นรองพื้นและชั้นพอกแข็ง ขนาดความหนาของบริเวณกระพือร้อนของการเชื่อมแบบอัดโนมัตเล็กกว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมัต จากโครงสร้างจุลภาคความหนาของชั้นรองพื้นมีค่าประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 มีความหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4

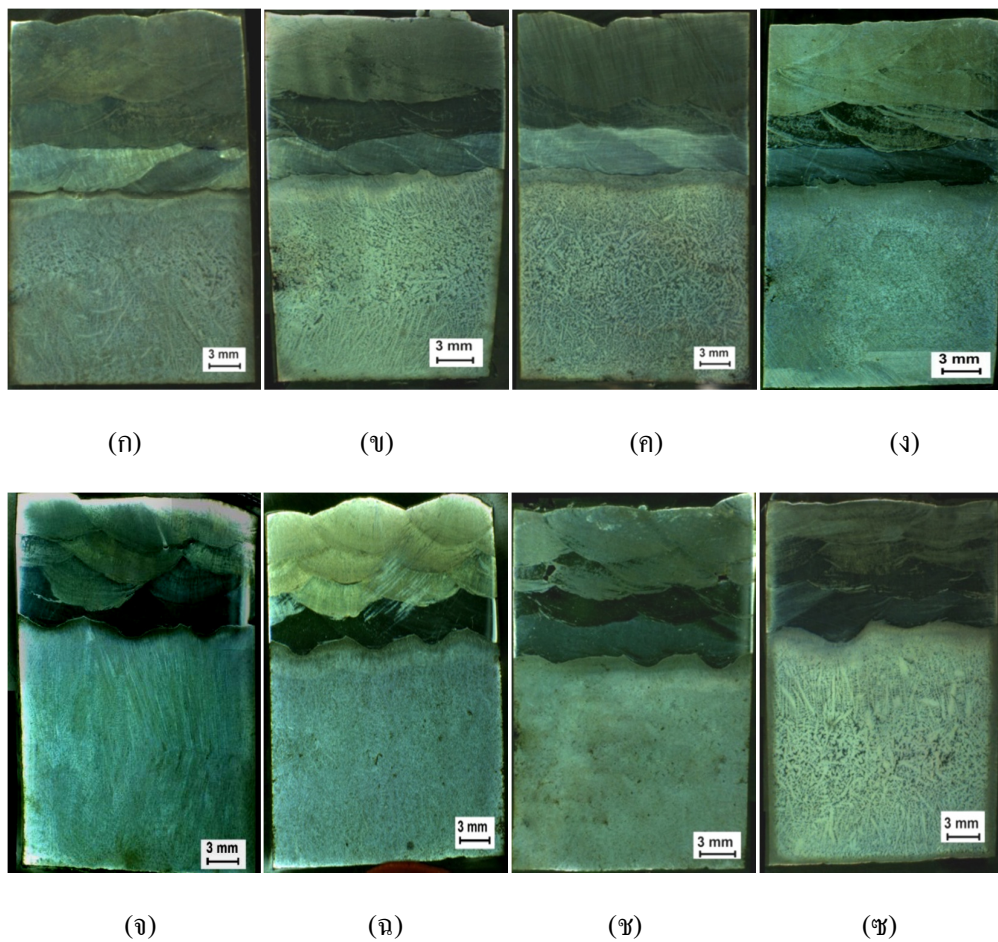
จากการสังเกตตามลักษณะกายภาพของการเชื่อมทั้งสองแบบทั้งกึ่งอัดโนมัตและอัดโนมัตให้ผลที่ใกล้เคียงกัน แตกต่างกันตรงการซึมลึกที่การเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมัตมีการซึมลึกสูงสำหรับการเชื่อมพอกแข็งไม่ต้องการการซึมลึกสูง ดังนั้นการเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมัตในงานวิจัยนี้ให้ผลที่ดีกว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบอัดโนมัต



รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมพอก 1 ชั้น (ก) NP-1-1-S (ข) 250-1-1-S (ค) 300-1-1-S (ง) 350-1-1-S (ฉ) NP-1-1-A (จ) 250-1-1-A (ช) 300-1-1-A (ข) 350-1-1-A

(2) โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมในเงื่อนไขที่มีการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นทั้งการเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมัตและอัดโนมัต

โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นในทุกเงื่อนไขทั้งการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติไม่พบรอยแตกและข้อบกพร่องในทุกเงื่อนไข ในบริเวณกระทบร้อนของทุกเงื่อนไขไม่พบรอยแตกร้าว การเชื่อมแบบอัตโนมัติมีการซึมลึกสูงกว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ การเชื่อมพอกแข็งของชั้นที่ 1 จะสังเกตเห็นว่ามีการเงือจางจากชั้นรองพื้นได้ชัดเจนตามโครงสร้างมหภาค การเชื่อมชั้นรองพื้นยึดติดดีระหว่างชั้นโลหะฐานและชั้นพอกแข็ง จากโครงสร้างจุลภาคความหนาของชั้นรองพื้นมีค่าประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 มีความหนาประมาณ 3-4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงสร้างมหภาคของการเชื่อม 3 ชั้น (ก) NP-1-1-S (ข) 250-1-1-S (ค) 300-1-1-S (ง) 350-1-1-S (จ) NP-1-1-A (ฉ) 250-1-1-A (ช) 300-1-1-A (ซ) 350-1-1-A

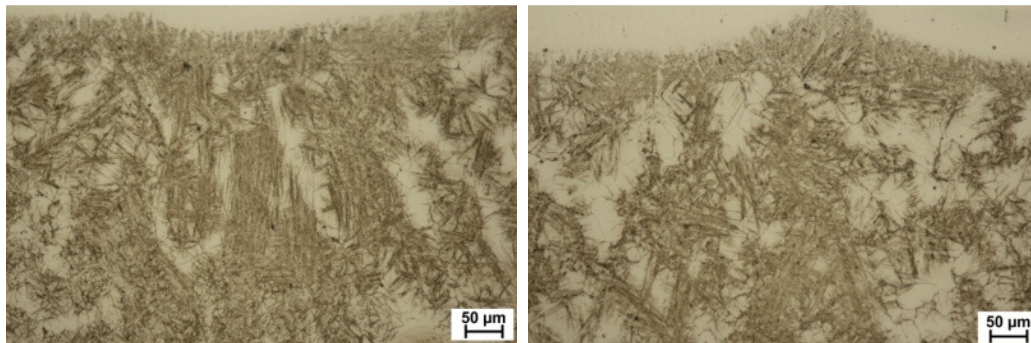
### 4.3.2 โครงสร้างจุลภาค

#### 4.3.2.1 บริเวณกระทบร้อน



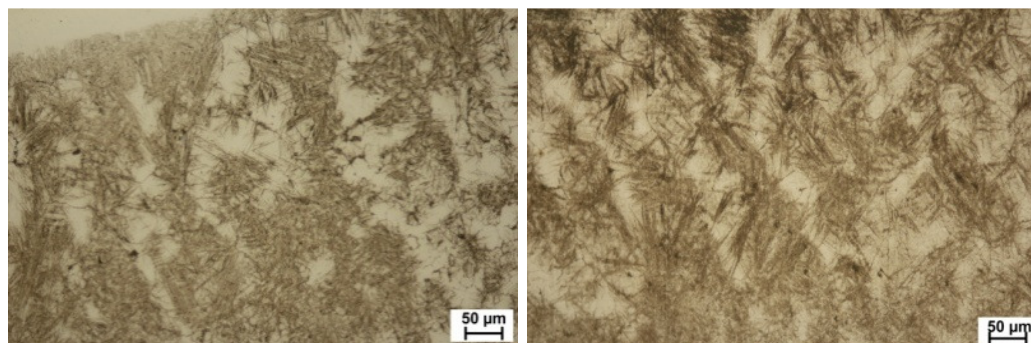
โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบบร้อนของการอุ่นขึ้นงานก่อนการเชื่อมของอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส 300 องศาเซลเซียส 350 องศาเซลเซียส และไม่มีการอุ่นขึ้นงาน

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบบร้อนของแต่ละอุณหภูมิการอุ่นขึ้นงานก่อนการเชื่อม ประกอบด้วยเฟสสีทึบซึ่งเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีลักษณะคล้ายเข็มเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วแต่ไม่เกิดการหลอมเหลวบริเวณนี้ทำให้โลหะเดิมซึ่งประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ เปลี่ยนเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ซึ่งมีสมบัติที่แข็ง ส่วนเฟสสีขาวเป็นเฟสออสเทนไนต์ที่หลงเหลือจากการเปลี่ยนเฟส จากรูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนที่ไม่มีการอุ่นขึ้นงานก่อนการเชื่อมสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณเฟสสีทึบหรือเฟสมาร์เทนไซต์มีปริมาณที่มากกว่าการอุ่นขึ้นงานก่อนการเชื่อม 250 องศาเซลเซียส 300 องศาเซลเซียส และ 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากตามทฤษฎีการอุ่นขึ้นงานก่อนการเชื่อมของเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมควรอุ่นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส กับ 350 องศาเซลเซียส จากการสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณเฟสสีทึบหรือปริมาณเฟสมาร์เทนไซต์ของเงื่อนไขที่มีการอุ่นขึ้นงานมีปริมาณสูงกว่าเงื่อนไขที่ไม่มีการอุ่นขึ้นงานก่อนการเชื่อม



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบบของการอุ่นขึ้นงานที่อุณหภูมิ (ก) ไม่มีการอุ่นขึ้นงาน

(ข) 250 °C (ค) 300 °C (ง) 350 °C



#### 4.3.2.2 ชั้นรองพื้น

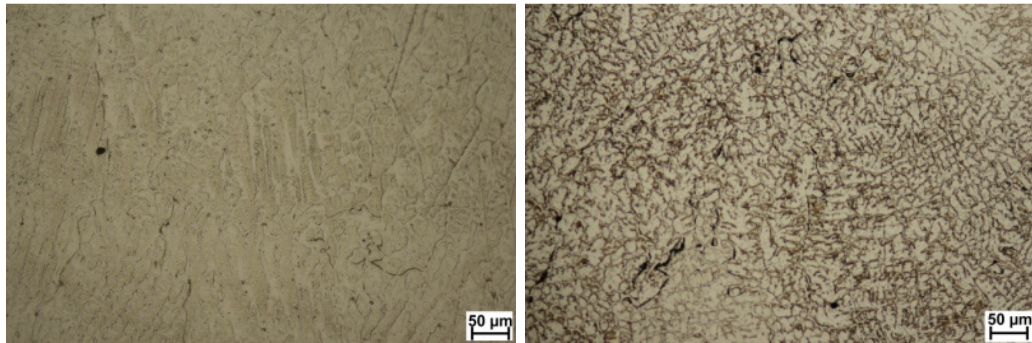
จากรูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของชั้นรองพื้นเป็น โครงสร้างอสเทนิติกซึ่งชั้นรองพื้นทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างโลหะ 2 ชนิดให้ยึดติดกันในกรณีที่เนื้อโลหะเดิมและชั้นพอกแข็งมีสมบัติที่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของชั้นรองพื้น

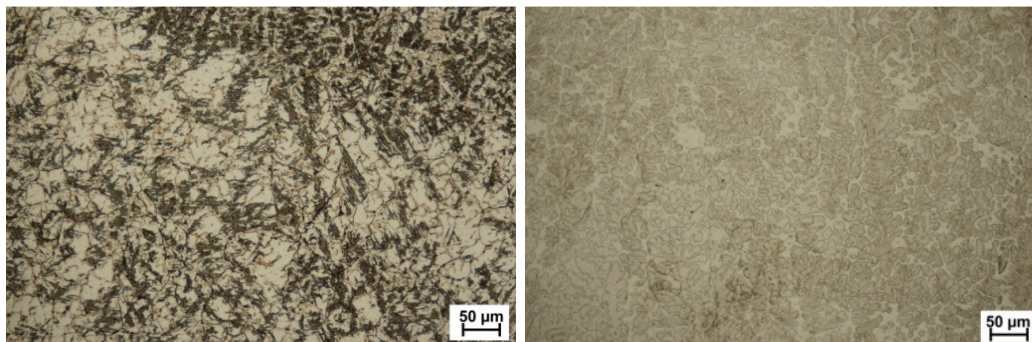
#### 4.3.2.3 ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1

จากโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ ในส่วนของการอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานไม่ส่งผลต่อชั้นพอกแข็ง โดยโครงสร้างของชั้นพอกแข็งเป็น โครงสร้างมาร์เทนซิติก ซึ่งเฟสที่พบเป็นเฟสมาร์เทนไซต์และเฟสสีขาวเป็นเฟสออสเทนไนต์ แต่โครงสร้างชั้นพอกแข็งชั้นนี้สังเกตเห็น โครงสร้างได้ไม่ชัดเจนมากนักเนื่องจากเป็นผลการเงาจากชั้นรองพื้นเนื่องจากชั้นรองพื้นมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นในบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 นั้นสังเกตเห็น โครงสร้างได้ไม่ชัดเจนเพราะเกิดการผสมระหว่างเฟสสองเฟสที่เกิดขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 โดยชั้นพอกแข็งชั้นนี้เป็นชั้นที่อยู่ติดชั้นรองพื้นมากที่สุด ทำให้เกิดเฟสออสเทนนิคผสมกับมาร์เทนซิติกมากที่สุด สำหรับการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติในเงื่อนไขที่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม 300 องศาเซลเซียสสังเกตเห็น โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ได้ชัดเจนกว่าเงื่อนไขที่เชื่อมโดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ และในส่วนของเฟสออสเทนไนต์ซึ่งเป็นเฟสสีขาวนั้นจะพบสูงมากในชั้นพอกแข็งชั้นนี้



(ก)

(ข)



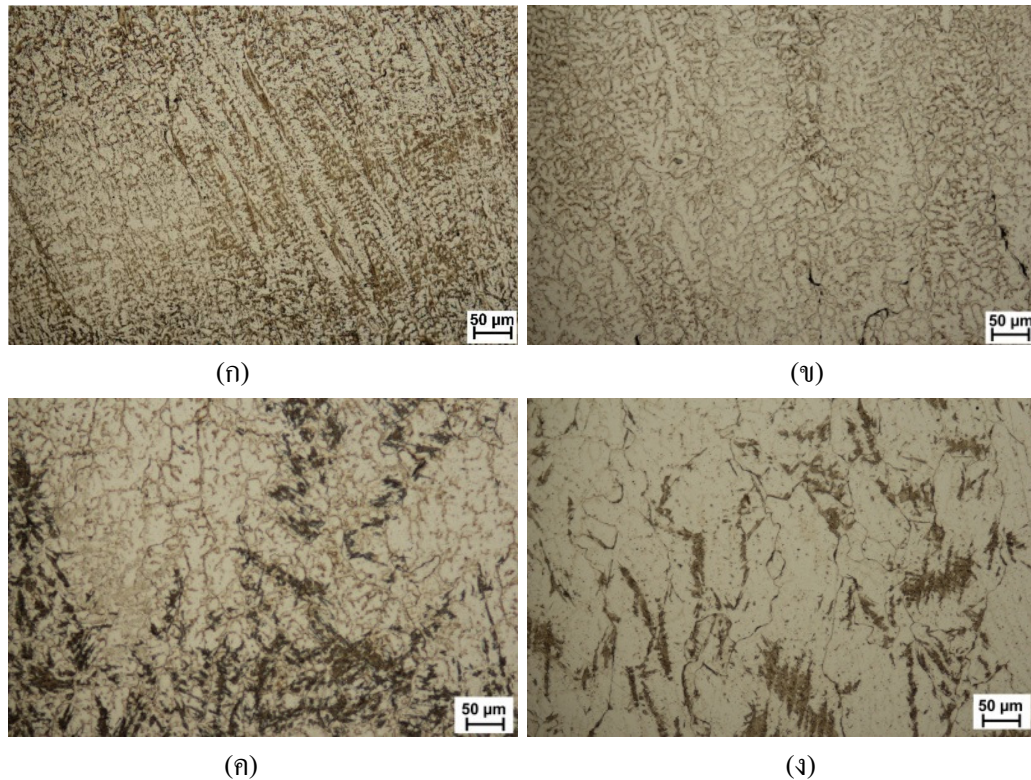
(ค)

(ง)

**รูปที่ 4.8** โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 (ก) NP-1-1-S (ข) 250-1-1-S (ค) 300-1-1-S (ง) 350-1-1-S

โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ดังรูปที่ 4.9 ของการเชื่อมแบบอัดโนมิตซึ่งมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนซิติค โดยเฟสที่หยาบเป็นเฟสของมาร์เทนไซต์และเฟสที่ละเอียดซึ่งเป็นเฟสของออสเทนไนต์ สำหรับชั้นพอกแข็งชั้นนี้เห็น โครงสร้างไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ซึ่งโดยปกติแล้วเชื่อมพอกแข็งชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ แต่เนื่องจากเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้น จึงทำให้ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 มีออสเทนไนต์ในปริมาณมาก

เมื่อเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ระหว่างการเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมิตและอัดโนมิต สังเกตเห็นว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเดียวกันคือเป็นโครงสร้างมาร์เทนซิติคลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ มีเฟสออสเทนไนต์รอบล้อม ซึ่งการเชื่อมทั้งสองแบบให้ผลที่เหมือนกัน โดยโครงสร้างที่สังเกตเห็นได้ว่าการเชื่อมทั้งสองแบบเห็นโครงสร้างได้ไม่ชัดเจนอันเป็นผลมาจากชั้นรองพื้นเหมือนกันทั้งสองกระบวนการเชื่อม

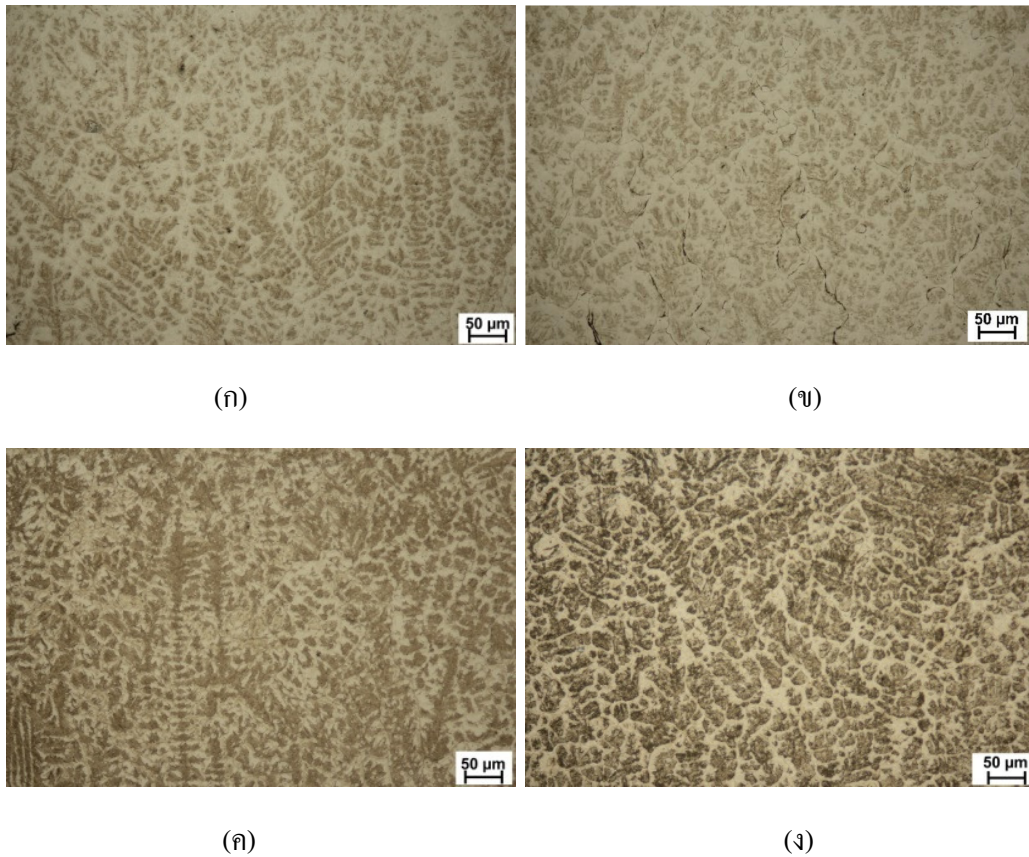


รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 (ก) NP-1-1-A (ข) 250-1-1-A (ค) 300-1-1-A  
(ง) 350-1-1-A

#### 4.3.2.4 ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2

โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 ของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนซิติค โดยมีเฟสสีทึบเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ซึ่งมีลักษณะเป็นเดนไดรต์และมีเฟสอสเทนไนต์อยู่รอบๆ เช่นเดียวกับชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 แต่มีปริมาณของมาร์เทนไซต์มากกว่าชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เนื่องจากเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้นน้อยลง ทำให้เกิดปริมาณมาร์เทนไซต์ที่สูงขึ้น สำหรับชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 นี้มีการเจือจางจากชั้นรองพื้นน้อยกว่าชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ซึ่งสามารถยืนยันได้จากค่าความแข็งที่เกิดขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 ซึ่งมีค่าความแข็งที่สูงกว่าชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 อย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 4.10

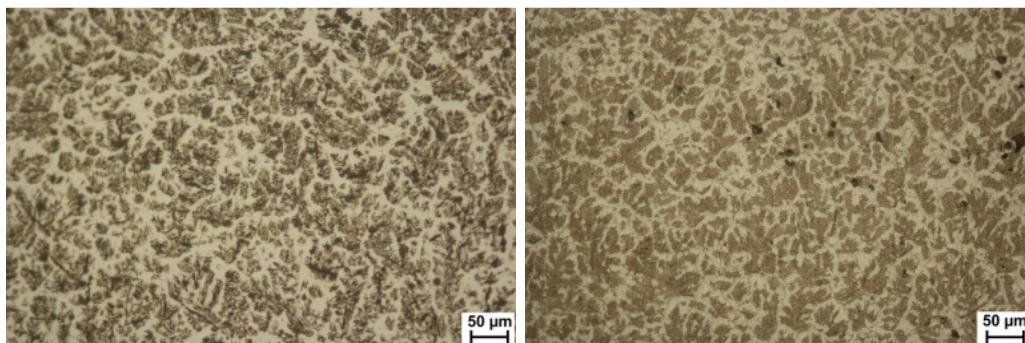




**รูปที่ 4.10** โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 (ก) NP-1-3-S (ข) 250-1-3-S (ค) 300-1-3-S  
(ง) 350-1-3-S

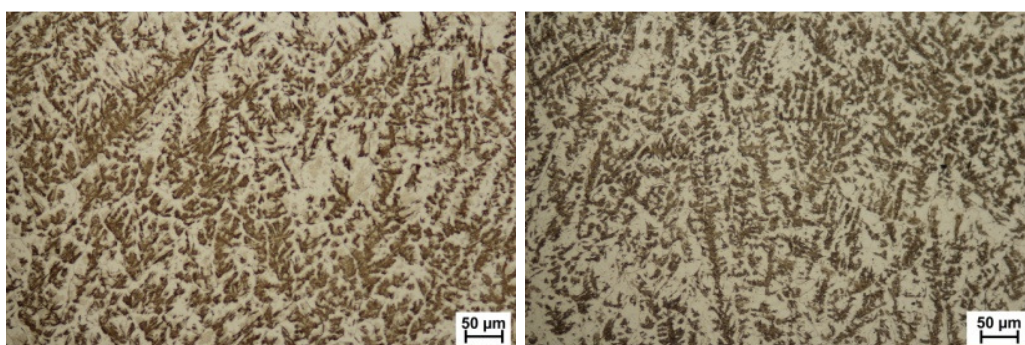
โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 เป็นการเชื่อมแบบอัดโนมิติซึ่งมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนซิติคเช่นเดียวกับการเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 2 แบบกึ่งอัดโนมิติ การเจือจางจากชั้นรองพื้นน้อยลงทำให้เห็นโครงสร้างมาร์เทนซิติคได้ชัดเจนขึ้นกว่าชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.11

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 ระหว่างการเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมิติและอัดโนมิติ สังเกตเห็นว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเดียวกันคือเป็นโครงสร้างมาร์เทนซิติคลักษณะเกรนเป็นแบบเดนไดรต์ มีเฟสอสเทนไนต์รอบล้อม จากการสังเกตโครงสร้างจุลภาคความหนาแน่นของเฟสมาร์เทนไซด์ของการเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมิติมีมากกว่าการเชื่อมแบบอัดโนมิติเมื่อเห็นได้ชัดเช่นเงื่อนไขของการเชื่อม 300-1-3-S เทียบกับเงื่อนไข 300-1-3-A โดยเทียบความแตกต่างระหว่างการเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมิติและอัดโนมิติ เห็นได้ว่าปริมาณความหนาแน่นของมาร์เทนไซด์ของการเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมิติมีปริมาณมากกว่าการเชื่อมแบบอัดโนมิติได้อย่างชัดเจน



(ก)

(ข)



(ค)

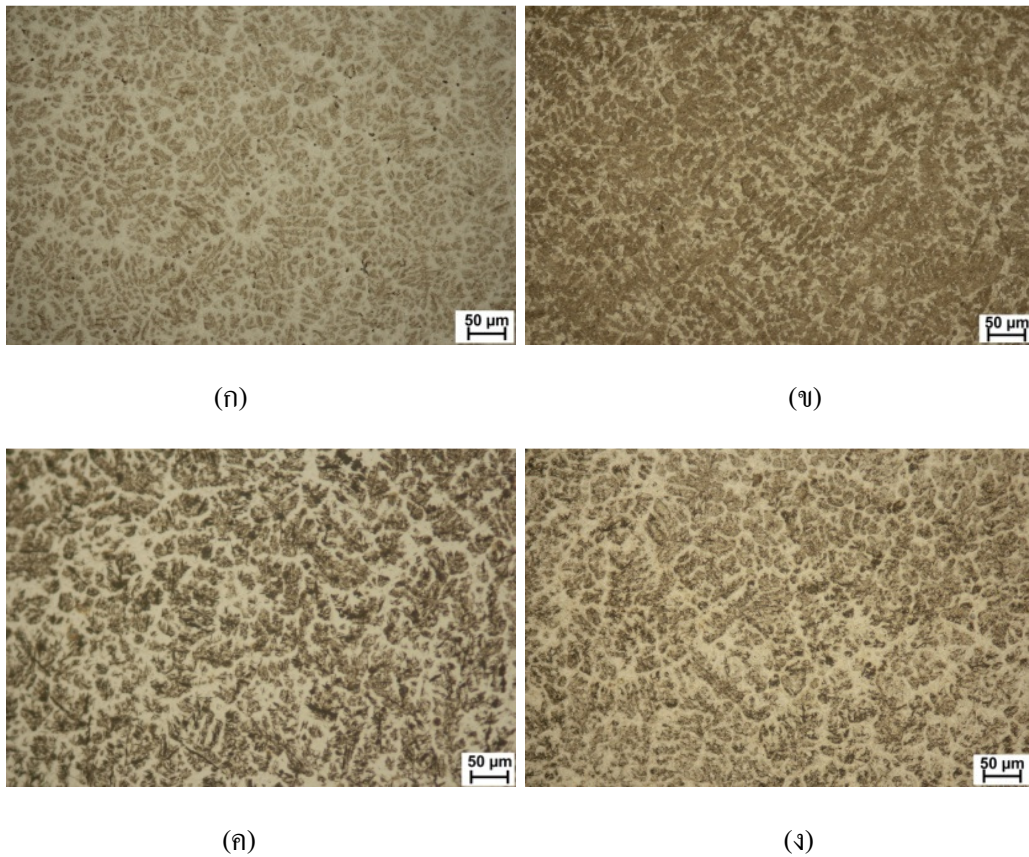
(ง)

รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 (ก) NP-1-3-A (ข) 250-1-3-A (ค) 300-1-3-A  
(ง) 350-1-3-A

#### 4.3.2.5 ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3

โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 ของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ โครงสร้างเป็นโครงสร้างเดียวกับชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 คือเป็นโครงสร้างมาร์เทนซิติกลักษณะเป็นเดนไดรต์ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมชนิดมาร์เทนซิติก เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วแข็งตัวก็จะก่อรูปร่างเป็นมาร์เทนซิติก โดยเฟสที่หยาบเป็นเฟสของมาร์เทนไซต์ และเฟสที่ละเอียดเป็นเฟสของออสเทนไนต์ ซึ่งในชั้นพอกแข็งชั้นนี้สังเกตเห็นโครงสร้างได้ชัดเจนเนื่องจากแทบไม่มีการเจือจางจากชั้นรองพื้น ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

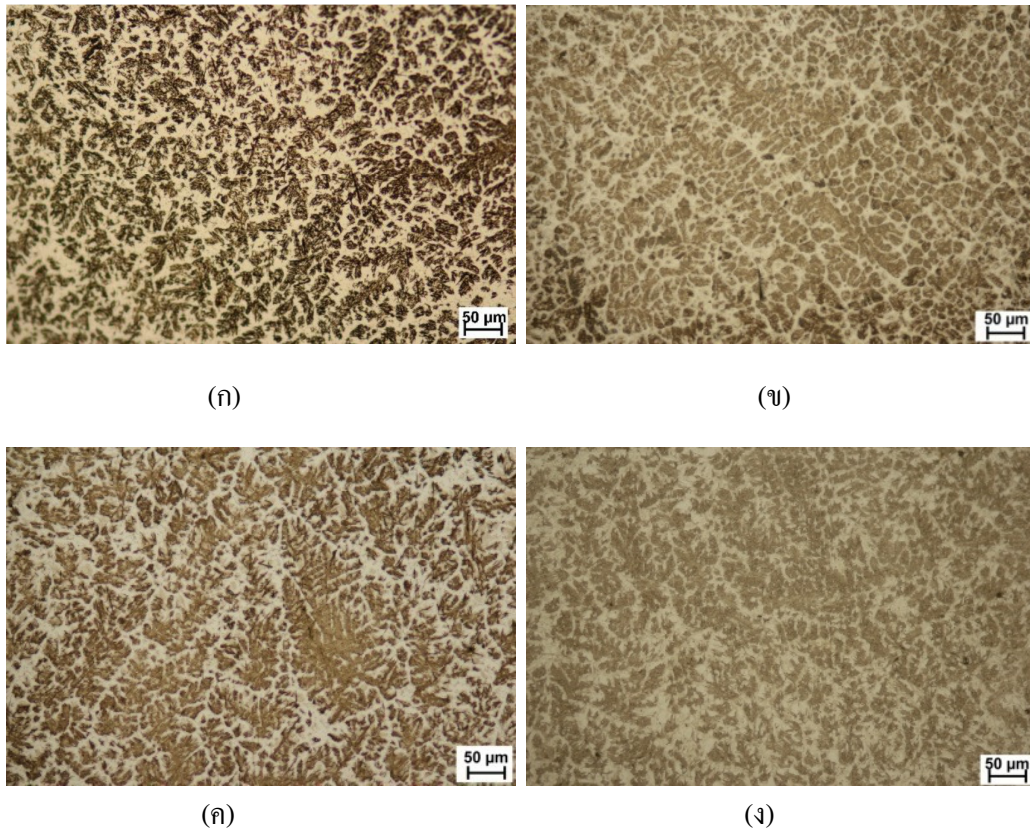




รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 (ก) NP-1-3-S (ข) 250-1-3-S (ค) 300-1-3-S  
(ง) 350-1-3-S

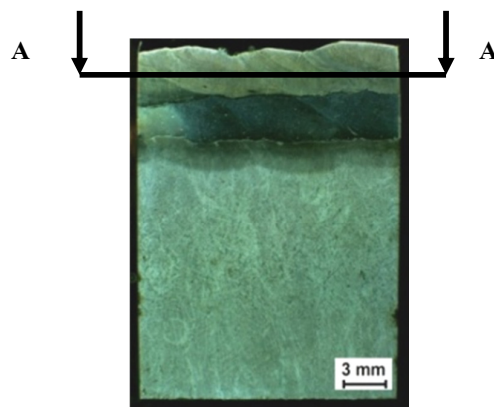
โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 ของการเชื่อมแบบอัดโนมิตีดังรูปที่ 4.13 โครงสร้างเป็นมาร์เทนซิติคมีลักษณะเป็นเดนไดรต์เช่นเดียวกับชั้นพอกแข็งชั้นอื่นๆ เนื่องจากใช้ลวดชนิดเดียวกันในการเชื่อม โดยเฟสที่พบมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซด์และเฟสซิวิตมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์

เมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมระหว่างการเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมิตีและอัดโนมิตีสังเกตเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 เป็นโครงสร้างชนิดเดียวกันคือเป็นโครงสร้างมาร์เทนซิติค ปริมาณความหนาแน่นของเฟสมาร์เทนไซด์เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองกระบวนการเชื่อมมีปริมาณใกล้เคียงกันเนื่องจากการเจือจางจากชั้นรองพื้นน้อยทำให้เกิดเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซด์ได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 (ก) NP-1-3-A (ข) 250-1-3-A (ค) 300-1-3-A  
(ง) 350-1-3-A

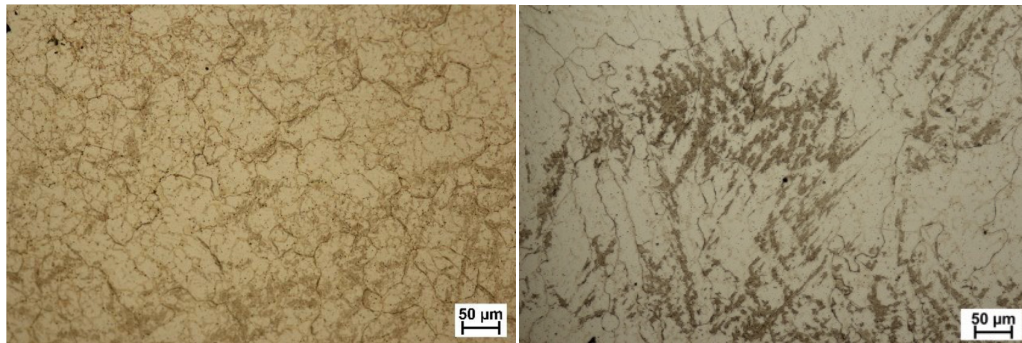
#### 4.3.2.5 โครงสร้างจุลภาคของผิวด้านบนของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1



รูปที่ 4.14 มุมมองการตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของผิวด้านบน



โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 เมื่อตรวจสอบบริเวณผิวด้านบนของชั้นพอกแข็ง ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งมีโครงสร้างมาร์เทนซิติกเช่นเดียวกับเมื่อตรวจสอบที่ด้านตามขวางของชิ้นงาน แต่แตกต่างกันที่บริเวณผิวด้านบนของชั้นพอกแข็งมีลักษณะเกรนเป็นกลุ่มก้อนของมาร์เทนไซต์แต่ ด้านตามขวางมีเฟสมาร์เทนไซต์ลักษณะเกรนเป็นเดนไดรต์ สำหรับชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ทั้งการ ตรวจสอบทางด้านผิวด้านบนและด้านตามขวางยังสังเกตเห็น โครงสร้างได้ไม่ชัดเจนเนื่องจากการ เจือจางจากชั้นรองพื้นมาก



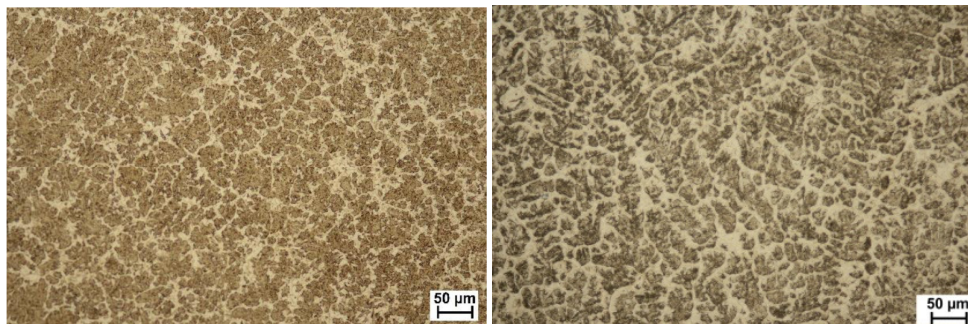
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 (ก) ผิวด้านบน (ข) ด้านตามขวาง

#### 4.3.2.6 โครงสร้างจุลภาคของผิวด้านบนของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3

โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 ทั้งการตรวจสอบโครงสร้างทั้งด้านผิวด้านบนและด้าน ตามขวางของชิ้นงานดังรูปที่ 4.16 โดยมีโครงสร้างมาร์เทนซิติก จากการสังเกตโครงสร้างจุลภาค ของผิวด้านบนมีลักษณะเกรนเป็นเกราะ แต่โครงสร้างทางด้านตามขวางมีลักษณะเกรนเป็นเดน- ไดรต์ โครงสร้างจุลภาคชั้นนี้สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน มองเห็นเฟสมาร์เทนไซต์และบริเวณเฟส ออนเทนไนต์ได้ชัดเจน



(ก)

(ข)

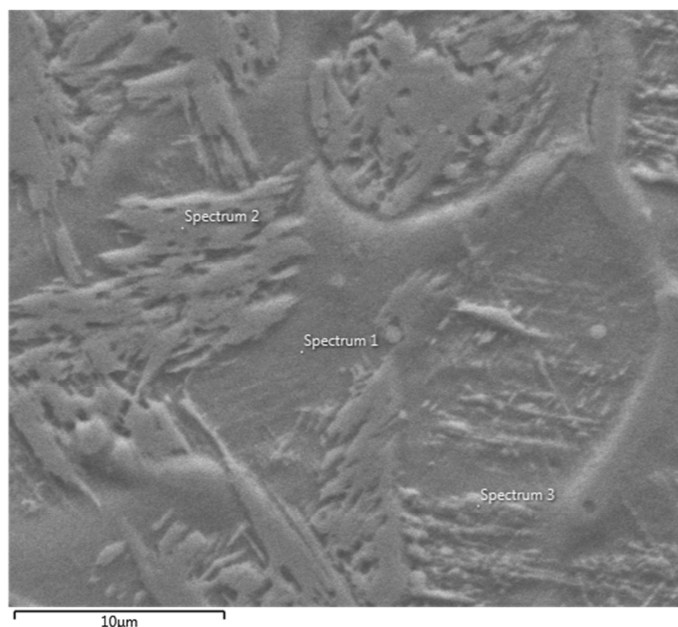
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 (ก) ผิวด้านบน (ข) ด้านตามขวาง



### 4.3.2.7 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 3 (SEM)

#### (1) ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1

จากรูป 4.17 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น โครงสร้างเป็นมาร์เทนซิติกที่แทรกอยู่ในเฟสออสเทนนิติก แต่พบว่าปริมาณธาตุที่ทำให้เกิดโครงสร้างออสเทนนิติกมีมากขึ้น เช่น โครเมียม แมงกานีส นิกเกิล ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นรองพื้น ซึ่งชั้นรองพื้นมีปริมาณธาตุ โครเมียมและนิกเกิลสูง โดยสเปกตรัม 1 และ 3 เป็นเฟสมาร์เทนไซต์ เนื่องจากมีปริมาณธาตุโครเมียมและแมงกานีสใกล้เคียงกับส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมพอกแข็ง



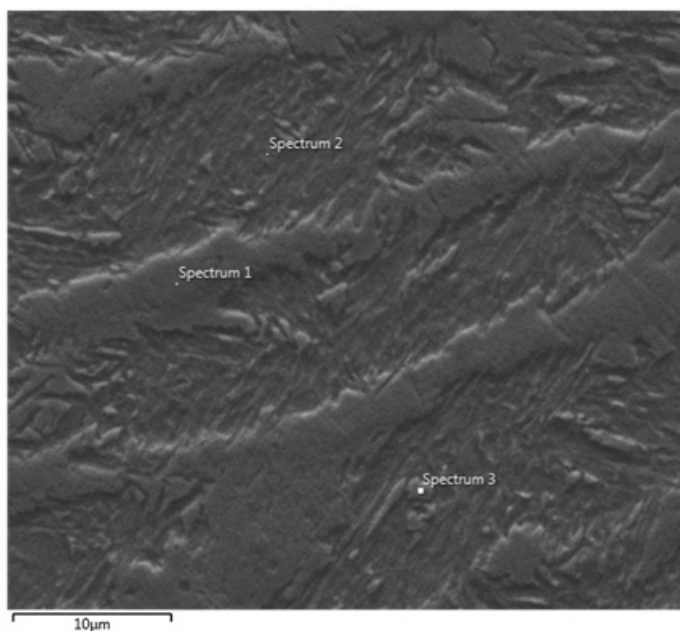
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของแต่ละสเปกตัมของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1

Spectrum	%Fe	%C	%Cr	%Mn	%Ni	%Si
1	74.7	7.4	11.6	2.7	2.7	0.9
2	77.8	7.7	9.5	2.1	2.2	0.7
3	76.3	9.7	9.7	1.8	1.8	0.7

## (2) ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3

รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การตรวจสอบบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 พบว่าบริเวณที่มีลักษณะคล้ายๆ เซม มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ที่มีปริมาณของเหล็ก คาร์บอน มากกว่าบริเวณอื่นๆ ส่วนของเฟสสีขาวซึ่งเป็นโครงสร้างเป็นออสเทนนิคซึ่งมีปริมาณ โครเมียมและแมงกานีสเป็นจำนวนมาก ดังข้อมูลตามตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3

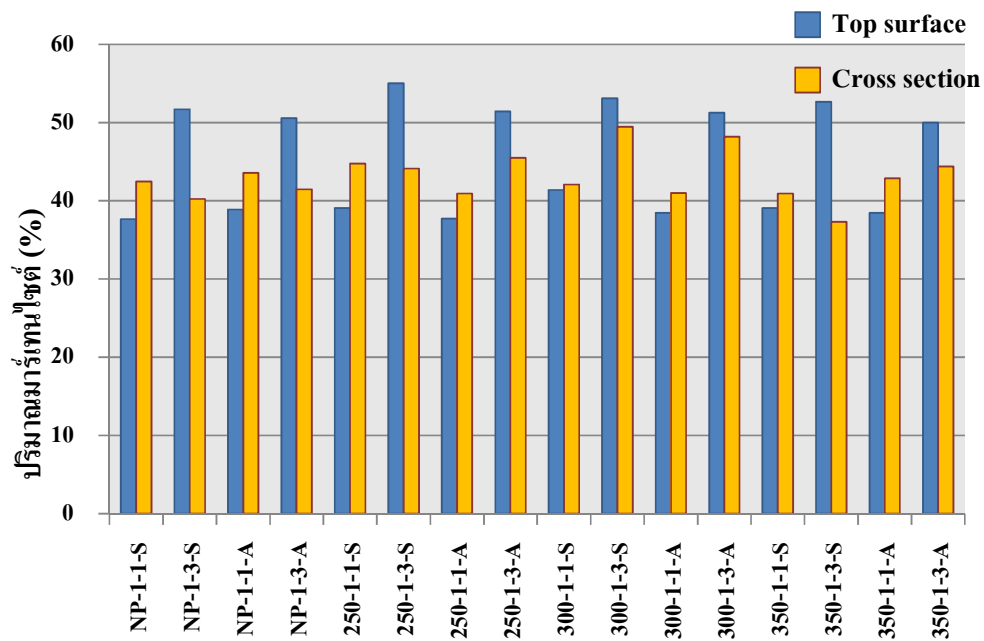
ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมีของแต่ละสเปกตัมของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3

Spectrum	%Fe	%C	%Cr	%Mn	%Mo
1	64.8	17.3	9.9	2.4	1.3
2	65.1	23.5	5.3	1.4	0.5
3	57.8	30.9	4.7	1.2	-

### 4.4 ปริมาณของเฟสมาร์เทนไซต์

จากรูปที่ 4.19 แสดงปริมาณของเฟสมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นในชั้นพอกแข็งทุกเงื่อนไข โดยสังเกตเห็นได้ว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นทุกเงื่อนไขเมื่อเปรียบเทียบปริมาณเฟสมาร์เทนไซต์ของผิวด้านบนและด้านตามขวางของชั้นพอกแข็งจะเห็นได้ว่าปริมาณเฟสมาร์เทนไซต์ของด้านตามขวางมี

ปริมาณสูงกว่าผิวด้านบนของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น แต่ในทางกลับกันการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นทุกเงื่อนไขเห็นได้ว่าปริมาณเฟสมาร์เทนไซต์ของด้านบนมีปริมาณสูงกว่าด้านตามขวางเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของด้านบนมีเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีรูปร่างเป็นเกาะหนาแน่นกว่าด้านตามขวางที่มีลักษณะเป็นกิ่งเคนไดรต์ เมื่อเทียบปริมาณมาร์เทนไซต์ของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นเห็นได้ว่าปริมาณมาร์เทนไซต์ของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติมีปริมาณสูงกว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติในทุกเงื่อนไขของการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคผิวด้านบนแต่ในทางกลับกันการตรวจดูโครงสร้างจุลภาคตามด้านขวางปริมาณมาร์เทนไซต์ของการเชื่อมอัตโนมัติมีปริมาณสูงกว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ ส่วนการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นทั้งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคผิวด้านบนและด้านตามขวางปริมาณมาร์เทนไซต์มีปริมาณใกล้เคียงกันทั้งการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ ปริมาณมาร์เทนไซต์มีผลต่อค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีด้วยเมื่อปริมาณมาร์เทนไซต์สูงส่งผลให้ค่าความแข็งสูงและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีสูงด้วย

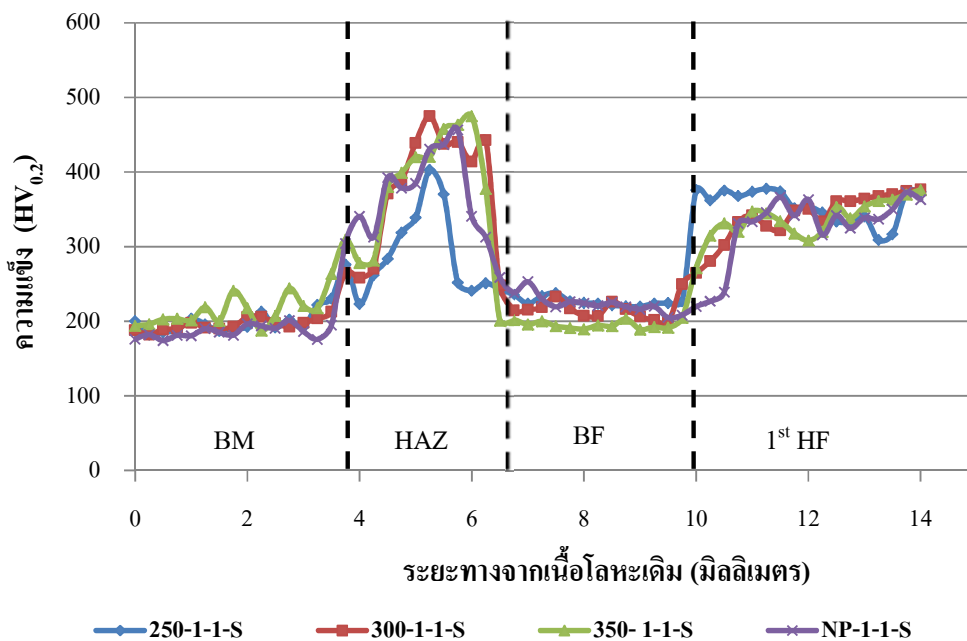


รูปที่ 4.19 ปริมาณของเฟสมาร์เทนไซต์ของการเชื่อมพอกแข็ง

#### 4.5 ผลการตรวจสอบความแข็ง

##### 4.5.1 ผลการตรวจสอบความแข็งด้านตามขวาง

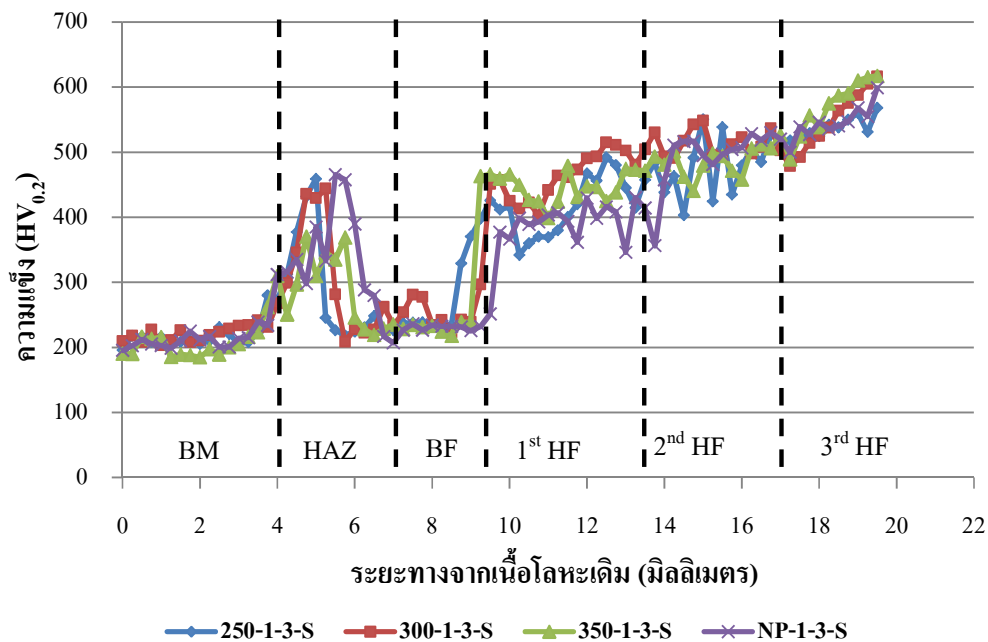
จากรูปที่ 4.20 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น โดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับโลหะเดิมซึ่งเป็นเหล็กกล้า 3.5 เปอร์เซ็นต์ โครเมียมมีค่าความแข็งประมาณ 200-210 วิกเกอร์ ชั้นรองพื้นมีค่าความแข็งประมาณ 210-220 วิกเกอร์ ในส่วนของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งประมาณ 330-370 วิกเกอร์ เนื่องจากชั้นนี้เกิดการเงือจางจากชั้นรองพื้นสูงซึ่งมีค่าความแข็งต่ำทำให้ค่าความแข็งชั้นพอกแข็งชั้นนี้มีค่าต่ำลงทุกเงื่อนไข ในส่วนของบริเวณกระทบริ้นมีค่าความแข็งสูงเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์มีค่าความแข็งประมาณ 400-470 วิกเกอร์ เมื่อเปรียบเทียบแต่ละอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานของค่าความแข็งบริเวณกระทบริ้นตามทฤษฎีค่าความแข็งที่ควรต่ำสุดอยู่ที่อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานการเชื่อมอยู่ที่ 350 องศาเซลเซียส จากกราฟนี้ค่าความแข็งของบริเวณกระทบริ้นที่ต่ำสุดอยู่ที่อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส สำหรับชิ้นงานที่ใช้งานวิจัยนี้มีขนาดเล็กทำให้อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานไม่มีผลเพราะอุณหภูมิหลังการเชื่อมของแต่ละเงื่อนไขมีอุณหภูมิเท่ากันอยู่ที่ 650 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เย็นในอากาศเหมือนกันทำให้ค่าความแข็งบริเวณกระทบริ้นมีค่าใกล้เคียงกัน จากกราฟค่าความแข็งที่ต่ำสุดของบริเวณกระทบริ้นอยู่ที่อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่ 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น โดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ

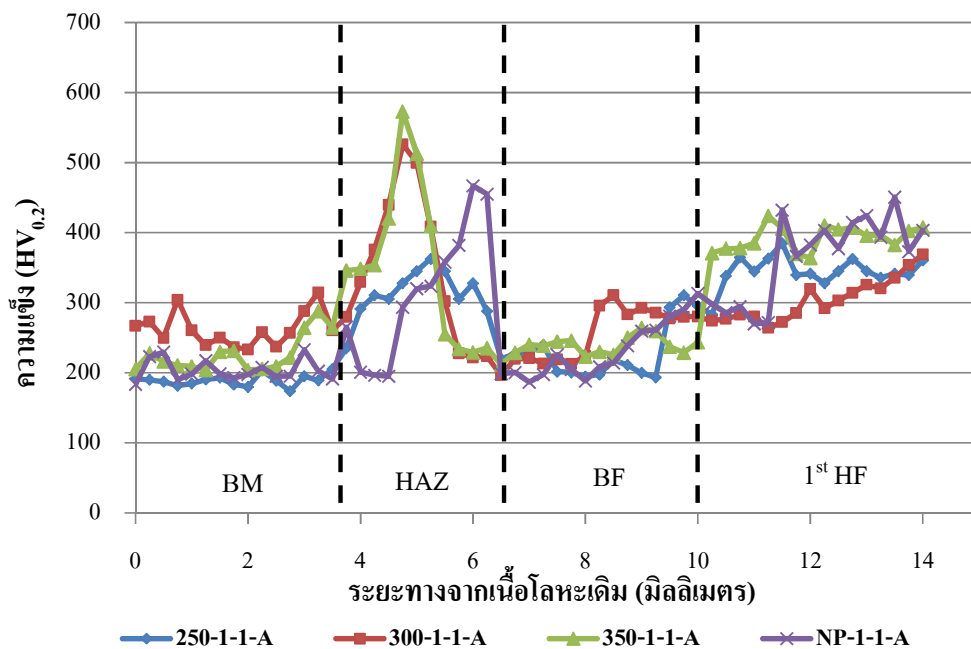
จากรูปที่ 4.21 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น โดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับโลหะเดิมซึ่งเป็นเหล็กกล้า 3.5 เปอร์เซ็นต์ โครเมียมมีค่าความแข็งประมาณ 200-210 วิกเกอร์ ชั้นรองพื้นมีค่าความแข็งประมาณ 220-240 วิกเกอร์ ในส่วนของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งประมาณ 370-420 วิกเกอร์ ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 มีค่าความแข็งประมาณ 420-500 วิกเกอร์ และสำหรับค่าความแข็งของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 มีค่าประมาณ 500-610 วิกเกอร์ ในส่วนที่งานวิจัยนี้สนใจอยู่ที่บริเวณของกระทะร้อนเนื่องจากมีเงื่อนไขของการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมและไม่มีเงื่อนไขในการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานเหล่านี้ส่งผลต่อบริเวณกระทะร้อนซึ่งบริเวณนี้ต้องการค่าความแข็งที่ต่ำเพื่อช่วยลดการแตกร้าวบริเวณนี้ในขณะที่ใช้งาน จากกราฟค่าความแข็งของบริเวณนี้ที่ต่ำอยู่ที่การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมอยู่ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกราฟของเงื่อนไขที่มีการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นกับ 3 ชั้น โดยให้ความสนใจเฉพาะบริเวณกระทะร้อนสังเกตได้ว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นมีค่าความแข็งบริเวณนี้สูงกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นเนื่องจากการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นให้ความร้อนเข้าน้อยกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น



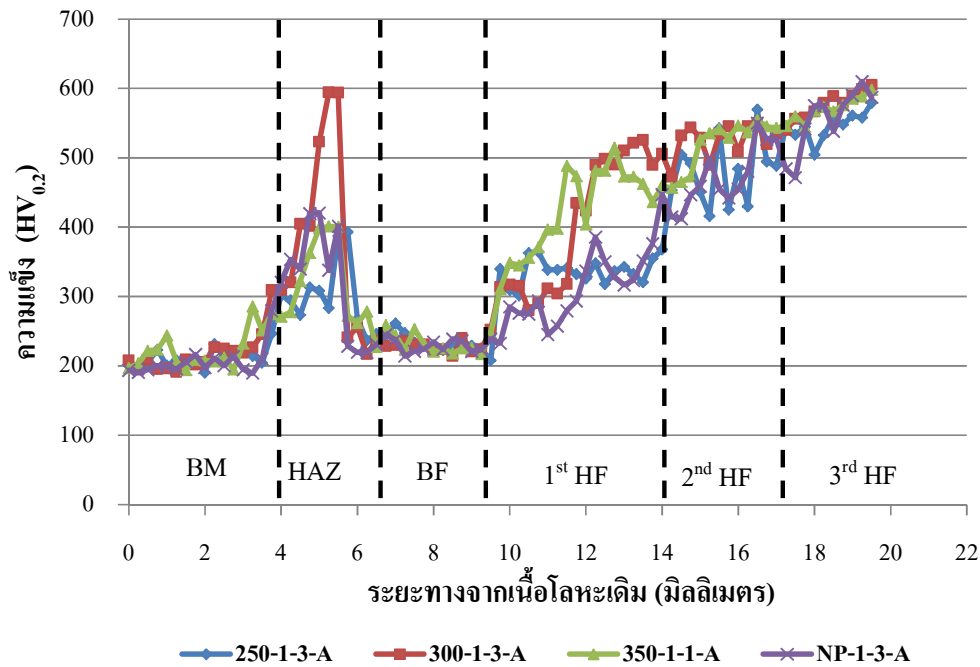
รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น โดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ

จากรูปที่ 4.22 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น โดยการเชื่อมแบบอัตโนมัติ สำหรับโลหะเดิมซึ่งเป็นเหล็กกล้า 3.5 เปอร์เซ็นต์ โครเมียมมีค่าความแข็งประมาณ 200-210 วิกเกอร์ ชั้นรองพื้นมีค่าความแข็งประมาณ 210-220 วิกเกอร์ ในส่วนของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งประมาณ 330-400 วิกเกอร์ สำหรับบริเวณกระทบร้อนค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 370-550 วิกเกอร์และค่าความแข็งของบริเวณนี้ของอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมต่ำสุดอยู่ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่ตรงตามทฤษฎี



รูปที่ 4.22 ค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น โดยการเชื่อมแบบอัตโนมัติ

จากรูปที่ 4.23 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น โดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับโลหะเดิมซึ่งเป็นเหล็กกล้า 3.5 เปอร์เซ็นต์ โครเมียมมีค่าความแข็งประมาณ 200-210 วิกเกอร์ ชั้นรองพื้นมีค่าความแข็งประมาณ 220-240 วิกเกอร์ ในส่วนของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งประมาณ 370-420 วิกเกอร์ ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 มีค่าความแข็งประมาณ 420-500 วิกเกอร์ และสำหรับค่าความแข็งของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 มีค่าประมาณ 500-600 วิกเกอร์ ในส่วนของบริเวณกระทบร้อนค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 320-600 วิกเกอร์ ซึ่งค่าความแข็งต่ำสุดอยู่ที่อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่ตรงตามทฤษฎี



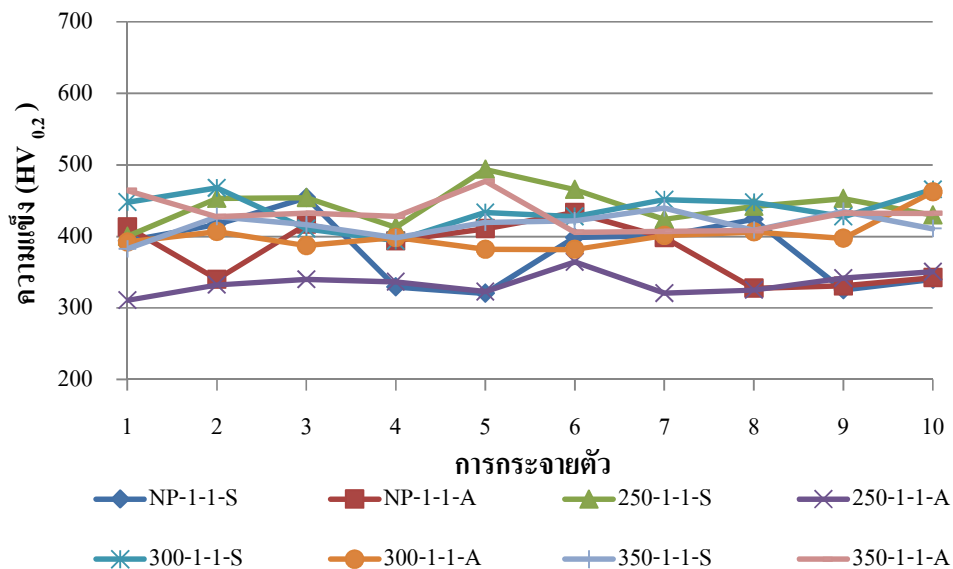
รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น โดยการเชื่อมแบบอัด โนมัติ

#### 4.5.2 ผลการตรวจสอบความแข็งผิวด้านบนของชั้นพอกแข็ง

##### (1) ค่าความแข็งผิวด้านบนชั้นพอกแข็ง 1 ชั้น

จากรูปที่ 4.24 ค่าความแข็งผิวด้านบนของชั้นพอกแข็ง 1 ชั้นทั้งการเชื่อมแบบกึ่งอัด โนมัติ และอัด โนมัติ สำหรับเงื่อนไขที่ไม่มีการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมของการเชื่อมแบบกึ่งอัด โนมัติ (NP-1-1-S) มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 380.3 วิกเกอร์และในส่วนของการเชื่อมแบบกึ่งอัด โนมัติ (NP-1-1-A) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 380.7 วิกเกอร์ สำหรับเงื่อนไขของการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ในส่วนของการเชื่อมแบบกึ่งอัด โนมัติ (250-1-1-S) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 442.8 วิกเกอร์และในส่วนการเชื่อมพอกแข็งแบบอัด โนมัติ (250-1-1-A) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 334.5 วิกเกอร์ สำหรับเงื่อนไขของการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ในส่วนของการเชื่อมแบบกึ่งอัด โนมัติ (300-1-1-S) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 437.4 วิกเกอร์และในส่วนการเชื่อมพอกแข็งแบบอัด โนมัติ (300-1-1-A) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 401.6 วิกเกอร์ สำหรับเงื่อนไขของการอุ่น ชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสในส่วนของ การเชื่อมแบบกึ่งอัด โนมัติ (350-1-1-S) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 416.1 วิกเกอร์และในส่วนการเชื่อมพอกแข็งแบบอัด โนมัติ (350-1-1-A) มี ค่าความแข็งอยู่ที่ 431.6 วิกเกอร์ จากค่าความแข็งของชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ทั้งการเชื่อมแบบ กึ่งอัด โนมัติและอัด โนมัติสังเกตได้ว่าค่าความแข็งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของลวดเชื่อมที่กำหนดไว้

อยู่ที่ประมาณ 650 วิกเกอร์เนื่องจากผลจากการเจือจางจากชั้นรองพื้นซึ่งชั้นรองพื้นมีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 200-220 วิกเกอร์ จึงส่งผลให้ค่าความแข็งชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ต่ำลง



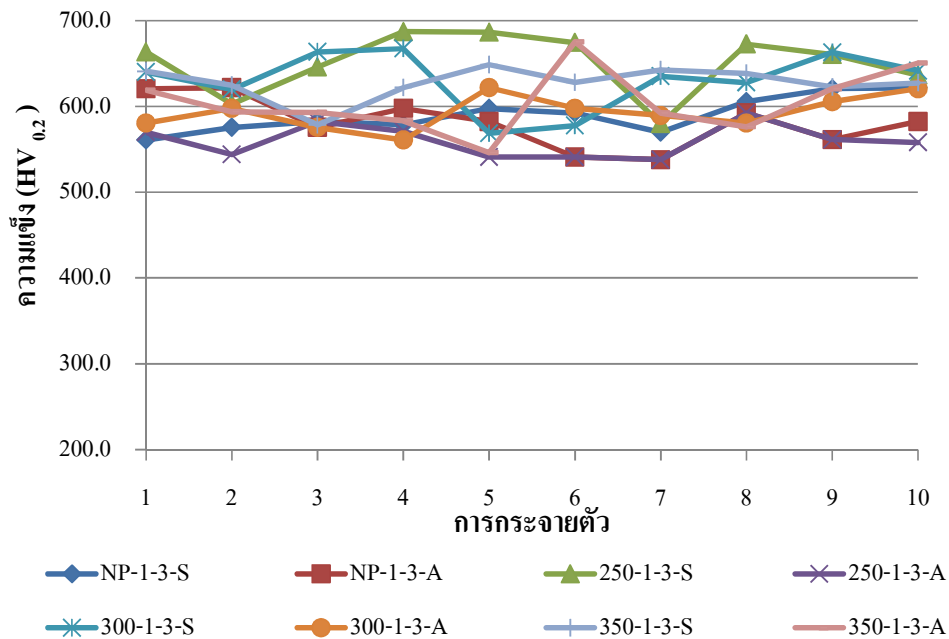
รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งผิวด้านบนของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น

## (2) ความแข็งผิวด้านบนของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น

จากรูปที่ 4.25 ค่าความแข็งผิวด้านบนของชั้นพอกแข็ง 3 ชั้นทั้งการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ สำหรับเงื่อนไขที่ไม่มี การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (NP-1-3-S) มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 590.6 วิกเกอร์และในส่วนของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (NP-1-3-A) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 581.3 วิกเกอร์ สำหรับเงื่อนไขของการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ในส่วนของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (250-1-3-S) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 651.0 วิกเกอร์และในส่วนการเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติ (250-1-3-A) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 559.9 วิกเกอร์ สำหรับเงื่อนไขของการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ในส่วนของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (300-1-3-S) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 630.5 วิกเกอร์และในส่วนการเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติ (300-1-3-A) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 593.1 วิกเกอร์ สำหรับเงื่อนไขของการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ในส่วนของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (350-1-3-S) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 627.4 วิกเกอร์และในส่วนการเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติ (350-1-3-A) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 605.0 วิกเกอร์ จากค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น โดยชั้นพอกแข็งชั้นนี้มีการเจือจางจากชั้นรองพื้นน้อยทำให้ได้ค่าความแข็งใกล้เคียงกับมาตรฐานของลวดเชื่อมที่กำหนดไว้ สำหรับการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น โดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติสังเกตได้ว่า



ค่าความแข็งของบริเวณผิวด้านบนของชั้นพอกแข็งของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติมีค่าสูงกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งผิวด้านบนของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น

#### 4.6 ผลการตรวจสอบการสึกหรอแบบขัดสี

ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีแสดงดังตารางที่ 4.3 จากการทดลองพบว่าโลหะฐานมีค่าความต้านทานการสึกหรอที่ค่อนข้างต่ำแสดงดังรูปที่ 4.26 เนื่องจากโลหะฐานซึ่งเป็น 3.5% โครเมียมมีค่าความแข็งที่ต่ำทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อที่สูงเมื่อผ่านการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี สำหรับการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติทุกเงื่อนไขเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้หลังการทดสอบการสึกหรอปรากฏว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติให้ผลการต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีที่ดีกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติเนื่องจากปริมาณเฟสมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นในชั้นพอกแข็งชั้นนี้สูงกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติ ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 การสูญเสียเนื่องจากการทดสอบใกล้เคียงกับโลหะฐานเนื่องจากชั้นพอกแข็งชั้นนี้ได้รับการเจือจางจากชั้นรองพื้นมาก ทำให้ค่าความแข็งต่ำส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อที่สูงหรือการต้านทานการสึกหรอที่ต่ำ สำหรับการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นซึ่งชั้นนี้มีโครเมียมมาร์เทนไซต์ที่มีปริมาณสูงกว่าชั้นที่ 1 และมีออกซิเจนในบริเวณขอบเกรน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติได้ผล

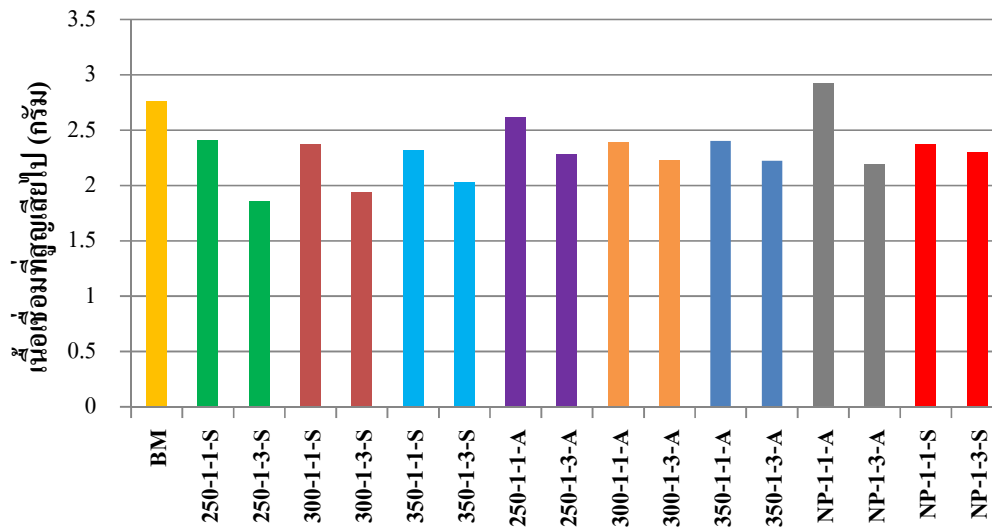
การทดสอบคือ การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติให้ผลการด้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขีดสีของการเชื่อมพอกแข็ง 3.5 % โครเมียม

ชิ้นงานทดสอบ	น้ำหนักก่อนทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	ความต้านทานการสึกหรอ(เมตร/มิลลิกรัม)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
BM	181.9646	179.2033	2.7613	1.56	208.1
NP-1-1-S	200.0479	197.6750	2.3729	1.82	365.0
NP-1-3-S	177.1264	174.8270	2.2994	1.87	530.6
NP-1-1-A	185.3718	182.4458	2.9260	1.47	317.7
NP-1-3-A	187.0819	184.8901	2.1918	1.97	562.8
250-1-1-S	195.2008	192.7906	2.4102	1.79	348.0
250-1-3-S	199.3811	197.5216	1.8595	2.32	600.7
250-1-1-A	179.0453	176.4256	2.6197	1.64	330.2
250-1-3-A	178.4593	176.1783	2.2810	1.89	536.6
300-1-1-S	195.7778	193.4065	2.3713	1.82	365.0
300-1-3-S	196.6481	194.7095	1.9386	2.22	585.2
300-1-1-A	125.3486	122.9535	2.3951	1.80	360.6
300-1-3-A	160.4713	158.2448	2.2265	1.94	565.2
350-1-1-S	209.3963	207.0801	2.3162	1.86	370.3
350-1-3-S	202.8086	200.7782	2.0304	2.12	579.2
350-1-1-A	190.1026	187.6994	2.4032	1.79	348.2
350-1-3-A	181.8321	179.6086	2.2235	1.94	565.3

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับผลการทดสอบการสึกหรอ โดยเมื่อชิ้นงานมีค่าความแข็งที่มาก น้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอก็จะน้อย สำหรับชิ้นงานที่มีค่าความแข็งต่ำ น้ำหนักที่หายไปจากการสึกหรอก็จะมาก ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของการอุ่นชิ้นงาน 300 องศาเซลเซียส เชื่อมรองพื้น 1 ชั้นและเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (300-1-1-S) เปรียบเทียบกับกรณีของการอุ่นชิ้นงาน 300 องศาเซลเซียส เชื่อมรองพื้น 1

ชั้น และเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นแบบกึ่งอัตโนมัติ (300-1-3-S) จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นมีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 365 วิกเกอร์ และน้ำหนักที่หายไปอยู่ที่ 2.3713 กรัม สำหรับค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 585.6 วิกเกอร์ และน้ำหนักที่หายไปอยู่ที่ 1.9386 กรัม จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความแข็งมีค่ามากจะทำให้การสูญเสียเนื้อที่ต่ำลง ชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น มีค่าความแข็งต่ำเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากการเงาของชั้นรองพื้นสูงทำให้การสูญเสียเนื้อพอกแข็งก็สูงตามไปด้วย ในส่วนเงื่อนไขอื่นๆ เมื่อเทียบกันระหว่างการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นกับการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ไม่ว่าจะเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติผลที่ได้เป็นทำนองเดียวกันทุกเงื่อนไข ดังนั้นการเชื่อมพอกแข็งควรเชื่อมตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไปเพื่อที่จะลดอิทธิพลจากชั้นรองพื้น ในส่วนของงานวิจัยนี้การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีค่าความแข็งมากที่สุด ทำให้สูญเสียเนื้อพอกแข็งต่ำ และการต้านทานการสึกหรอสูงด้วย



รูปที่ 4.26 น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ

จากรูปที่ 4.26 เงื่อนไขที่มีการสูญเสียเนื้อน้อยที่สุดหรือมีความต้านทานการสึกหรอแบบจัดดีได้คือ การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติ มีการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่ 250 องศาเซลเซียส เชื่อมรองพื้น 1 ชั้นและเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น (250-1-3-S) เงื่อนไขส่วนใหญ่มีค่าการสูญเสียเนื้อที่ต่ำกว่าโลหะฐาน การเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น มีการสูญเสียเนื้อที่สูงกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ทุกเงื่อนไขของงานวิจัยนี้ แต่สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างการเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติเห็นได้ว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติมีค่าการสูญเสียเนื้อที่ต่ำกว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติทุกเงื่อนไข

#### 4.7 เปรียบเทียบผลของการเชื่อมพอกแข็งโดยใช้กระบวนการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์กับการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

การเชื่อมพอกแข็งโดยการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ของงานวิจัยที่ผ่านมาสรุปได้ว่าควรมีการอุ่นชิ้นงานอย่างน้อย 250 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิต่ำสุดในการอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม 250 องศาเซลเซียส ประหยัดพลังงานกว่า และช่วยลดเวลาในการอุ่นชิ้นงานด้วย การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมมีผลต่อบริเวณกระทบร้อนแต่ในแต่ละอุณหภูมิไม่พบถึงความแตกต่างกันมาก การเชื่อมพอกแข็งควรเชื่อมอย่างน้อย 3 ชั้นเนื่องจากการเงือจางจากชั้นรองพื้นต่ำและควรมีชั้นรองพื้นเพื่อช่วยยึดติระหว่างชั้นพอกแข็งและโลหะฐาน งานวิจัยที่ผ่านมาจึงสรุปได้ว่า การเชื่อมควรมีการอุ่นชิ้นงานอย่างน้อย 250 องศาเซลเซียส เชื่อมรองพื้น 1 ชั้น และเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น เหมาะสมสำหรับการเชื่อมพอกแข็งในงานซ่อมบำรุงเครื่องไม่ถ่านหินชนิดโมเดิร์น [28]

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมพอกแข็งโดยใช้กระบวนการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์ เงื่อนไขที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้คือ การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่ 250 องศาเซลเซียส เชื่อมชั้นรองพื้น 1 ชั้น เชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ซึ่งมีค่าความแข็งสูงและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีได้ดีที่สุด

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองกระบวนการ ผลที่ได้โครงสร้างจุลภาคของชั้นต่างๆ ใกล้เคียงกัน ต่างกันที่โครงสร้างของชั้นรองพื้นที่มีรูปร่างของโครงสร้างที่แตกต่างกันแต่เป็นโครงสร้างชนิดเดียวกัน สำหรับชั้นพอกแข็งเป็นโครงสร้างชนิดเดียวกัน ในส่วนของความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีเมื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขที่ดีที่สุดทั้งสองกระบวนการนั้น เห็นได้ว่าเงื่อนไขของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ให้ผลที่ดีกว่าการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาโครงสร้างจุลภาค ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี และค่าความแข็งของการเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียมของพินโมในตัวบดถ่านหิน ที่มีเงื่อนไขการเชื่อมทั้งหมด 16 เงื่อนไข

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 เงื่อนไข 250-1-3-S เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด โดยโครงสร้างบริเวณกระทบร้อนมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์มีเกรนลักษณะเป็นเข็ม โครงสร้างจุลภาคของชั้นรองพื้นมีโครงสร้างเป็นออสเทนนิติก ในส่วนของโครงสร้างชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ลักษณะเกรนเป็นเดนไดรต์

5.1.2 โครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบร้อนไม่พบรอยแตกร้าว

5.1.3 ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของการเชื่อมชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น ดีกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น และความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น และ 1 ชั้น ดีกว่าโลหะเดิม

5.1.4 ในงานวิจัยนี้ผลด้านความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติให้ผลดีว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นและ 3 ชั้น

5.1.5 เงื่อนไข 250-1-3-S เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้แล้วเหมาะสมในการเชื่อมซ่อมพินโมของเครื่องบดถ่านหิน

5.1.6 การเชื่อมพอกแข็งโดยการเชื่อมแบบลวดไส้ฟลักซ์ในงานวิจัยนี้ในเงื่อนไขที่ดีที่สุดให้ผลที่ดีกว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบลวดหุ้มฟลักซ์ในด้านการต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สำหรับเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียมควรมีการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อมอย่างน้อย 250 องศาเซลเซียส

5.2.2 การเชื่อมชั้นพอกแข็งควรเชื่อมตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไปเนื่องจากลดปัญหาการเงือจางจากชั้นรองพื้นซึ่งทำให้ความแข็งต่ำและทนต่อการสึกหรอได้น้อย

5.2.3 สำหรับการอุ้มน้ชันงานมีความสำคัญ ในระหว่างการเชื่อมแต่ละชั้นไม่ควรปล่อยให้ชันงานมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการอุ้มน้ชันงาน เนื่องจากชันงานถ้ามีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้ชันงานเกิดการร้าวและแตกได้

5.2.4 อิทธิพลจากชั้นรองพื้น ทำให้ชั้นพอกแข็งถูกเงาจากชั้นรองพื้นทำให้ความแข็งมีค่าต่ำลงส่งผลให้ค่าความต้านทานการสึกหรอต่ำลงด้วย

5.2.5 สำหรับชันงานที่ใช้ในการทดลองนี้มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับชันงานที่นำไปใช้จริง ทำให้ค่าความแข็งบริเวณกระทบบร้อนของการอุ้มน้ชันงานก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิต่างๆ จึงไม่เห็นความแตกต่าง แต่สำหรับชันงานที่มีขนาดใหญ่ควรมีการอุ้มน้ชันงานก่อนการเชื่อมเพื่อหลีกเลี่ยงการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว

5.2.6 สำหรับงานวิจัยนี้ควรใช้การเชื่อมพอกแข็งโดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ เนื่องจากให้ผลทางด้านค่าความแข็งและการต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีที่ดีกว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ

### บรรณานุกรม

- [1] จิตติ บัวพูน, ประศาสน์ สุบรรพพงศ์, ณรงค์ฤทธิ์ โทชรรัตน์. การวิเคราะห์การชำรุด เบื้องต้น พิมพ์ครั้งที่ 9. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2556.
- [2] <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/S2015/FWLM/Pics/Solids/> สืบค้นเมื่อ (26/09/2560)
- [3] <http://www.precisioncoatings.com/wear-resistant-coatings.html/> สืบค้นเมื่อ (25/09/2560)
- [4] Yamamoto S. Arc welding of specific steels and cast irons. 3<sup>rd</sup> ed. Kanagawa: Shinko Welding Service; 2008.
- [5] ปรากฏ เมืองจันทร์บุรี. วิศวกรรมการเชื่อม. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2555.
- [6] ESAB. Submerged arc welding. Sweden: The Institute; 2008.
- [7] Blondeau R. Metallurgy and mechanics of welding. London: ISTE; 2008.
- [8] Bailey N. Weldability of ferritic steel. Cambridge: Abington Publishing; 1994.
- [9] Buchely MF, Gutierrez JC, Leon LM, Toro A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. Wear 2005; 259: 52-61.
- [10] Kotecki DJ, Ogborn JS. Abrasive resistance of iron-based hardfacing alloys. Welding research supplement 1995; 75: 269s-78s.
- [11] [http://www.sunruiwelding.com/products\\_detail/productId=29.html/](http://www.sunruiwelding.com/products_detail/productId=29.html/) สืบค้นเมื่อ (1/02/2018)
- [12] Kobe Steel Ltd. Arc welding of specific steels and cast irons. Tokyo: The Institute; 2015.
- [13] Max steel co., Ltd. Composition of Elements: The Institute; 1995.
- [14] สุรธนา ลิ้มนา. การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกของ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2553
- [15] Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials: ASTM E92-82: The Institute; 1997.
- [16] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hardness-testing-Part-1-074> สืบค้นเมื่อ (24/04/2560)

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [17] ASTM Designation: G65: Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. West Conshohocken: The Institute; 2001
- [18] มนต์ สติรจินดา. เหล็กกล้า. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์; 2529.
- [19] Kiran VT, Krishna M, Natraj JR, Kumar S. Development and characterization of an electrode deposition procedure for crack-free hardfacing of low carbon steel. IACSIT International Journal of Engineering and Technology 2012; 4: 18-25.
- [20] Coronado JJ, Caicedo HF, Gomes AL. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits, Tribology International 2009; 42: 745-49.
- [21] Kirchgabner M., Badisch E., Franek F. Behavior of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact, Wear 2008; 265: 772-779.
- [22] Zollinger OO, Beckham LB, Monroe C. Hard surfacing alloys with the same hardness rating can vary greatly in actual abrasive wear performance. Welding Journal 1998; 77: 39-43.
- [23] Kenchi Reddy KM, Jayadeva CT. The effect of microstructure on 3 body abrasive wear behavior of hardfacing alloys. Bonfring international journal of industrial engineering and management science 2014; 4: 14-23.
- [24] Syarul AM, Izatul AI, Amalina A, Abdul G. The effect of flux core arc welding (FCAW) processes on difference parameters. Procedia Engineering 2012; 41: 1497-1501.
- [25] Gualco A., Svoboda HG, Surian ES, De Vedia LA. Effect of welding procedure on wear behavior of a modified martensitic tool steel hardfacing deposit. Materials and Design 2010; 31: 4165-73.
- [26] Winarto, Priadi D. Effect of preheating and buttering on cracking susceptibility and wear resistance of hardfaced HSLA steel deposit. Japan Welding Society 2013; 31: 202s-205s.
- [27] Adamiak M, Gorka J, Kik T. Comparison of abrasion resistance of selected constructional materials. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2009; 37(2): 375-80.



**บรรณานุกรม (ต่อ)**

- [28] บันเทิง ศรีคะรัน. การเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้า 3.5 % โครเมียมของพินโม้เครื่องไม้ถ่านหิน [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2558

## ภาคผนวก ก

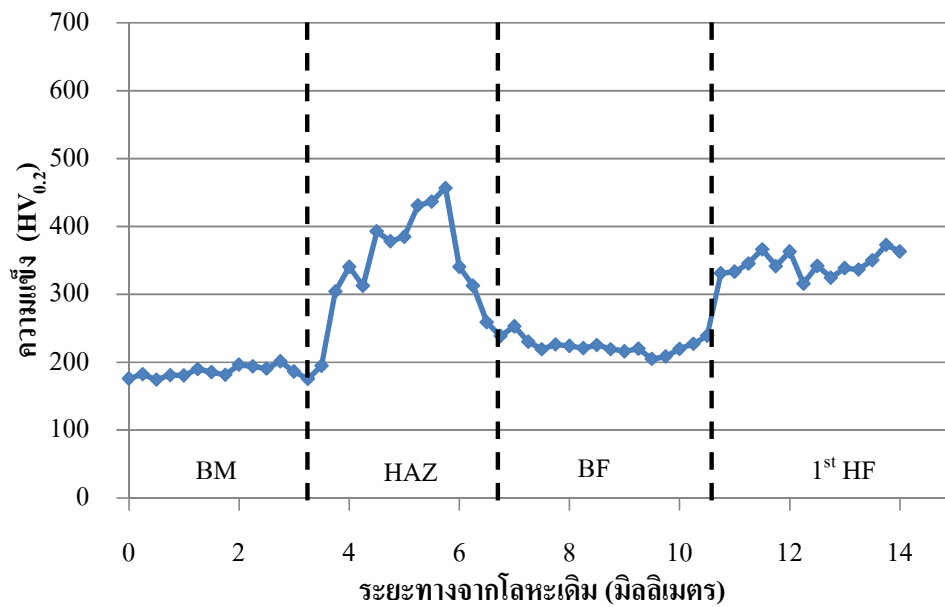
ค่าความแข็งของการเชื่อมแต่ละเงื่อนไข

ตารางที่ ก.1 ค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-1-S

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	176.0	6.75	238.4
0.25	182.2	7.00	252.9
0.50	174.2	7.25	230.0
0.75	181.2	7.50	219.3
1.00	180.6	7.75	226.2
1.25	190.1	8.00	224.1
1.50	185.3	8.25	220.8
1.75	181.4	8.50	225.4
2.00	196.4	8.75	219.2
2.25	193.8	9.00	216.1
2.50	190.7	9.25	219.9
2.75	201.2	9.50	204.9
3.00	186.3	9.75	208.4
3.25	175.7	10.00	219.6
3.50	194.8	10.25	226.9
3.75	304.4	10.50	239.0
4.00	340.6	10.75	331.2
4.25	312.6	11.00	333.3
4.50	392.6	11.25	345.6
4.75	378.3	11.50	366.4
5.00	384.9	11.75	341.6
5.25	430.8	12.00	363.2
5.50	436.7	12.25	315.8
5.75	456.8	12.50	341.9
6.00	340.6	12.75	324.6
6.25	312.6	13.00	338.6

ตารางที่ ก.1 ค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-1-S (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.25	336.7	13.75	372.7
13.50	350.1	14.00	363.2



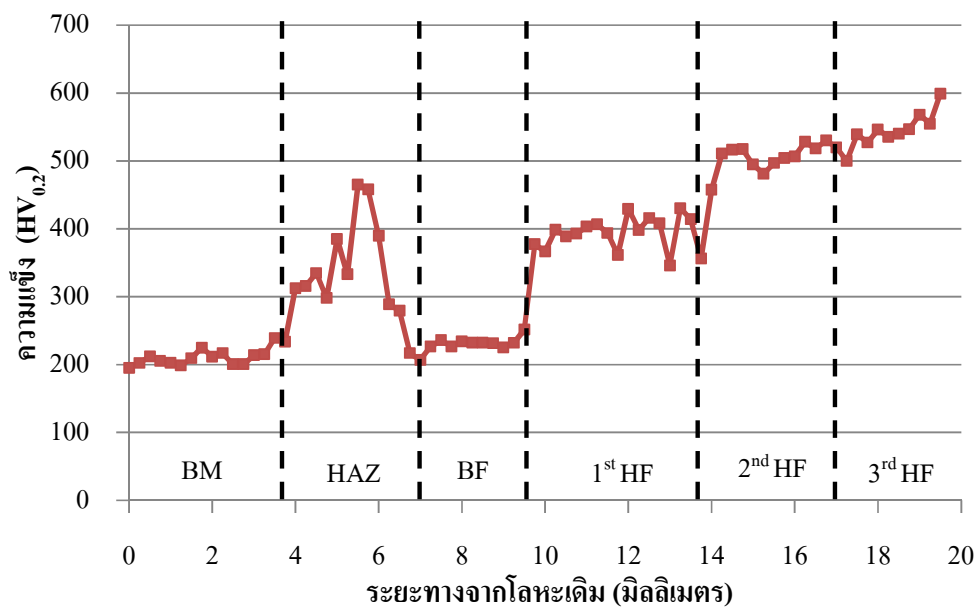
รูปที่ ก.1 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-1-S

ตารางที่ ก.2 ค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-3-S

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	195.3	6.50	238.4
0.25	202.4	6.75	252.9
0.50	212.0	7.00	230.0
0.75	205.2	7.25	219.3
1.00	202.8	7.50	226.2
1.25	198.7	7.75	224.1
1.50	209.6	8.00	220.8
1.75	224.9	8.25	225.4
2.00	211.6	8.50	219.2
2.25	216.9	8.75	216.1
2.50	200.3	9.00	219.9
2.75	200.4	9.25	204.9
3.00	213.6	9.50	208.4
3.25	215.0	9.75	219.6
3.50	239.0	10.00	226.9
3.75	233.9	10.25	239.0
4.00	312.1	10.50	331.2
4.25	315.8	10.75	333.3
4.50	334.8	11.00	345.6
4.75	297.9	11.25	366.4
5.00	385.0	11.50	341.6
5.25	332.9	11.75	363.2
5.50	465.2	12.00	315.8
5.75	457.7	12.25	341.9
6.00	389.6	12.50	324.6
6.25	288.5	12.75	338.6

ตารางที่ ก.2 ค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-3-S (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	345.9	16.50	518.1
13.25	430.2	16.75	530.0
13.50	414.2	17.00	520.0
13.75	356.1	17.25	500.0
14.00	457.4	17.50	539.0
14.25	510.6	17.75	527.0
14.50	516.3	18.00	546.0
14.75	517.1	18.25	535.6
15.00	494.5	18.50	540.0
15.25	480.9	18.75	546.7
15.50	496.9	19.00	567.9
15.75	504.0	19.25	554.6
16.00	506.6	19.50	598.7
16.25	528.3		



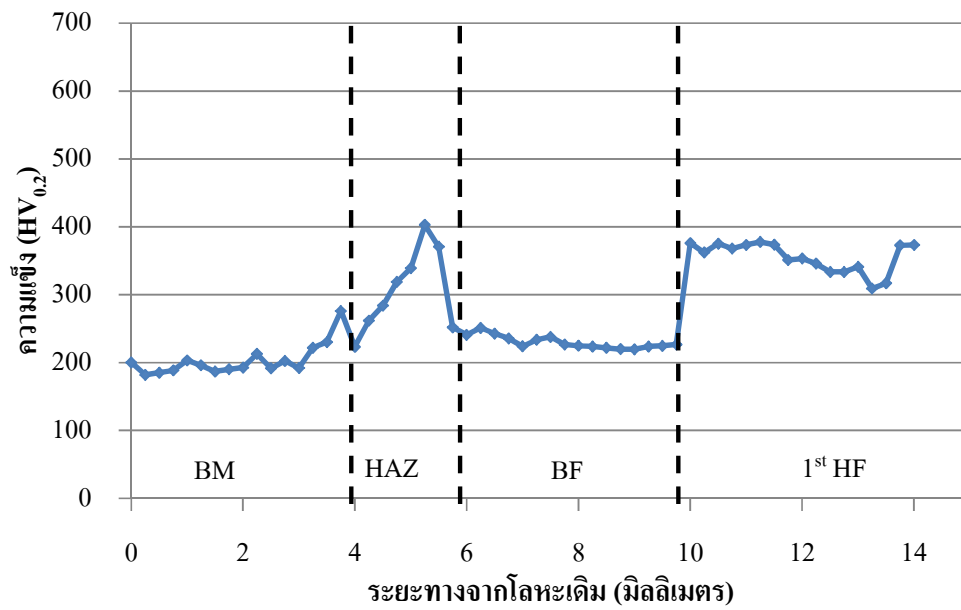
รูปที่ ก.2 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-3-S

ตารางที่ ก.3 ค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-1-S

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	176.0	6.50	238.4
0.25	182.2	6.75	252.9
0.50	174.2	7.00	230.0
0.75	181.2	7.25	219.3
1.00	180.6	7.50	226.2
1.25	190.1	7.75	224.1
1.50	185.3	8.00	220.8
1.75	181.4	8.25	225.4
2.00	196.4	8.50	219.2
2.25	193.8	8.75	216.1
2.50	190.7	9.00	219.9
2.75	201.2	9.25	204.9
3.00	186.3	9.50	208.4
3.25	175.7	9.75	219.6
3.50	194.8	10.00	226.9
3.75	304.4	10.25	239.0
4.00	340.6	10.50	331.2
4.25	312.6	10.75	333.3
4.50	392.6	11.00	345.6
4.75	378.3	11.25	366.4
5.00	384.9	11.50	341.6
5.25	430.8	11.75	363.2
5.50	436.7	12.00	315.8
5.75	456.8	12.25	341.9
6.00	340.6	12.50	324.6
6.25	312.6	12.75	338.6

ตารางที่ ก.3 ค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-1-S (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	336.7	13.75	363.2
13.25	350.1	14.00	373.5
13.50	372.7		



รูปที่ ก.3 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-1-S

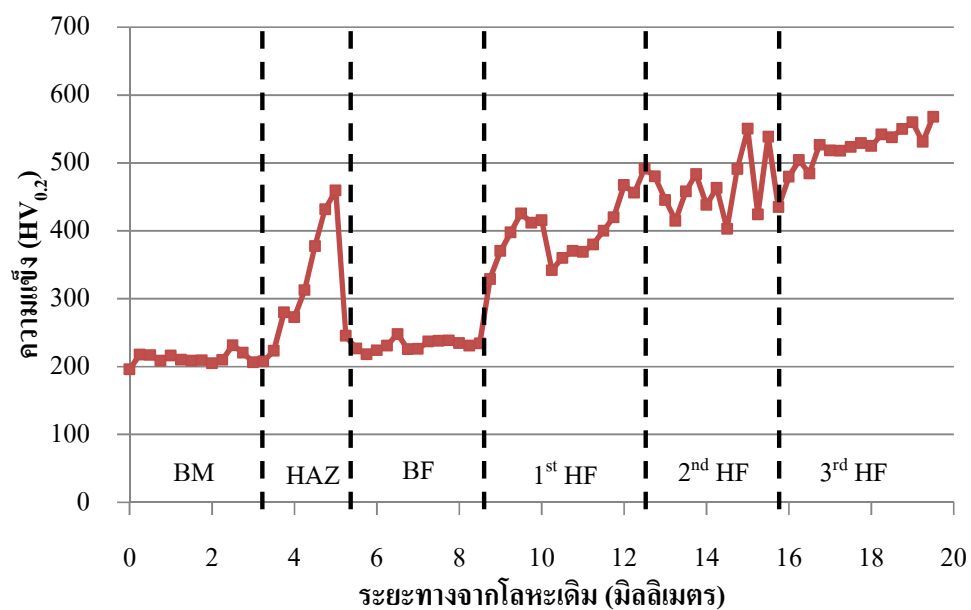


ตารางที่ ก.4 ค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-3-S

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	195.9	6.50	248.0
0.25	217.6	6.75	225.8
0.50	216.9	7.00	226.2
0.75	208.5	7.25	236.9
1.00	216.0	7.50	237.8
1.25	210.3	7.75	238.4
1.50	208.3	8.00	234.6
1.75	209.6	8.25	230.8
2.00	205.1	8.50	234.3
2.25	210.0	8.75	329.2
2.50	231.1	9.00	370.0
2.75	220.5	9.25	397.7
3.00	206.1	9.50	425.7
3.25	207.7	9.75	411.9
3.50	222.9	10.00	415.5
3.75	279.8	10.25	342.0
4.00	272.7	10.50	360.0
4.25	312.4	10.75	370.0
4.50	377.1	11.00	369.0
4.75	431.8	11.25	380.0
5.00	459.1	11.50	400.0
5.25	245.1	11.75	420.0
5.50	226.5	12.00	467.0
5.75	218.2	12.25	456.0
6.00	224.2	12.50	491.6
6.25	230.5	12.75	480.0

ตารางที่ ก.4 ค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-3-S (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	445.2	16.50	484.7
13.25	414.5	16.75	526.7
13.50	457.7	17.00	518.3
13.75	483.5	17.25	517.9
14.00	438.2	17.50	523.7
14.25	463.2	17.75	529.3
14.50	402.9	18.00	524.7
14.75	491.1	18.25	541.9
15.00	550.5	18.50	537.8
15.25	424.4	18.75	549.9
15.50	538.6	19.00	559.9
15.75	434.9	19.25	530.9
16.00	479.8	19.50	567.9
16.25	503.8		



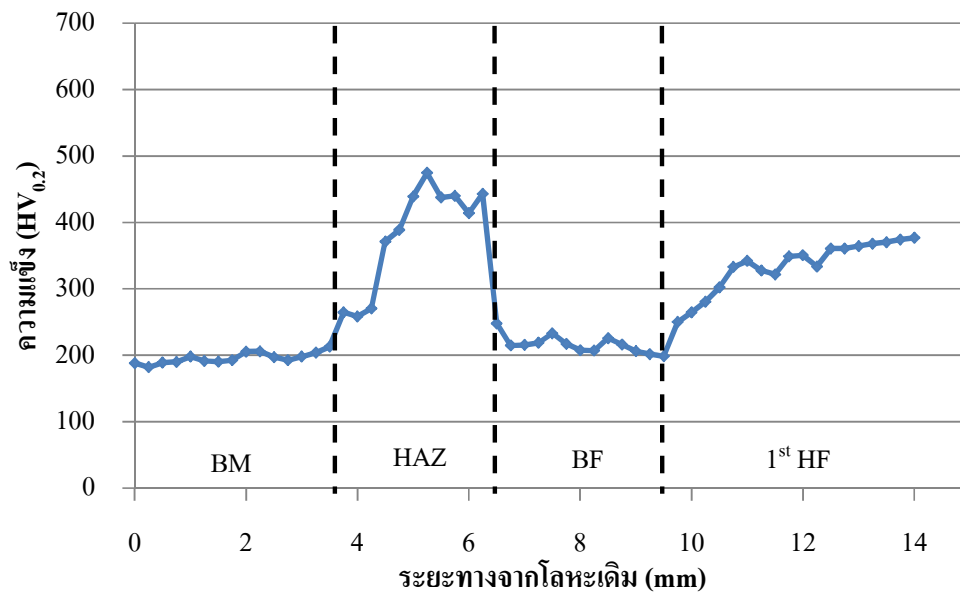
รูปที่ ก.4 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-3-S

ตารางที่ ก.5 ค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-1-S

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	188.1	6.50	248.0
0.25	182.0	6.75	214.7
0.50	189.0	7.00	215.5
0.75	190.0	7.25	218.7
1.00	198.0	7.50	233.0
1.25	191.3	7.75	217.2
1.50	190.3	8.00	207.6
1.75	192.5	8.25	207.1
2.00	205.4	8.50	225.9
2.25	205.9	8.75	216.2
2.50	197.3	9.00	206.2
2.75	192.6	9.25	201.7
3.00	197.9	9.50	198.5
3.25	203.8	9.75	250.0
3.50	212.9	10.00	264.7
3.75	264.7	10.25	280.6
4.00	258.4	10.50	302.2
4.25	270.5	10.75	333.0
4.50	371.1	11.00	342.0
4.75	388.5	11.25	327.6
5.00	439.0	11.50	321.9
5.25	474.7	11.75	348.7
5.50	437.5	12.00	350.6
5.75	440.0	12.25	333.6
6.00	414.0	12.50	360.7
6.25	443.1	12.75	360.8

ตารางที่ ก.5 ค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-1-S (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	364.4	13.75	374.4
13.25	367.9	14.00	376.8
13.50	370.2		



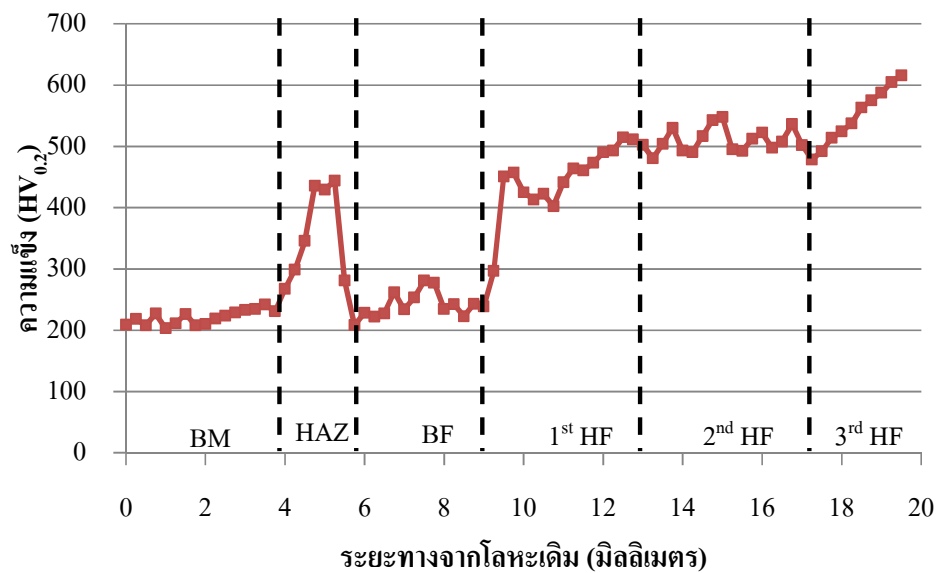
รูปที่ ก.5 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-1-S

ตารางที่ ก.6 ค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-3-S

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	209.1	6.50	227.2
0.25	218.2	6.75	262.0
0.50	208.0	7.00	234.0
0.75	227.1	7.25	253.6
1.00	203.3	7.50	281.0
1.25	211.1	7.75	277.3
1.50	226.3	8.00	234.4
1.75	208.1	8.25	242.2
2.00	210.1	8.50	222.9
2.25	218.9	8.75	242.7
2.50	223.6	9.00	238.9
2.75	228.9	9.25	296.6
3.00	233.1	9.50	451.0
3.25	234.4	9.75	457.2
3.50	241.8	10.00	425.1
3.75	231.0	10.25	413.3
4.00	267.4	10.50	422.3
4.25	298.9	10.75	402.5
4.50	345.8	11.00	441.6
4.75	435.8	11.25	463.9
5.00	429.3	11.50	461.0
5.25	443.9	11.75	473.0
5.50	281.2	12.00	490.2
5.75	208.4	12.25	493.2
6.00	227.9	12.50	514.6
6.25	222.3	12.75	511.2

ตารางที่ ก.6 ค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-3-S (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	502.4	16.50	507.9
13.25	480.4	16.75	536.3
13.50	504.0	17.00	502.2
13.75	530.1	17.25	478.5
14.00	493.1	17.50	492.2
14.25	490.9	17.75	514.0
14.50	516.9	18.00	524.5
14.75	542.7	18.25	537.4
15.00	548.2	18.50	563.4
15.25	495.2	18.75	575.3
15.50	492.9	19.00	587.2
15.75	512.1	19.25	604.9
16.00	522.5	19.50	616.0
16.25	497.8		



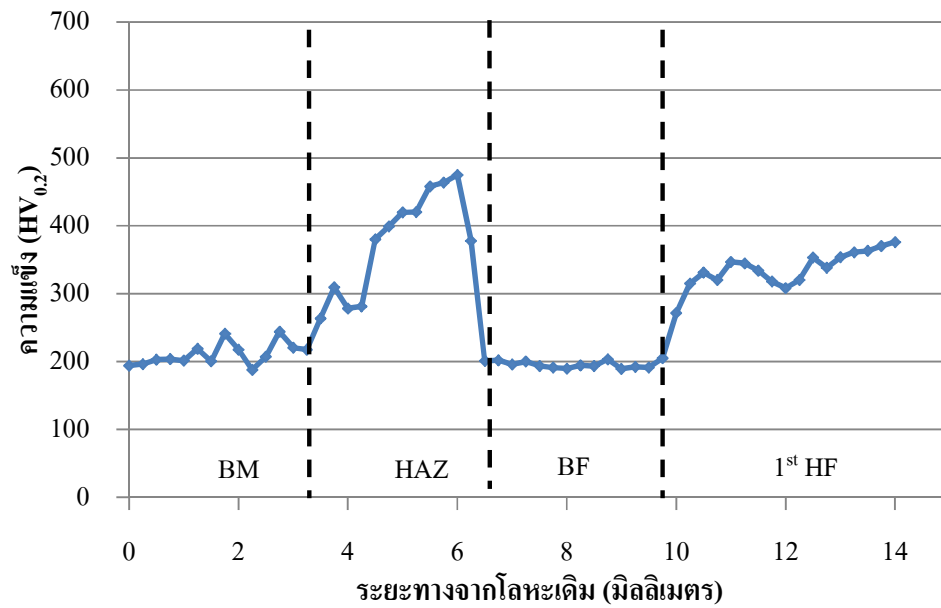
รูปที่ ก.6 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-3-S

ตารางที่ ก.7 ค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-1-S

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	193.9	6.50	200.8
0.25	196.1	6.75	195.8
0.50	202.8	7.00	200.0
0.75	203.4	7.25	193.5
1.00	201.3	7.50	191.1
1.25	218.9	7.75	189.5
1.50	200.4	8.00	194.5
1.75	240.9	8.25	193.3
2.00	217.4	8.50	203.3
2.25	187.7	8.75	189.1
2.50	207.1	9.00	192.2
2.75	244.1	9.25	191.4
3.00	220.4	9.50	204.8
3.25	217.4	9.75	271.2
3.50	263.4	10.00	314.6
3.75	309.5	10.25	331.1
4.00	278.2	10.50	320.0
4.25	281.2	10.75	346.8
4.50	380.0	11.00	344.7
4.75	399.0	11.25	334.0
5.00	419.8	11.50	317.7
5.25	420.3	11.75	308.3
5.50	458.0	12.00	320.0
5.75	463.5	12.25	353.2
6.00	474.9	12.50	338.1
6.25	377.8	12.75	360.8

ตารางที่ ก.7 ค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-1-S (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	353.7	13.75	370.0
13.25	361.0	14.00	376.0
13.50	363.0		



รูปที่ ก.7 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-1-S

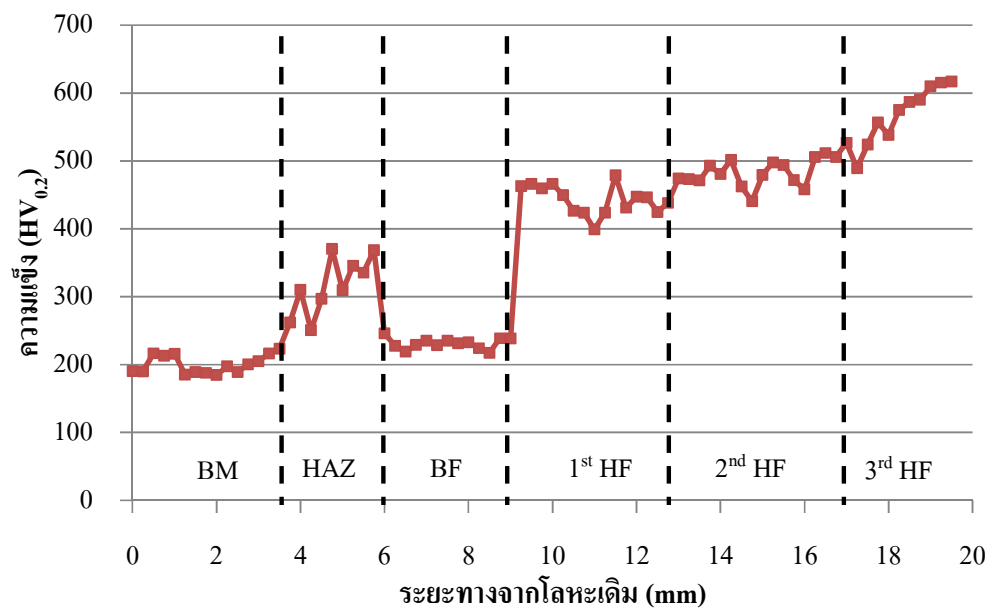


ตารางที่ ก.8 ค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-3-S

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	190.5	6.50	219.0
0.25	190.0	6.75	228.7
0.50	216.3	7.00	235.0
0.75	212.8	7.25	228.4
1.00	215.6	7.50	234.9
1.25	185.2	7.75	231.2
1.50	189.0	8.00	232.8
1.75	187.8	8.25	224.1
2.00	184.7	8.50	217.4
2.25	197.2	8.75	238.7
2.50	189.1	9.00	238.3
2.75	200.0	9.25	463.0
3.00	205.0	9.50	466.0
3.25	216.1	9.75	459.3
3.50	223.2	10.00	466.0
3.75	262.1	10.25	449.4
4.00	309.8	10.50	426.3
4.25	250.4	10.75	424.0
4.50	296.7	11.00	398.9
4.75	370.2	11.25	423.7
5.00	309.4	11.50	478.6
5.25	345.5	11.75	431.1
5.50	335.2	12.00	447.1
5.75	368.6	12.25	446.3
6.00	245.8	12.50	424.7
6.25	227.7	12.75	438.1

ตารางที่ ก.8 ค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-3-S (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	474.0	16.50	511.5
13.25	472.8	16.75	505.9
13.50	471.2	17.00	526.7
13.75	492.9	17.25	489.1
14.00	480.7	17.50	524.1
14.25	501.4	17.75	556.5
14.50	462.2	18.00	538.2
14.75	440.6	18.25	575.0
15.00	479.2	18.50	587.0
15.25	497.8	18.75	590.0
15.50	493.8	19.00	610.0
15.75	471.5	19.25	615.0
16.00	457.8	19.50	617.0
16.25	505.7		



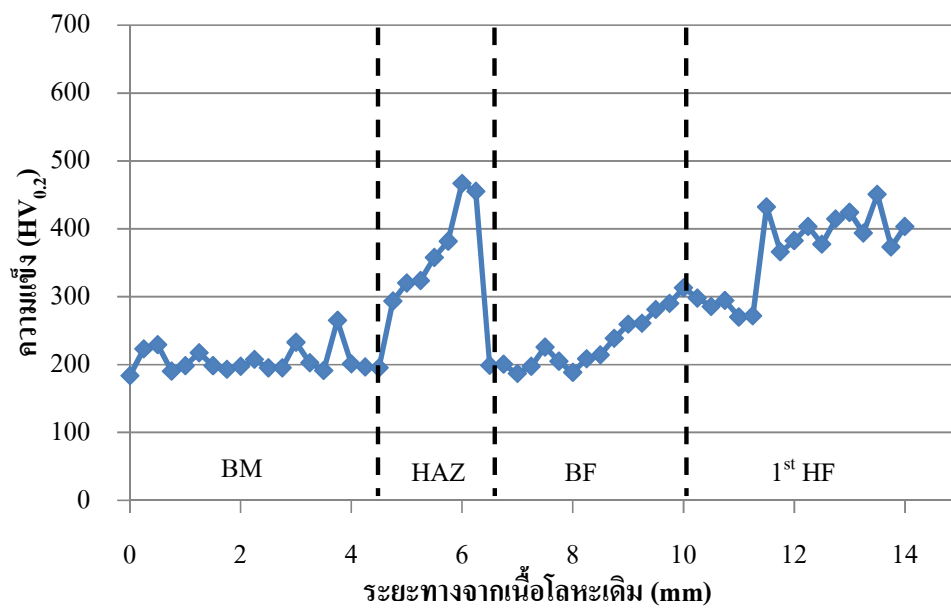
รูปที่ ก.8 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-3-S

ตารางที่ ก.9 ค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-1-A

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	183.6	6.50	198.7
0.25	222.9	6.75	200.4
0.50	229.4	7.00	186.7
0.75	190.4	7.25	197.3
1.00	198.2	7.50	225.8
1.25	217.4	7.75	204.8
1.50	198.5	8.00	188.5
1.75	192.9	8.25	208.6
2.00	197.6	8.50	214.2
2.25	207.7	8.75	238.6
2.50	195.1	9.00	259.4
2.75	195.2	9.25	260.8
3.00	232.8	9.50	281.0
3.25	202.6	9.75	290.2
3.50	191.2	10.00	313.1
3.75	265.0	10.25	298.1
4.00	200.8	10.50	285.7
4.25	196.5	10.75	294.4
4.50	195.0	11.00	270.1
4.75	293.7	11.25	271.7
5.00	320.1	11.50	432.4
5.25	323.7	11.75	366.1
5.50	357.8	12.00	382.4
5.75	381.9	12.25	403.4
6.00	466.8	12.50	377.4
6.25	455.1	12.75	414.4

ตารางที่ ก.9 ค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-1-A (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	424.3	13.75	373.1
13.25	393.7	14.00	403.4
13.50	450.7		



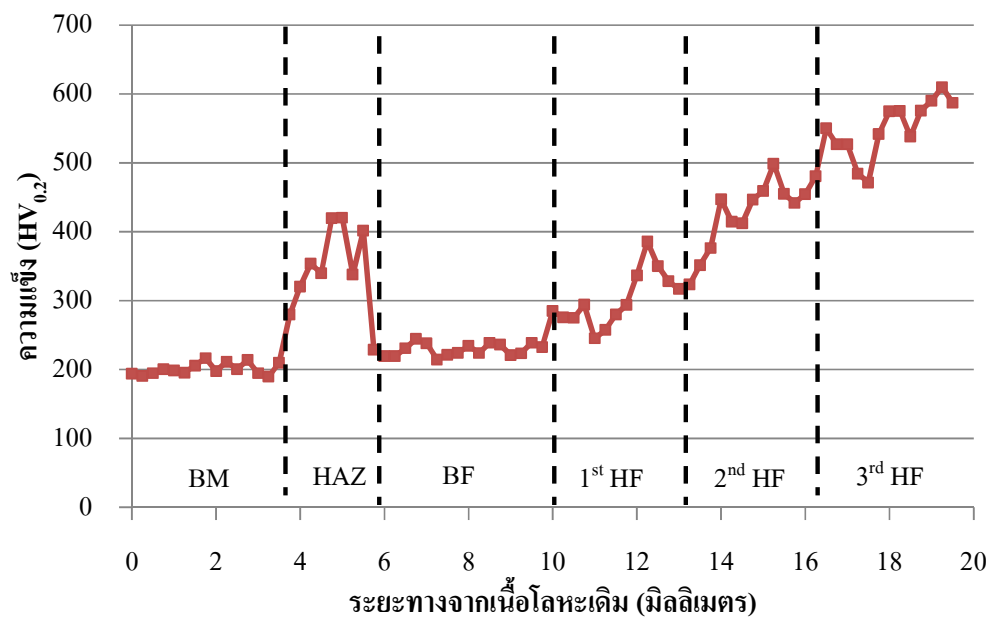
รูปที่ ก.9 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-1-A

ตารางที่ ก.10 ค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-3-A

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	193.6	6.50	230.7
0.25	190.5	6.75	244.5
0.50	194.5	7.00	237.9
0.75	200.4	7.25	214.3
1.00	198.5	7.50	221.0
1.25	195.6	7.75	224.1
1.50	205.6	8.00	234.3
1.75	216.4	8.25	223.7
2.00	197.6	8.50	238.7
2.25	211.2	8.75	235.9
2.50	200.3	9.00	220.8
2.75	213.6	9.25	223.4
3.00	194.6	9.50	238.7
3.25	189.6	9.75	232.6
3.50	210.0	10.00	284.9
3.75	279.5	10.25	275.8
4.00	320.5	10.50	274.7
4.25	353.5	10.75	293.9
4.50	339.6	11.00	245.0
4.75	419.5	11.25	257.3
5.00	420.5	11.50	279.6
5.25	337.8	11.75	293.5
5.50	401.4	12.00	336.5
5.75	228.4	12.25	385.8
6.00	219.4	12.50	350.0
6.25	219.3	12.75	328.2

ตารางที่ ก.10 ค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-3-A (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	316.8	16.50	550.0
13.25	323.2	16.75	526.7
13.50	351.5	17.00	526.7
13.75	376.1	17.25	484.2
14.00	446.8	17.50	471.5
14.25	414.8	17.75	541.9
14.50	411.9	18.00	575.0
14.75	446.6	18.25	575.3
15.00	459.0	18.50	538.2
15.25	498.5	18.75	576.0
15.50	454.8	19.00	590.0
15.75	441.9	19.25	610.0
16.00	454.5	19.50	587.2
16.25	480.4		



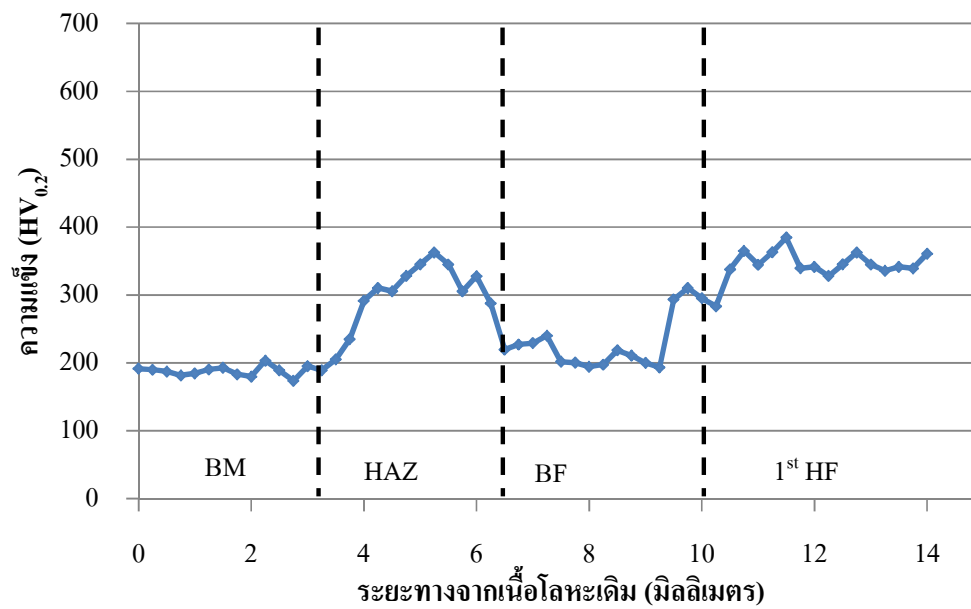
รูปที่ ก.10 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม NP-1-3-A

ตารางที่ ก.11 ค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-1-A

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	191.6	6.50	219.7
0.25	190.0	6.75	227.2
0.50	187.4	7.00	229.1
0.75	181.6	7.25	240.0
1.00	184.7	7.50	201.8
1.25	190.4	7.75	200.5
1.50	192.9	8.00	194.4
1.75	183.3	8.25	197.5
2.00	179.9	8.50	218.5
2.25	203.3	8.75	210.9
2.50	188.9	9.00	199.9
2.75	173.7	9.25	193.5
3.00	195.4	9.50	293.4
3.25	189.1	9.75	310.6
3.50	205.3	10.00	295.2
3.75	235.2	10.25	283.4
4.00	291.5	10.50	338.0
4.25	310.6	10.75	364.9
4.50	305.7	11.00	344.6
4.75	327.9	11.25	362.9
5.00	345.2	11.50	384.8
5.25	362.8	11.75	339.6
5.50	345.1	12.00	341.6
5.75	305.5	12.25	327.9
6.00	327.7	12.50	345.2
6.25	288.0	12.75	362.8

ตารางที่ ก.11 ค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-1-A (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	345.1	13.75	339.4
13.25	335.7	14.00	360.7
13.50	341.5		



รูปที่ ก.11 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-1-A

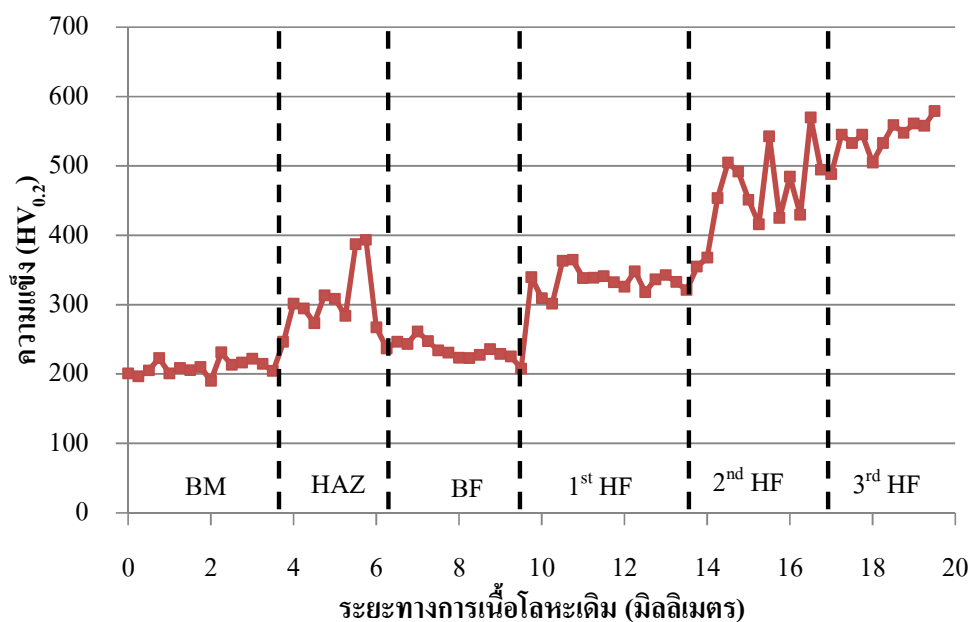


ตารางที่ ก.12 ค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-3-A

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	200.7	6.50	246.2
0.25	196.6	6.75	243.5
0.50	205.3	7.00	261.2
0.75	223.0	7.25	247.3
1.00	200.6	7.50	233.6
1.25	208.4	7.75	230.5
1.50	205.7	8.00	223.4
1.75	210.0	8.25	222.8
2.00	190.1	8.50	227.5
2.25	231.1	8.75	235.9
2.50	213.2	9.00	229.0
2.75	216.4	9.25	225.1
3.00	221.9	9.50	207.8
3.25	214.5	9.75	339.5
3.50	204.4	10.00	309.2
3.75	246.3	10.25	301.6
4.00	301.5	10.50	362.8
4.25	294.4	10.75	364.5
4.50	273.4	11.00	338.4
4.75	313.1	11.25	338.5
5.00	308.5	11.50	341.0
5.25	283.4	11.75	332.1
5.50	387.4	12.00	325.6
5.75	393.1	12.25	347.8
6.00	267.3	12.50	317.9
6.25	236.8	12.75	336.7

ตารางที่ ก.12 ค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-3-A (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	342.6	16.50	569.6
13.25	332.5	16.75	494.3
13.50	320.8	17.00	488.4
13.75	354.7	17.25	545.0
14.00	367.8	17.50	532.9
14.25	453.4	17.75	545.0
14.50	504.6	18.00	504.6
14.75	491.8	18.25	532.7
15.00	450.8	18.50	558.9
15.25	415.9	18.75	547.8
15.50	542.5	19.00	560.9
15.75	425.1	19.25	557.8
16.00	484.2	19.50	578.9
16.25	429.8		



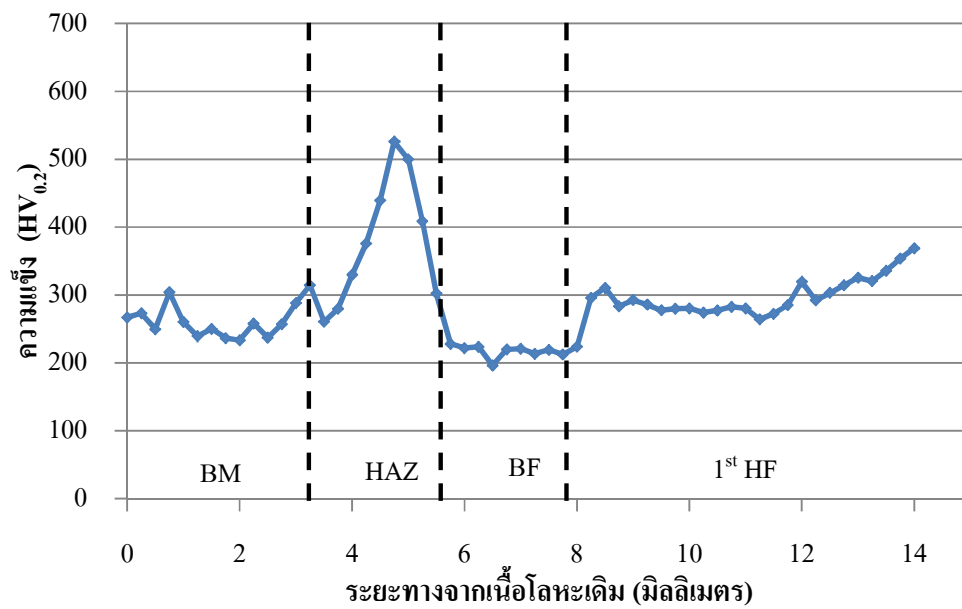
รูปที่ ก.12 ค่าความแข็งของการเชื่อม 250-1-3-A

ตารางที่ ก.13 ค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-1-A

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	267.0	6.50	196.3
0.25	273.1	6.75	220.0
0.50	249.9	7.00	220.9
0.75	304.0	7.25	213.4
1.00	260.3	7.50	219.3
1.25	239.4	7.75	212.6
1.50	250.2	8.00	223.9
1.75	236.5	8.25	295.7
2.00	233.5	8.50	310.6
2.25	257.9	8.75	283.4
2.50	237.2	9.00	292.6
2.75	257.1	9.25	285.9
3.00	288.1	9.50	277.5
3.25	314.4	9.75	279.9
3.50	260.6	10.00	280.3
3.75	279.7	10.25	274.1
4.00	329.7	10.50	277.2
4.25	376.0	10.75	282.6
4.50	439.4	11.00	280.4
4.75	526.1	11.25	264.3
5.00	499.8	11.50	272.3
5.25	408.6	11.75	285.3
5.50	302.2	12.00	319.5
5.75	228.0	12.25	292.1
6.00	221.9	12.50	303.1
6.25	223.7	12.75	314.3

ตารางที่ ก.13 ค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-1-A (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	325.6	13.75	353.6
13.25	320.5	14.00	368.9
13.50	335.7		



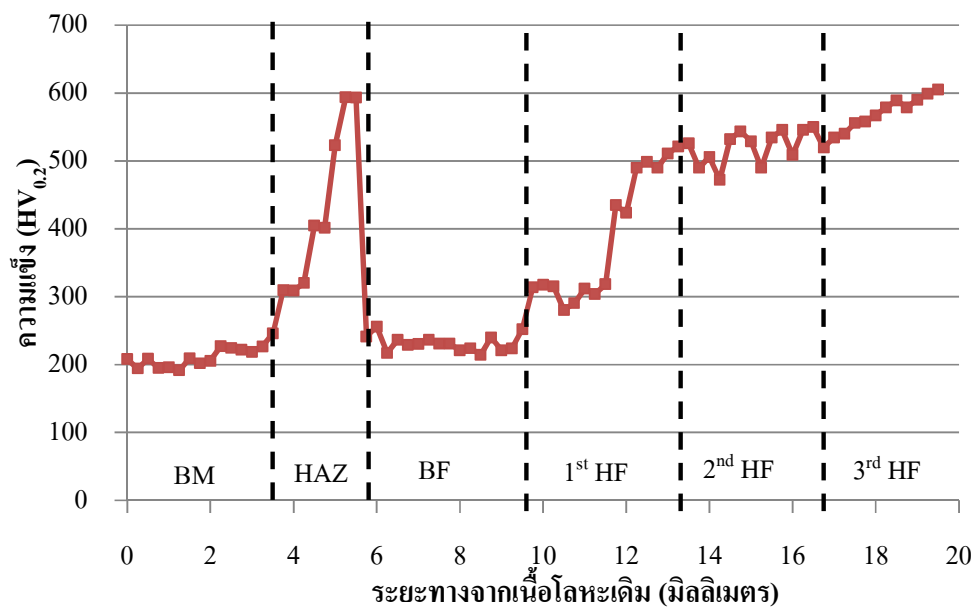
รูปที่ ก.13 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-1-A

ตารางที่ ก.14 ค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-3-A

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	207.9	6.50	236.3
0.25	194.3	6.75	228.7
0.50	208.6	7.00	230.0
0.75	195.1	7.25	236.2
1.00	196.3	7.50	230.7
1.25	191.5	7.75	230.8
1.50	209.0	8.00	220.9
1.75	201.8	8.25	224.0
2.00	205.5	8.50	214.3
2.25	226.9	8.75	240.1
2.50	224.6	9.00	220.9
2.75	221.6	9.25	223.7
3.00	218.7	9.50	252.1
3.25	226.7	9.75	313.8
3.50	245.6	10.00	317.3
3.75	309.3	10.25	315.3
4.00	309.2	10.50	280.3
4.25	320.1	10.75	290.4
4.50	404.6	11.00	311.5
4.75	401.8	11.25	303.9
5.00	522.9	11.50	318.2
5.25	594.1	11.75	434.7
5.50	593.6	12.00	423.6
5.75	241.1	12.25	489.7
6.00	256.0	12.50	498.6
6.25	217.0	12.75	490.0

ตารางที่ ก.14 ค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-3-A (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	510.6	16.50	550.0
13.25	521.4	16.75	519.5
13.50	525.5	17.00	534.6
13.75	489.7	17.25	540.0
14.00	505.9	17.50	556.0
14.25	472.2	17.75	558.0
14.50	532.1	18.00	567.0
14.75	543.6	18.25	579.0
15.00	528.8	18.50	589.0
15.25	489.7	18.75	579.0
15.50	534.6	19.00	590.0
15.75	545.6	19.25	599.0
16.00	508.8	19.50	605.0
16.25	545.6		



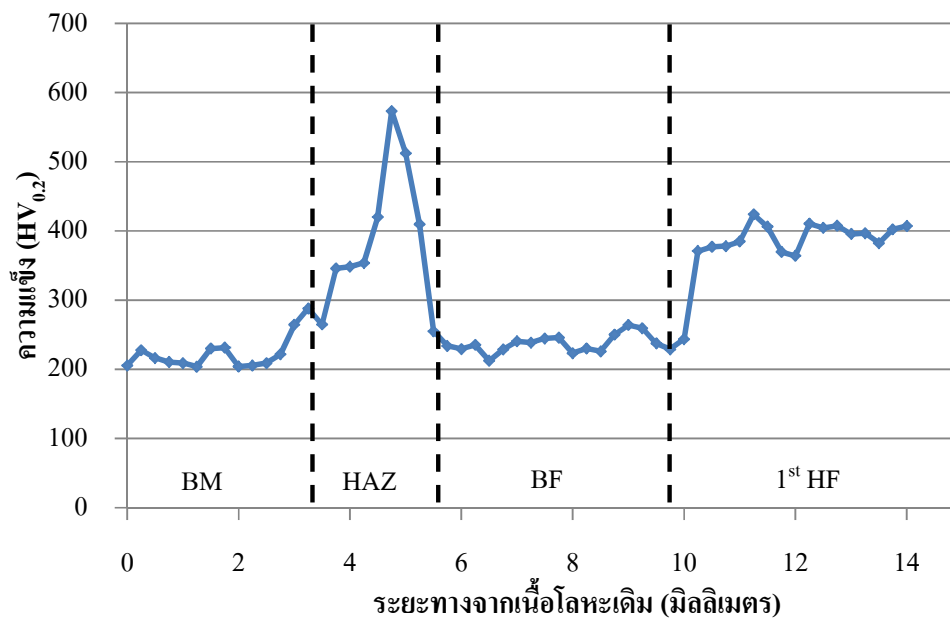
รูปที่ ก.14 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 300-1-3-A

ตารางที่ ก.15 ค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-1-A

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	205.2	6.50	212.1
0.25	227.7	6.75	228.8
0.50	216.2	7.00	240.4
0.75	210.5	7.25	238.4
1.00	209.0	7.50	244.5
1.25	203.6	7.75	245.9
1.50	230.1	8.00	223.3
1.75	231.3	8.25	230.1
2.00	204.0	8.50	225.8
2.25	205.5	8.75	250.1
2.50	209.0	9.00	264.0
2.75	221.8	9.25	259.4
3.00	264.4	9.50	237.3
3.25	288.1	9.75	228.9
3.50	264.7	10.00	243.7
3.75	345.8	10.25	370.9
4.00	348.4	10.50	377.1
4.25	353.7	10.75	378.0
4.50	420.0	11.00	384.9
4.75	573.2	11.25	424.0
5.00	512.5	11.50	406.1
5.25	409.7	11.75	369.7
5.50	255.0	12.00	364.0
5.75	233.8	12.25	410.5
6.00	229.3	12.50	404.5
6.25	235.3	12.75	407.5

ตารางที่ ก.15 ค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-1-A (ต่อ)

ระยะทางจาก โลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจาก โลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	395.6	13.75	402.5
13.25	396.8	14.00	407.1
13.50	382.4		



รูปที่ ก.15 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-1-A

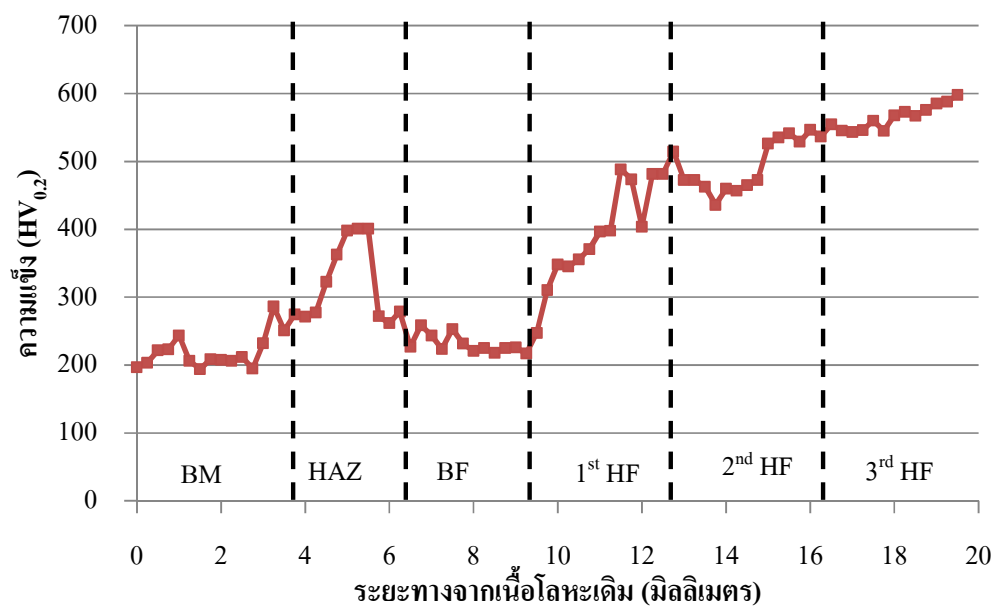


ตารางที่ ก.16 ค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-3-A

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
0.00	196.7	6.50	227.0
0.25	203.4	6.75	258.8
0.50	221.8	7.00	243.7
0.75	223.4	7.25	223.5
1.00	243.7	7.50	252.9
1.25	206.2	7.75	231.5
1.50	194.1	8.00	221.0
1.75	208.5	8.25	225.0
2.00	207.9	8.50	218.0
2.25	206.3	8.75	225.0
2.50	211.8	9.00	226.0
2.75	194.8	9.25	217.0
3.00	232.3	9.50	247.0
3.25	286.0	9.75	310.5
3.50	251.0	10.00	348.4
3.75	274.7	10.25	345.0
4.00	270.9	10.50	355.7
4.25	277.4	10.75	370.8
4.50	322.5	11.00	396.3
4.75	362.6	11.25	397.6
5.00	398.4	11.50	488.2
5.25	401.1	11.75	473.7
5.50	401.0	12.00	403.7
5.75	271.9	12.25	481.6
6.00	261.6	12.50	481.6
6.25	278.7	12.75	514.4

ตารางที่ ก.16 ค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-3-A (ต่อ)

ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ระยะทางจากโลหะเดิม (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (วิกเกอร์)
13.00	472.7	16.50	554.5
13.25	472.7	16.75	545.2
13.50	462.5	17.00	543.0
13.75	436.1	17.25	546.0
14.00	459.7	17.50	560.0
14.25	456.7	17.75	545.0
14.50	465.0	18.00	568.0
14.75	472.8	18.25	573.0
15.00	526.3	18.50	567.0
15.25	535.3	18.75	576.0
15.50	541.5	19.00	585.0
15.75	528.9	19.25	588.0
16.00	546.5	19.50	598.0
16.25	536.6		



รูปที่ ก.16 กราฟค่าความแข็งของการเชื่อม 350-1-3-A

ภาคผนวก ข  
บทความวารสาร

## Hardfacing of 3.5% Chromium Cast Steel by Flux Cored Wire Arc Welding Process

Teerachod Treeparee<sup>1,a</sup>, Prapas Muangjunburee<sup>2,b\*</sup>

<sup>1,2</sup>Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkhla University, Hatyai, Songkhla, 90112

<sup>a</sup>teerachod.t@gmail.com, <sup>b\*</sup>mprapas@eng.psu.ac.th

**Keywords:** 3.5% chromium cast steel, Buffer, Hardfacing, Abrasive wear

**Abstract.** Hardfacing weld is a technique which mainly improves and extends the useful life of engineering components. The purpose of this research is to improve welding procedure for one layer and three layers hardfacing of 3.5% Chromium cast steel and to study wear behavior of hardfacing layers. Flux Cored Wire Arc Welding (FCAW) process has been used as a welding process of this research by choosing austenitic stainless steel and martensitic hardfacing wire to weld the buffer and hardfacing layer respectively. Preheating was also used in this study. Abrasive wear test of hardfacing deposit were conducted in accordance with procedure “A” standard of ASTM G65. In addition, microstructures and macrostructure of worn surface deposits were analyzed by using optical microscope. These results showed that there is no crack and defect in the Heat Affected Zone (HAZ) and other regions. The hardness of preheating sample in HAZ regions was lower than the ones without preheating. Therefore, preheating samples should be done before welding. The abrasive wear resistance of three layers hardfacing deposit was better than one layer hardfacing deposit because one layer hardfacing deposit was more diluted from buffer layer than three layers hardfacing deposit. Moreover, weight loss of one hardfacing layer was also higher than three layers.

### Introduction

Flux Cored Arc Welding (FCAW) process is one alternative method of repairing industrial engineering elements among welding processes in the world. There are many benefits more than other process such as high deposition rate than Gas Metal Arc Welding (GMAW) process, simple and more adaptable than Submerge Arc Welding (SAW) process and high productivity than Manual Metal Arc Welding (MMAW) process. Most of the repairs in industry are performed by using the manual metal arc welding. However, the benefits of the flux cored arc welding process have been appreciated by the industry for many years [1]. Weld deposition of hardfacing is used for repairing mechanical components in mining, sugar industry and others. When hardness of these parts are increased, they will perform higher abrasive wear resistance [2]. The tubular electrode for FCAW contains alloying elements that modify the molten weld metal, deoxidizers, stabilizers, slag forming elements and flux materials [3]. Hardfacing improves and extends the useful life of engineering components by repairing the worn surface in service life [4]. The abrasive resistance of FCAW deposits depends on several factors that strongly influence solidification and the solution of the weld metal such as heat input, the number of layers and the type of shielding gas but it depends mainly on the microstructure which defines their properties [5]. In wear resistance, both hardness and toughness play important roles, and microstructure should be hard enough and ductile by martensitic microstructure for abrasive wear resistance and ductile parts should be austenitic microstructure in order to help impact wear resistance [6]. Chromium steel is sensitive to crack in heat affected zone (HAZ). The preheating before welding can control the microstructure of heat affected zone [7]. In this work, the macro/microstructure and wear behavior of hardfacing deposits on the 3.5% chromium steel base metal with different layer and preheating temperatures weld by flux cored wire arc welding (FCAW) process was studied and compare.

## Experimental

### Materials and welding condition

The base material specimen was used by 3.5% Chromium steel plate with dimensions of 250mm x 75mm x 20mm for the experiment. Chemical composition and hardness values of base metal are shown in Table 1. The commercial welding wires were evaluated for flux cored wire arc welding (FCAW) process as hardfacing wire and buffer wire in this work. The chemical composition and hardness value of wire are shown in Table 2.

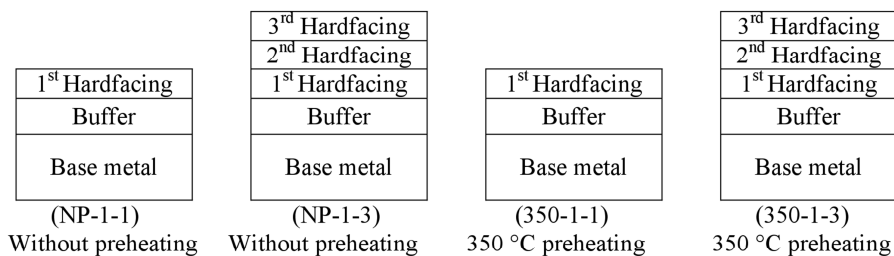
**Table 1** Chemical composition of 3.5% Chromium steel plate (wt%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe	Hardness
0.41	0.68	0.66	0.17	3.10	0.28	0.15	Bal	200HV

**Table 2** Chemical composition of hardfacing wire and buffer wire (wt%)

Wire	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Hardness
Hardfacing	0.5	2.5	1.3	8.5	-	Bal	680HV
Buffer	0.1	0.5	6	19	9	Bal	235HV

Each coupon was welded under different conditions of two samples without preheating and varying hardfacing deposition layer. The welding parameters employed can be seen in Table 3. The consumable flux cored wire was employed by 1.6 mm diameter. The electrode stick out was 5 mm and mixing gas (90%Ar + 10%CO<sub>2</sub>) flow rate was used 20 l/min. The welding position was flat. After deposition, the samples were cooled in air. Four different types of sample were prepared by depositing hardfacing layers on 3.5% chromium steel, as illustrated in Fig. 1.



**Fig. 1.** Layout of four specimens prepared by hardfacing

### Macro and microstructure analysis

The cross section of samples was etched with Nital 2% for substrate and hardfacing. Villera's reagent was used for buffer layer. Optical microscopy (OM) was used to observe the microstructural and macrostructural analysis of sample.

### Hardness test

The Microhardness values of the hardfacing deposit were taken in a Vicker's hardness testing, using 0.2 kg<sub>r</sub> (1961 N) load, dwell time was 10 s on transverse cross section and the position test of each point was 0.25 mm. The value of microhardness was different from the first and the third layer of deposition.

### Abrasive wear test

The hardfacing deposit plates were sectioned for wear test (12.7 mm x 25.4 mm x 74.6 mm). The abrasive wear test was carried out using the dry sand-rubber wheel machine (Procedure A) under ASTM G65 standard. Round quartz sand was used as abrasive size between 212-300 μm. The normal loads and flow rate of sand were 130 N and 300 g/min. Wheel rotation speed, wheel diameter and total distance of wheel rotation were 200 rpm, 228.6 mm and 4309 m respectively. Finally, the sample mass loss was measured in an electronic scale.

**Table 3** Welding parameters

Wire	Current(A)	Voltage(V)	Travel speed(cm/min)	Heat input (kJ/cm)
Hardfacing	210-220	23-25	35-40	7.35
Buffer	190-210	23-25	35-40	6.82

## Result and Discussion

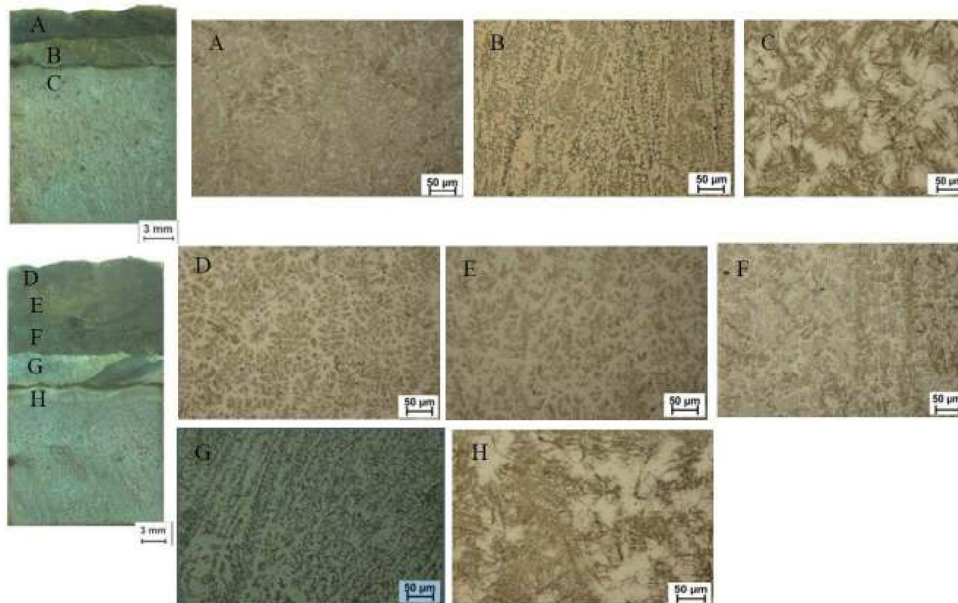
### *Macrostructure and microstructure*

The base metal (BM) microstructure is presented in Fig. 2 It consists of ferrite and pearlite phase.

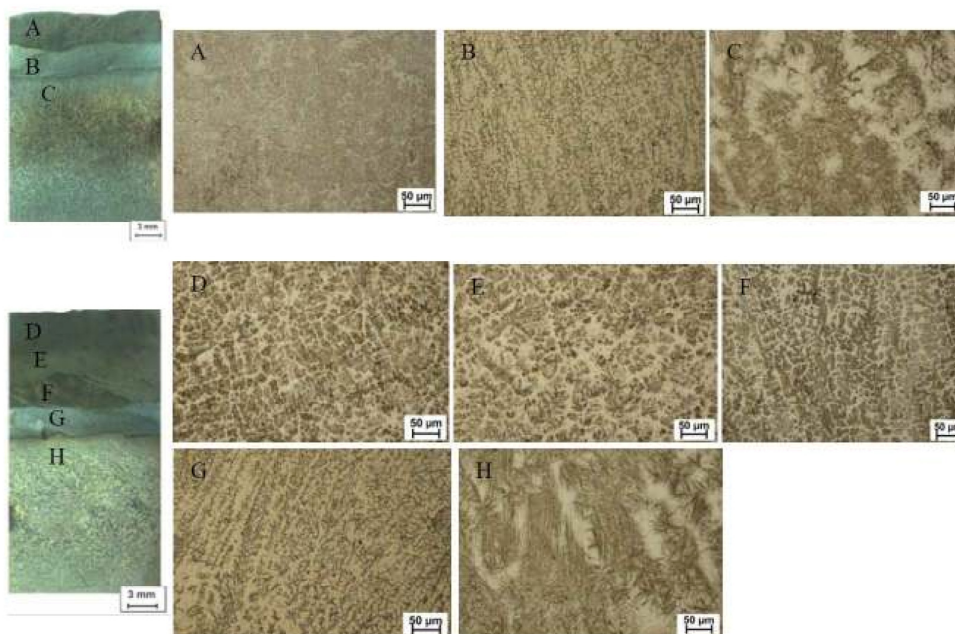


**Fig. 2.** Base metal microstructure

The Fig. 3 shows macro/microstructure of specimens NP-1-1 and NP-1-3. The macrostructure of NP-1-1 revealed fusion is good and no crack. Fig. 3C and Fig. 3H show microstructure of heat affected zone that consists of martensitic microstructure. The white region of HAZ shows austenite phase and HAZ which have martensite phase due to the high cooling rate of base metal transformed from bainite, ferrite and pearlite phase to martensite phase. The Fig. 3B and Fig. 3G show microstructure of buffer that consists of autenitic microstructure. In Fig. 3A and Fig. 3F show that white region is autenitic microstructure and black region is martensitic microstructure for first hardfacing. This layer gets high dilution from buffer layer. The Fig. 3E presents the second hardfacing layer mixed with martensitic and austenitic microstructure because some area of this layer diluted from buffer layer. The Fig. 3D shows fully martensitic microstructure of third hardfacing which has no dilution from buffer layer.



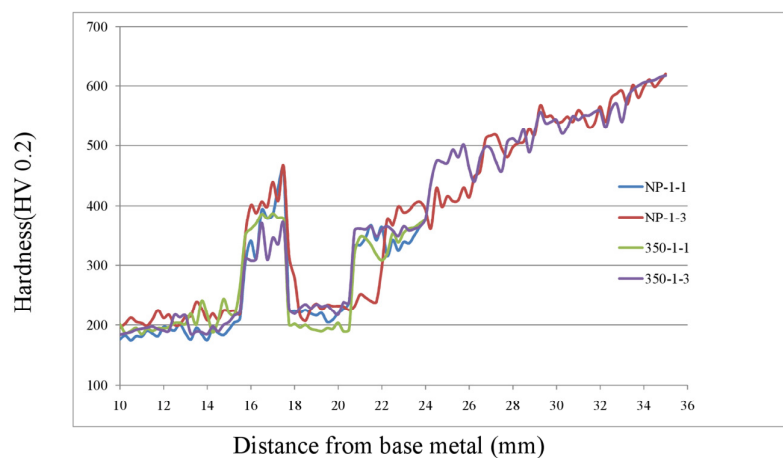
**Fig. 3.** Macro/microstructure of specimens NP-1-1 and NP-1-3



**Fig. 4.** Macro/microstructure of specimen 350-1-1 and 350-1-3

The Fig. 4 shows macro/microstructure of specimen 350-1-1 and 350-1-3. The Fig. 4C and Fig. 4H show microstructure of heat affected zone that consists of martensite phase and austenite phase. The Fig. 4B and Fig. 4G show austenitic microstructure. The Fig. 4A and Fig. 4F show martensitic microstructure with high diluted buffer layer. In Fig. 4E, black region shows martensite phase and white region shows austenite phase respectively. The Fig. 4D shows fully martensitic microstructure because there is no dilution from buffer and adjacent layer (second hardfacing layer) also showed martensitic microstructure.

### Hardness



**Fig. 5.** Hardness profile across weld



The hardness value of each specimen results is shown in Fig. 5. The hardness value of third hardfacing layer of two specimens is the highest due to fully martensitic microstructure. Hardness value of HAZ region for each specimen is also high because of fast cooling rate after welding. The hardness value of buffer layer is as same as base metal about 200 Vickers. The first hardfacing layer hardness value is lower than the second hardfacing layer and third hardfacing layer due to high dilution from buffer layer. Although the second hardfacing layer has higher hardness value than first hardfacing layer due to small amount of dilution from buffer, the third hardfacing has no effect from buffer that makes hardness value is highest. The specimen 350-1-3 shows hardness value of HAZ which is good for deployment.

#### **Wear resistance**

**Table 4** Abrasive resistance

Specimen designation	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight loss (g)	Abrasive wear resistance (mmg)
BM	181.9646	179.2033	2.7613	1.5604
NP-1-1	200.0479	197.6750	2.3729	1.8159
NP-1-3	188.0904	185.8413	2.2491	1.9159
350-1-1	209.3963	207.0801	2.3162	1.8604
350-1-3	202.8086	200.7782	2.0304	2.1222

Abrasion resistance test results of FCAW surfaced deposits of 5 conditions are shown in Table 4. The best abrasive wear resistance value is condition of one buffer layer, three hardfacing layers and preheating 350°C because there is low dilution and fully martensitic microstructure. Three hardfacing layers showed lower weight loss than one hardfacing layer as one hardfacing layer gets some dilution from buffer layer, which is tough and shows austenitic microstructure. The higher hardness value is, the lower weight loss value is.

#### **Summary**

1. The preheating of sample have affect hardness value at HAZ regions.
2. High hardness value makes abrasive wear resistance elevated.
3. Three layers hardfacing deposit with preheating 350°C (350-1-3) is the best condition.
4. Dilution can affect to microstructure and mechanical properties of hardfacing deposit.

#### **Acknowledgement**

The authors wish to thank Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkhla University in Thailand. In addition, partially supported by Center of Excellence in Materials Engineering (CEME).

#### **References**

- [1] Syarul AM, Izatul AI, Amalina A, Abdul G. The effect of flux core arc welding processes on different parameters. *Procedia Engineering*. 2012;41:1497-1501.
- [2] John J., Holman F., Adolfo L. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International*. 2009;42:745-49.
- [3] D.Katherasan, Jiju V., P. Sathiya, A. Noorul Haq. Flux Cored Arc Welding Parameter Optimization Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Procedia Engineering*. 2012; 38:3913-26.
- [4] M.Adamiak, J. Gorka, T.kik. Comparison of abrasion resistance of selected constructional materials. *Materials and manufacturing engineering*. 2009; vol.37.



- [5] Agustin G., Hernan G., Estela S. Study of abrasive wear resistance of Fe-based nanostructured hardfacing. *Wear*. 2016;360-361:14-20.
- [6] Shafiee A, Nili-Ahmadabadi M, Ghasemi HM, Hossein-Mirzaei E. Wear behavior of a Cr-Mo steel with different microstructures, in comparison with austempered ductile iron (ADI). *Int J Mater Form*. 2009;2(1):237-41.
- [7] Gualco A, Svoboda HG, Surian ES, De Vedia LA. Effect of welding procedure on wear behavior of modified martensitic tool steel hardfacing deposit. *Materials and Design*. 2010;31:4165-173

**การศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของชั้นเชื่อมพอกแข็งบน  
เหล็กกล้า 3.5% โครเมียมโดยการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์  
The Study of Wear Behavior of Hardfacing layer on  
3.5% Cr steel by Flux Cored Wire Arc Welding  
Process**

ธีรโชติ ตรีเทรี\* และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี

**Teerachod Treeparee\* and Prapas Muangjunburee<sup>2</sup>**

\*ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

\*Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkhla University, Hatyai, Songkhla, 90112

\*E-mail: teerachod.t@gmail.com, mprapas@eng.psu.ac.th

### บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกแข็งเป็นเทคนิคหลักในการปรับปรุงและยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนในทางวิศวกรรม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของชั้นพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ อันประกอบด้วยวิธีการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติที่มีชั้นพอกแข็งจำนวน 1 ชั้น และ 3 ชั้น โดยใช้ลวดเชื่อมชนิดออสเทนนิติกสแตนเลสในการเชื่อมชั้นรองพื้นและลวดชนิดมาเทนซิติกในการเชื่อมชั้นพอกแข็ง จากผลการทดสอบพบว่าไม่พบข้อบกพร่องในบริเวณกระแทกร้อนและบริเวณอื่นๆ การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติมีความต้านทานการสึกหรอสูงการเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติ เนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซด์มากกว่าจึงทำให้มีค่าความแข็งมากกว่า นอกจากนี้การเชื่อมพอกแข็งแบบ 3 ชั้นมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบ 1 ชั้น เนื่องจากเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้นน้อยกว่า โดยงานวิจัยนี้สภาวะการเชื่อมพอกแข็งที่ดีที่สุดคือ การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีจำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น

**คำสำคัญ:** เหล็กกล้า 3.5% โครเมียม, การเชื่อมพอกแข็ง, การสึกหรอแบบขัดสี, กระบวนการเชื่อมด้วยลวดแกน ฟลักซ์

### ABSTRACT

Hardfacing weld is a technique which mainly improves and extends the useful life of engineering components. The purpose of this research is to study wear behavior of hardfacing layers on 3.5% Chromium cast steel by Flux Cored Wire Arc Welding (FCAW) process. The automatic welding process and semiautomatic welding process with one and three layers was performed. Austenitic stainless steel and martensitic hardfacing wire were chosen to weld as the buffer and hardfacing layer respectively. These results showed that there is no defect in the Heat Affected Zone (HAZ) and other regions. Semiautomatic process showed higher abrasive wear resistance than automatic process due to more martensite content and higher hardness. Moreover, the abrasive wear resistance of three layers hardfacing was better than one layer hardfacing because one layer hardfacing

was more diluted from buffer layer than three layers hardfacing. The best condition in this research is semiautomatic process with three layers hardfacing.

**Keyword:** 3.5% Cr steel, Hardfacing, Abrasive wear, FCAW

## 1. บทนำ

กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการเชื่อมซ่อมชิ้นส่วนทางวิศวกรรมในโรงงาน ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมในปัจจุบัน โดยมีข้อดีเมื่อเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่นๆ เช่น มีอัตราการเติมเนื้อเชื่อมที่สูงกว่าการเชื่อมมิกและทิก ใช้งานง่ายและไม่ซับซ้อน และมีกำลังการผลิตสูงกว่าการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [1]

การเชื่อมพอกแข็งใช้สำหรับการซ่อมแซมชิ้นส่วนทางเหมืองแร่ อุตสาหกรรมน้ำตาล และ อุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ชิ้นส่วนเกิดการสึกหรอทางกล เมื่อค่าความแข็งของชิ้นส่วนเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นส่วนนั้นมีความต้านทานการสึกหรอสูงขึ้น เนื่องจากการสูญเสียเนื้อที่น้อยลง [2,7] ลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ประกอบด้วยโลหะผสมลงไปในฟลักซ์เพื่อใช้ในการปรับปรุงแนวเชื่อม ทำให้การอาร์กมีความเสถียร และป้องกันบรรยากาศภายนอกเข้าสู่บ่อหลอม [3] การต้านทานการสึกหรอของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณความร้อนเข้า ชั้นของการเชื่อมพอกแข็ง และประเภทของแก๊สปกคลุม ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อ โครงสร้างจุลภาคและเป็นตัวกำหนดสมบัติที่เกิดขึ้นด้วย [4] สำหรับสมบัติการต้านทานการสึกหรอ ความแข็งและความเหนียวของชิ้นงานเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยควรประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์สำหรับป้องกันการสึกหรอแบบขัดสี และโครงสร้างออสเทนไนต์สำหรับป้องกันการสึกหรอแบบกระแทก [5] นอกจากนี้การเชื่อมพอกแข็งที่มีการเจือจางที่สูงทำให้ความต้านทานการสึกหรอของเนื้อเชื่อมพอกแข็งลดลง และสำหรับการเชื่อมพอกแข็งควรมีชั้นรองพื้นเพื่อป้องกันการแตกและช่วยลดความเค้นของชิ้นงานเชื่อม [6,8]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอและโครงสร้างของชั้นพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5%

โครเมียมที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ที่มีชั้นพอกแข็งแตกต่างกัน เมื่อทำการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัสดุและกระบวนการเชื่อม

วัสดุที่ใช้เป็นในงานวิจัยนี้คือ 3.5% โครเมียมซึ่งมีขนาด 250 ม.ม.x75 ม.ม.x20 ม.ม. โดยมีส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งแสดงอยู่ในตารางที่ 1 ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ลวดเชื่อมชนิดมาเทนซิดิกเกรด สำหรับการเชื่อมชั้นพอกแข็ง และลวดเชื่อมชนิด ออสเทนนิติกเกรด สำหรับการเชื่อมชั้นรองพื้น โดยลวดเชื่อมแต่ละชนิดมีส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งดังแสดงอยู่ในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ธาตุ	3.5% Cr
C	0.41
Si	0.68
Mn	0.66
Ni	0.17
Cr	3.10
Mo	0.28
Cu	0.15
Fe	Balance
Hardness	200 HV

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ธาตุ	ลวดชั้นพอกแข็ง	ลวดชั้นรองพื้น
C	0.5	0.1
Si	2.5	0.5
Mn	1.3	6
Cr	8.5	19
Ni	-	9
Fe	Balance	Balance
Hardness	680 HV	235 HV

ทำการเชื่อมรองพื้น (Buffer) ด้วยลวดเชื่อมจำนวน 1 ชั้น และตามด้วยการเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ โดยใช้เครื่องเชื่อมยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPlus Syneqic 400 มีทั้งการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ และอัตโนมัติ โดยการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติใช้อุปกรณ์การเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งใช้เครื่องเชื่อมเดียวกับการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติใช้เท่าเดินรางในการจับหัวเชื่อมในการเชื่อมมีสภาวะการเชื่อมพอกแข็งแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ อันได้แก่ 1) ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง (1 ชั้น) ที่เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (1-S) 2) ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง (3 ชั้น) ที่เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (3-S) 3) ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง (1 ชั้น) ที่เชื่อมแบบอัตโนมัติ (1-A) และ 4) ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง (3 ชั้น) ที่เชื่อมแบบอัตโนมัติ (3-S) ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิระหว่างเชื่อมไม่ให้เกิน 300 องศาเซลเซียส โดยตารางที่ 3 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม



รูปที่ 2 อุปกรณ์การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ

1 <sup>st</sup> Hardfacing
Buffer
Base metal

เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (1-S)

1 <sup>st</sup> Hardfacing
Buffer
Base metal

เชื่อมแบบอัตโนมัติ (1-A)

3 <sup>rd</sup> Hardfacing
2 <sup>nd</sup> Hardfacing
1 <sup>st</sup> Hardfacing
Buffer
Base metal

เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (3-S)

3 <sup>rd</sup> Hardfacing
2 <sup>nd</sup> Hardfacing
1 <sup>st</sup> Hardfacing
Buffer
Base metal

เชื่อมแบบอัตโนมัติ (3-A)

รูปที่ 1 แบบจำลองการทดลองในงานวิจัยนี้

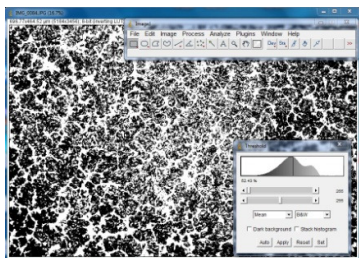
ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรในการเชื่อมของแต่ละลวด

	ลวดชั้นรองพื้น EN14700: T Fe 8	ลวดพอก แข็ง EN14700: T Fe 10
ลวดเชื่อม(mm)	1.6	
ขั้วไฟฟ้า	DCEP	
กระแสไฟฟ้า (A)	190-210	200-220
แรงดันไฟฟ้า (V)	23-25	23-25
ความเร็วในการเชื่อม (cm/min)	35-40	35-40
ความร้อนเข้า (kJ/cm)	6.82	7.35
แก๊สปกคลุม	90% Ar+ 10% CO <sub>2</sub>	
อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม (l/min)	10	
ระยะยื่นของลวด (mm)	5	
อุณหภูมิอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม (°C)	300	

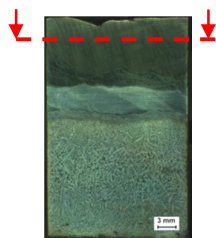
2.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

หลังการเชื่อมนำชิ้นงานเชื่อมมาตัดเพื่อเตรียมผิวสำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคในบริเวณพื้นที่ตามขวาง (Cross Section) และบริเวณผิวด้านบนชั้นพอกแข็ง (Top Surface) ดังรูปที่ 4 โดยทำการหล่อเรซิน (Mounting) แล้วทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทราย

และขัดละเอียด (Polishing) ด้วยอลูมินาขนาด 5 ไมครอน จากนั้นทำการกัดผิวหน้าชิ้นงาน (Etching) ด้วยไนตอล 2% (2% Nital) เป็นเวลา 6 วินาที สำหรับบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณกระทบบร้อน และกรดวิเอร่า (Villera's reagent) เป็นเวลา 15-30 วินาที สำหรับบริเวณชั้นรองพื้น และชั้นพอกแข็ง หลังจากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องสเตอริโอ (Stereoscope) และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในแต่ละบริเวณของชิ้นงานเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Optical Microscopy: OM) พร้อมทั้งทำการหาปริมาณเฟสมาร์เทนไซต์ในชั้นพอกแข็งด้วยโปรแกรม Image J โดยแต่ละชิ้นงานมีการถ่ายรูปจำนวนทั้งหมด 5 ตำแหน่งเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์มาร์เทนไซต์ สำหรับขั้นตอนการหาปริมาณมาร์เทนไซต์คือนำรูปโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งเข้าโปรแกรม Image J จากนั้นเปลี่ยนประเภทของภาพเป็นขนาด 8 bit ภาพจะเปลี่ยนเป็นขาวกับดำถัดมาทำการเซตสเกลของภาพและทำการวิเคราะห์ปริมาณมาร์เทนไซต์โดยเฟสสีดำที่ปรากฏในโปรแกรมจะเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โปรแกรม Image J เพื่อหาปริมาณมาร์เทนไซต์



รูปที่ 4 ทิศทางการตัดผิวด้านบนของชั้นพอกแข็ง

**2.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)**

ทำการทดสอบความแข็งในชิ้นงานเชื่อมด้วยเครื่องมือไมโครวิกเกอร์ส โดยใช้น้ำหนักกดเท่ากับ 200 g<sub>f</sub> เป็นเวลา 10 วินาที และระยะห่างแต่ละตำแหน่งของการทดสอบเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร โดยเริ่มกดจากบริเวณเนื้อโลหะเดิมจนถึงบริเวณชั้นพอกแข็งในชิ้นงานที่ตัดตามขวาง สำหรับชิ้นงานบริเวณผิวด้านบนชั้นพอกแข็งได้ทำการวัดความแข็งแบบสุ่มจำนวน 10 จุด

**2.4 การทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear test)**

ทำการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี โดยให้ชิ้นงานมีขนาด 12.7 ม.ม. x 25.4 ม.ม. x 74.6 ม.ม. ดังรูปที่ 5 จากนั้นทำการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีด้วยเครื่อง Dry Sand Rubber Wheel ตามมาตรฐาน ASTM G65 ขั้นตอน A โดยสภาวะการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 4 โดยต้องมีการชั่งน้ำหนักทั้งก่อนและหลังการทดสอบเพื่อนำไปหาค่าการสูญเสียเนื้อเชื่อม (Mass loss)



รูปที่ 5 ชิ้นงานก่อนการทดสอบการสึกหรอ

ตารางที่ 4 ตัวแปรในการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี

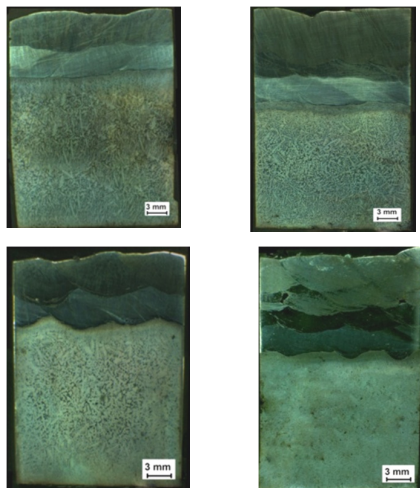
โหลด (N)	130
ขนาดทราย (ไมครอน)	212-300
อัตราไหลของทราย (กรัม ต่อ นาที)	300
ความเร็วของล้อยาง (รอบ ต่อ นาที)	200
ขนาดล้อยาง (ม.ม.)	228.6
ระยะของการเคลื่อนที่ของล้อยาง (ม.)	4309

### 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### 3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

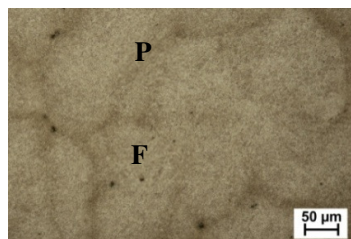
##### 3.1.1 บริเวณพื้นที่ตามขวาง

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบว่าทุกชั้นงานเชื่อมมีการหลอมลึกที่สมบูรณ์ และไม่พบข้อบกพร่องในบริเวณแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 6



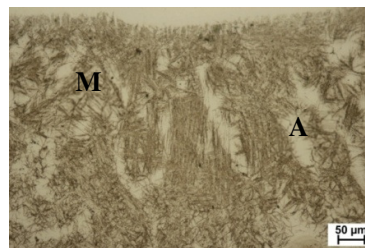
รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของชั้นงานเชื่อมพอกแข็ง

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วย เฟอร์ไรต์ (F) และเฟอไรต์ไลต์ (P) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม

สำหรับบริเวณกระตบร้อนพบว่าประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ (M) ซึ่งมีรูปร่างคล้ายเข็มและออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite (A)) ดังรูปที่ 8 อันเป็นผลมาจากในระหว่างการเชื่อมบริเวณนี้ได้รับความร้อนสูงจนเกิดเป็นออสเทนไนต์ และเกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว กลายมาเป็นมาร์เทนไซต์



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระตบร้อน

สำหรับบริเวณชั้นรองพื้นพบว่าประกอบด้วยออสเทนไนต์ที่มีเฟอร์ไรต์ตามขอบเกรน ดังตารางที่ 6 รูป ก1 ข1 ค1 และ ง1

สำหรับบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 พบว่าประกอบด้วยส่วนใหญ่ประกอบด้วยออสเทนไนต์และมาร์เทนไซต์บางส่วน ซึ่งโดยปกติแล้วเชื่อมพอกแข็งชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ แต่เนื่องจากเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้น จึงทำให้ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 มีออสเทนไนต์ในปริมาณมาก ดังแสดงในรูป ก2 ข2 ค2 และ ง2

สำหรับบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 พบว่าประกอบด้วยออสเทนไนต์และมาร์เทนไซต์เช่นเดียวกับชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 แต่มีปริมาณของมาร์เทนไซต์มากกว่า เนื่องจากเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้นน้อยลง ดังแสดงในรูป ข3 และ ง3

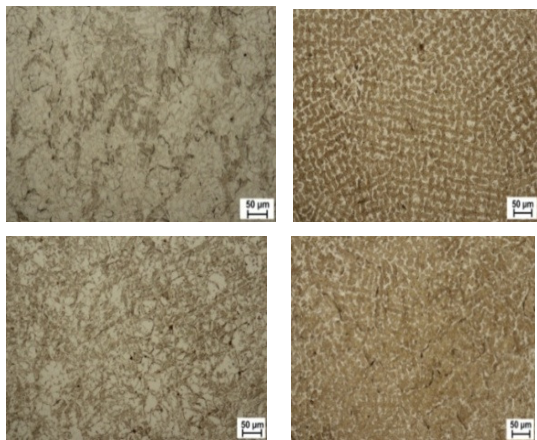
สำหรับบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 พบว่าประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์ โดยชั้นนี้แทบไม่พบการเจือจางจากชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูป ข4 และ ง4

##### 3.1.2 บริเวณผิวด้านบนบนชั้นพอกแข็ง

เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวด้านบนชั้นพอกแข็งพบว่า การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ประกอบด้วยกลุ่มก้อนของมาร์เทนไซต์ (Martensite Island) ในขณะที่การเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยออสเทนไนต์และมาร์เทนไซต์เพียงบางส่วนเท่านั้น อันเป็นผลมาจากการเจือจางจากชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 9

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นของทั้ง 2 วิธีการเชื่อมพบว่า การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติมีกลุ่มก้อนของมาร์เทนไซต์มากกว่าการเชื่อม

พอกแข็งแบบอัดโนมิตี ในขณะที่การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น พบว่าทั้ง 2 วิธีมีกลุ่มก้อนมาร์เทนไซต์ที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 9 โครงสร้างบริเวณผิวด้านบนชั้นพอกแข็ง

### 3.1.3 การวัดปริมาณมาร์เทนไซต์

เมื่อทำการวัดปริมาณมาร์เทนไซต์บริเวณชั้นพอกแข็งของทั้งในบริเวณพื้นที่ตามขวางและบริเวณผิวด้านบนชั้นพอกแข็งพบว่า การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นมีปริมาณมาร์เทนไซต์มากกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้นสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ส่งผลให้ปริมาณมาร์เทนไซต์ใน

ชั้นพอกแข็งลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการเชื่อมพบว่า การเชื่อมแบบกึ่งอัดโนมิตีมีปริมาณมาร์เทนไซต์สูงกว่าการเชื่อมแบบอัดโนมิตี ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณของเฟสมาร์เทนไซต์ของชั้นพอกแข็ง





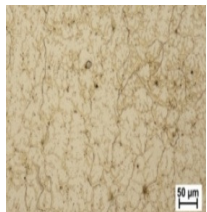



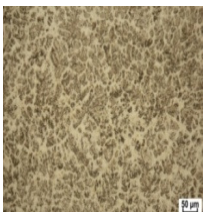

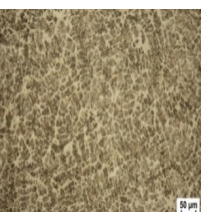
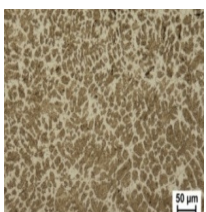
ชั้นงาน	ปริมาณมาร์เทนไซต์ (%)	
	Top Surface	Cross Section
1-S	41.37	42.06
3-S	54.25	49.47
1-A	38.45	41.01
3-A	52.01	48.21

### 3.2 ผลการทดสอบความแข็ง

รูปที่ 10 แสดงค่าความแข็งในแต่ละบริเวณของชั้นงานเชื่อมพอกแข็ง โดยบริเวณเนื้อโลหะเดิมมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 200 HV เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ สำหรับบริเวณกระทบร้อนพบว่ามีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 480 HV



ตารางที่ 6 โครงสร้างจุลภาค

ชั้นงาน	1-S	3-S	1-A	3-A
ชั้นรองพื้น	ก1 	ข1 	ค1 	ง1 
ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1	ก2 	ข2 	ค2 	ง2 
ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2		ข3 		ง3 
ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3		ข4 		ง4 



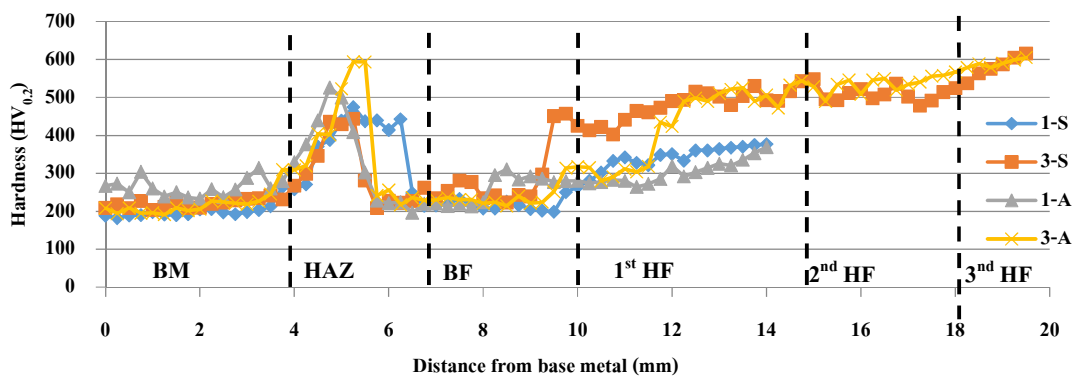
เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์จากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในระหว่างการเชื่อม สำหรับบริเวณชั้นรองพื้นพบว่ามีความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 230 HV เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนต์ที่มีเฟอร์ไรต์ตามขอบเกรน

สำหรับการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น พบว่าชั้นพอกแข็งของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (350 HV) มีความแข็งสูงกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติ (300 HV) เนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซต์มากกว่า

สำหรับการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างชั้นพอกแข็งพบว่า ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1

มีค่าความแข็งน้อยที่สุด (430 HV) อันเป็นผลมาจากการเจือจางจากชั้นรองพื้นสูง ในขณะที่ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 มีความแข็งสูงสุด (600 HV) เนื่องจากแทบไม่มีการเจือจางจากชั้นรองพื้น นอกจากนี้พบว่า การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (600 HV) มีความแข็งสูงกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติ (570 HV) เช่นเดียวกับการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซต์สูงกว่า

เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนชั้นพอกแข็งพบว่า การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นมีความแข็งสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้นสูงกว่า



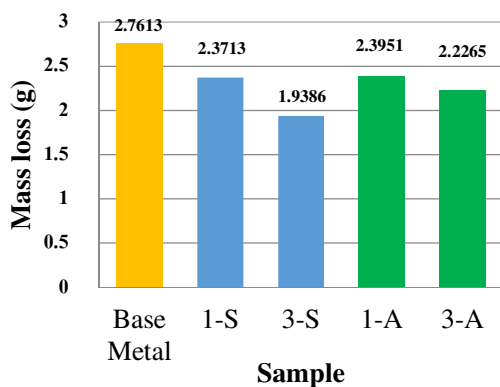
รูปที่ 10 ความแข็งของชิ้นงาน

### 3.3 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี

เมื่อทำการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีแสดงดังรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานซึ่งมีการเชื่อมพอกแข็งมีการสูญเสียเนื้อต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิม เนื่องจากบริเวณของชั้นพอกแข็งประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ในขณะที่บริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ดังนั้นการเชื่อมพอกแข็งมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่า

และพบว่า การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติมีการสูญเสียเนื้อเชื่อมพอกแข็งต่ำกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติ เนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซต์มากกว่า จึงสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนชั้นพอก

แข็งพบว่า การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นมีการสูญเสียเนื้อเชื่อมพอกแข็งต่ำกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นแทบไม่พบการเจือจางจากชั้นรองพื้น จึงส่งผลให้ยังคงมีปริมาณมาร์เทนไซต์หลงเหลืออยู่มาก ทำให้สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดี



รูปที่ 11 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิจัยการเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมด้วยวิธีการเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติในบริเวณชั้นพอกแข็งมีค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็ง

แบบอัตโนมัติ เนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซต์มากกว่า

2. การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นมีค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากแทบไม่พบการเจือจางจากชั้นรองพื้น
3. สำหรับงานวิจัยนี้สภาวะการเชื่อมพอกแข็งที่ดีที่สุดคือ การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีจำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ในการเอื้อเฟื้อ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำการทดลอง งานงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Syarul AM, Izatul AI, Amalina A, Abdul G. The effect of flux core arc welding processes on different parameters. *Procedia Engineering*. 2012;41:1497-1501.
- [2] John J., Holman F., Adolfo L. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacingdeposits. *TribologyInternational*.2009;42:745-49.
- [3] D.Katherasan, Jiju V., P. Sathiya, A. Noorul Haq. Flux Cored Arc Welding Parameter Optimization Using Particle Swarm Optimization Algorithm .*Procedia Engineering*.2012; 38:3913-26.
- [4] Agustin G., Hernan G., Estela S. Study of abrasive wear resistance of Fe-based nanostructured hardfacing. *Wear*.2016;360-361:14-20.
- [5] Shafiee A, Nili-Ahmadabadi M, Ghasemi HM, Hossein-Mirzaei E. Wear behavior of a Cr-Mo steel with different microstructures, in comparison with austempered ductile iron (ADI). *Int J Mater Form*.2009;2(1):237-41.
- [6] *Repair and Maintenance Welding Handbook*.second ed., ESAB.
- [7] Gualco A, Svoboda HG, Surian ES, De Vedia LA.Effect of welding procedure on wear behavior of modified martensitic tool steel hardfacing deposit .*Materials and Design*. 2010;31:4165-173
- [8] M.Adamiak, J. Gorka, T.kik.Comparison of abrasion resistance of selected constructional materials.*Materials and manufacturing engineering*.2009; vol.3

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายธีร โชติ ตรีเกรี	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5810120067	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2556

## ทุนการศึกษา

1. ทุนบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์
2. ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปิงบประมาณ 2559

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. Teerachod Treeparee, Prapas Muangjunburee. Hardfacing of 3.5% Chromium Cast Steel by Flux Cored Wire Arc Welding Process. Key Engineering Materials 2017; 751:73-78
2. ธีร โชติ ตรีเกรี, ประภาส เมืองจันทร์บุรี. การศึกษาพฤติกรรมการสึกกร่อนของชั้นเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมโดยการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2562; ปีที่ 26: เล่มที่ 2: เดือนพฤษภาคม-สิงหาคม