



รหัสโครงการ SUT7-717-58-12-45

## รายงานการวิจัย

กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งสำหรับอุปกรณ์งานดินการเกษตรเพื่อ  
เพิ่มอายุการใช้งาน

**Hardfacing Process for Agricultural Earth Moving for Usage Life  
Extension**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-717-58-12-45

## รายงานการวิจัย

กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งสำหรับอุปกรณ์งานดินการเกษตรเพื่อ  
เพิ่มอายุการใช้งาน

**Hardfacing Process for Agricultural Earth Moving for Usage Life**

**Extension**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร. จงกล ศรีธร

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผศ.ดร.อิสรทัต พึ่งอิน

นายคำพูน พรหมสุกะ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2559

### กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ดีจากความช่วยเหลือและความร่วมมือจาก คุณ ปนัดดา บุญธรรม คุณวโรบล เพ็ชรหมื่นไวย คุณปิยกมล สู้สุข และ นายคำพูน พรหมสุภาะ นักศึกษาปริญญาตรี และ นักศึกษาปริญญาโท ที่ช่วยเก็บข้อมูลและดำเนินการทดลองที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยนี้ การวิจัยครั้งนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2558

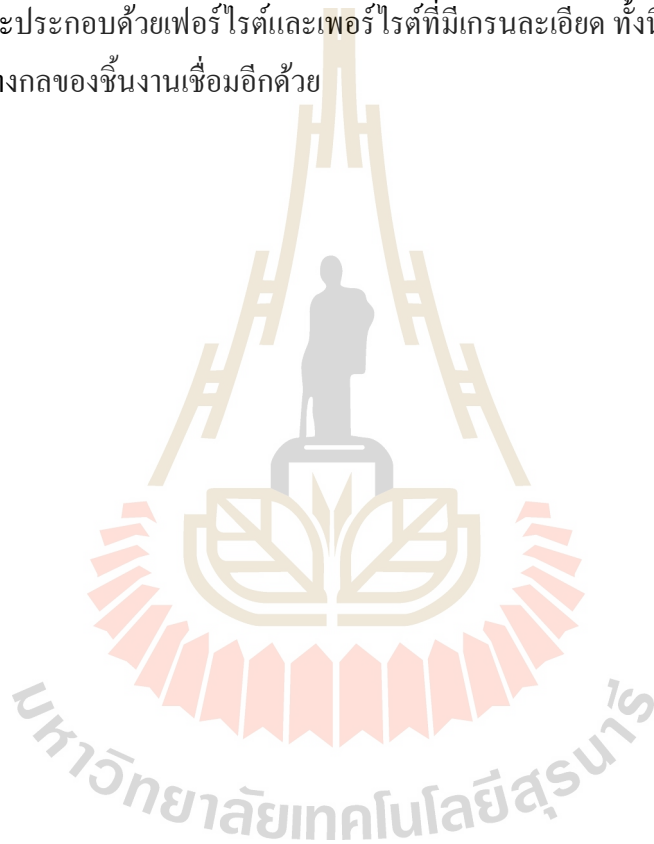
สุดท้ายนี้ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีผู้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน

คณะผู้วิจัย



## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเชื่อมพอกผิวแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยลวดเชื่อมทั้งสแตนเลสไร้ตะกั่วและสแตนเลสที่มีตะกั่ว โดยทำการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สบนเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และใช้ลวดเติมทั้งสแตนเลสไร้ตะกั่วในการพอกผิวแข็ง โดยจะทำการเชื่อมชิ้นงาน 1, 2 และ 3 ชั้น และทำการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน G65 ผลการวิจัยพบว่าในการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สอะเซทิลีน จะมีการกระจายตัวของเม็ดทั้งสแตนเลสไร้ตะกั่วอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวเชื่อม โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมจะประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ที่มีเกรนละเอียด ทั้งนี้จำนวนชั้นของการเชื่อมจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมอีกด้วย



## Abstract

The objective of this research is to study the effect of welding layer on mechanical properties of hard facing carbon steel with fused tungsten carbide. The hard facing welds was performed by oxyacetylene. Various experiments are carried out by that processes. Carburizing flame is used in oxyacetylene welding process. The result is exhibited the distribution of tungsten carbide in weld metal is even. For the welds microstructure of all layers are consisted of ferrite and pearlite with fine grain structure. In addition, the welding layers has an effect on the microstructure and mechanical properties of the welds.



# สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	5
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของกระบวนการเชื่อมโลหะ.....	7
2.2 หลักการของกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (OAW).....	8
2.3 ข้อมูลพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400.....	9
2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test).....	9
2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical Investigation).....	12
2.6 การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65.....	12
2.7 การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing).....	13

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8 ความร้อนในการเชื่อม (Heat Input).....	16
2.9 ความเจือจางของโลหะ (Dilution).....	17
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
<b>3 การศึกษาและวิธีการดำเนินการ.....</b>	<b>22</b>
3.1 แผนผังการดำเนินงานเชื่อมในงานวิจัย.....	23
3.2 เครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย.....	24
3.3 การกำหนดปัจจัยและออกแบบการทดลอง.....	30
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	31
<b>4 ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง.....</b>	<b>36</b>
4.1 การศึกษาโครงสร้างมหภาค.....	36
4.2 ผลทดลองการวัดขนาดของทั้งสแตนคาร์ไบด์.....	38
4.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	41
4.4 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing).....	46
4.5 ผลทดสอบการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ Abrasive Resistance ตามมาตรฐาน ASTM G65.....	51
<b>5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>56</b>
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58
บรรณานุกรม .....	59
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมวัสดุ SS400 และตารางการทดลอง.....	63
ภาคผนวก ข. ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW.....	80
ภาคผนวก ค. ใบผลการทดสอบของกล้องจุลทรรศน์.....	88
ประวัตินักวิจัย .....	108

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานวิจัย..... 4
2.1	คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า SS400..... 9
2.2	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400..... 9
2.3	ค่าความแข็งโดยประมาณของเกรนเหล็กกล้า..... 11
3.1	ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม OAW..... 31
4.1	ค่าความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น..... 46
4.2	ค่าความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น..... 47
4.3	ข้อมูลความแข็งแบบ Rockwell Hardness ของการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น..... 49
4.4	ข้อมูลความแข็งแบบ Rockwell Hardness ของการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น..... 50
4.5	ข้อมูลทดสอบการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ Abrasive Resistance ตามมาตรฐาน ASTM G65 ของกระบวนการเชื่อม OAW..... 52
ก.1	การบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 1, 2, 3 ของชั้นที่ 1..... 69
ก.2	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 4 ของชั้นที่ 1, 2..... 71
ก.3	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 5 ของชั้นที่ 1, 2..... 72
ก.4	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 6 ของชั้นที่ 1, 2..... 73
ก.5	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 7 ของชั้นที่ 1, 2, 3..... 74
ก.6	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 8 ของชั้นที่ 1, 2, 3..... 76
ก.7	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 9 ของชั้นที่ 1, 2, 3..... 78



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แสดงการกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส.....	10
2.2	แสดงตัวอย่างเครื่องทดสอบการสึกหรอ ASTM G65.....	13
2.3	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 1.....	14
2.4	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 2.....	14
2.5	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 3.....	15
2.6	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 4.....	15
2.7	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 5.....	16
2.8	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 6.....	16
2.9	แสดงความเจือจางของโลหะ (Dilution).....	18
3.1	แผนผังการดำเนินงานเชื่อมในงานวิจัย.....	23
3.2	ชุดอุปกรณ์กระบวนการเชื่อมด้วยแก๊สอะเซทิลีน.....	24
3.3	เครื่องตัด Wire Cut.....	25
3.4	เครื่องทดสอบการสึกหรอ.....	25
3.5	เครื่องอัดเรซิน.....	26
3.6	เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน.....	26
3.7	เครื่องขัดผงอะลูมินา (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	27
3.8	กล้องจุลทรรศน์.....	27
3.9	เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400.....	28
3.10	ลวดเชื่อมทั้งสแตนคาร์ไบด์.....	28
3.11	ชุดน้ำยาสารแทรกซึม.....	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Vicker Hardness Test).....	29
3.13 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test).....	30
3.14 ชิ้นงานในการทดสอบ.....	31
3.15 ชิ้นงานเชื่อมOAWจำนวน 1 ชั้น.....	32
3.16 ชิ้นงานเชื่อมOAWจำนวน 2 ชั้น.....	32
3.17 ชิ้นงานเชื่อมOAWจำนวน 3 ชั้น.....	32
3.18 ชิ้นงานเชื่อม OAW ที่ผ่านการตัดสำหรับทดสอบการสึกหรอ.....	33
3.19 ขนาดและตำแหน่งในการตัดชิ้นงานของการเชื่อม OAW.....	34
3.20 ชิ้นงานอัดเรซินสำหรับทดสอบ โครงสร้างจุลภาคและความแข็ง.....	34
3.21 ตัวอย่างตำแหน่งและชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบMicro Vickers Hardness.....	35
3.22 ตัวอย่างตำแหน่งและชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Test.....	35
4.1 การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น.....	36
4.2 ลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น.....	37
4.3 การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมOAW จำนวน 2 ชั้น.....	37
4.4 ลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น.....	37
4.5 การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อม 3 ชั้น.....	38
4.6 ขนาดเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์กระบวนการเชื่อม OAW.....	39
4.7 กราฟแสดงจำนวนเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของกระบวนการ เชื่อม OAW จำนวน1 ชั้น, 2 ชั้น, 3 ชั้น.....	40
4.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของ กระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น, 2 ชั้น, 3 ชั้น.....	40
4.9 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่ผ่าน กระบวนการเชื่อม OAWจำนวน 2 ชั้น.....	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่ผ่าน กระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น.....	42
4.11 โครงสร้างบริเวณ Weld Metal, Fusion Zone, HAZ, และ Base Zone ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น.....	43
4.12 โครงสร้างบริเวณ Weld Metal, Fusion Zone, HAZ, และ Base Zone ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW 3 ชั้น.....	43
4.13 โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ของกระบวนการเชื่อม OAW 2ชั้น.....	44
4.14 โครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการ เชื่อมแบบ OAW ของแนวเชื่อม 2 ชั้น.....	45
4.15 โครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAWของแนวเชื่อม 3 ชั้น.....	45
4.16 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของกระบวนการเชื่อม 2 ชั้น ของกระบวนการเชื่อม OAW.....	48
4.17 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของกระบวนการเชื่อม 3 ชั้น ของกระบวนการเชื่อม OAW.....	48
4.18 กราฟเปรียบเทียบความแข็งระหว่างกระบวนการเชื่อม OAW แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น,3 ชั้น.....	49
4.19 กราฟเปรียบเทียบความแข็งระหว่างกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น.....	50
4.20 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น.....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 กราฟแสดงเวลาและน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง จำนวนที่ 1, 2 และ 3 ชั้นของกระบวนการเชื่อม OAW.....	52
4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลาของกระบวนการ เชื่อม OAW ของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น.....	53
4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลาของ กระบวนการเชื่อม OAW ของชิ้นงาน 2 ชั้น.....	54
4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราน้ำหนักที่หายไปกับเวลาของ กระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น.....	54
ก.1 ตารางผลการวิเคราะห์ส่วนผสมของวัสดุ SS400.....	64
ข.1 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 1.....	81
ข.2 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2.....	81
ข.3 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 3.....	82
ข.4 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 1.....	82
ข.5 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 2.....	83
ข.6 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3.....	83
ข.7 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 1.....	84
ข.8 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 2.....	84
ข.9 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 3.....	85
ข.10 แสดงชิ้นงานทดสอบ PT ของการเชื่อม OAW.....	86
ข.11 แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Penetrant ของการเชื่อม OAW.....	86
ข.12 แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Developer ของการเชื่อม OAW.....	87

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานเกษตรกรรมนับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในประเทศ เพราะคนไทยส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ซึ่งนับว่าเป็นภาคการผลิตที่มีบทบาทสำคัญต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ เพราะนอกจากจะสร้างรายได้ให้กับครัวเรือนและธุรกิจทุกภาคส่วนในระบบห่วงโซ่ของสินค้าเกษตรแล้ว ยังสร้างรายได้ให้กับประเทศอีกด้วย [1] นอกจากนี้จะเป็นแหล่งรายได้หลักของคนส่วนใหญ่ของประเทศแล้ว ยังเป็นฐานในการสร้างมูลค่าเพิ่มของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งปัจจุบันสถานการณ์มีการเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลกระทบต่อภาคเกษตรกรรมที่มากขึ้น กรมการส่งเสริมการเกษตรในแผนปี 2556 ถึง 2559 ได้มีการมุ่งเน้นในเรื่องของการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุนให้ได้มากที่สุด [2] ในส่วนของการซ่อมบำรุงอุปกรณ์การเกษตรถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ช่วยลดต้นทุนในการสั่งซื้ออุปกรณ์ต่างๆ ได้ ซึ่งอุปกรณ์เครื่องมือในการเกษตรที่ใช้กับงานดิน เช่น ไถคราด รวมทั้งอุปกรณ์ในการขุดเจาะที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น เมื่อมีการใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่ง อุปกรณ์ดังกล่าวย่อมเกิดการสึกหรอหรือเสียหายขึ้น การซ่อมบำรุงบริเวณที่เกิดการเสียหายดังกล่าวจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ซึ่งในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์เกี่ยวกับงานดิน จะต้องให้ความสำคัญในเรื่องของผิวชิ้นงานที่จะต้องมีความแข็งแรงทนต่อการเสียดสีที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการที่สามารถทำให้วัสดุเกิดความแข็งแรงที่ผิวชิ้นงานได้หลายวิธีได้แก่ กระบวนการชุบผิวแข็ง (Case Hardening) หรือกระบวนการอบชุบเหล็กด้วยความร้อน (Head Treatment) อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวเป็นการทำงานที่ใช้เวลาและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง รวมทั้งจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ในการอบชิ้นงาน ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวอาจหาได้ยากสำหรับเกษตรกรทั่วไป นอกจากนี้วัสดุที่นำมาใช้จำเป็นจะต้องตอบสนองต่อความต้องการของกระบวนการชุบผิวแข็งด้วย ส่งผลต่อราคาวัสดุที่มีราคาแพงยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงอาจมีความเป็นไปได้ยากที่เกษตรกรทั่วไปจะใช้กระบวนการชุบผิวแข็งในการช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอของอุปกรณ์ดังกล่าว อีกกระบวนการหนึ่งคือ กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการเชื่อมซ่อมผิวหน้าของชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอ ซึ่งปัจจัยในการเชื่อมพอกผิวแข็งเช่น ชนิดของลวดเชื่อมชนิดของวัสดุที่นำมาทำการเชื่อม เป็นต้น [3] การเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) ไม่เพียงแต่จะนำไปใช้ในการเกษตรเพียงเท่านั้น มีงานวิจัยที่ทำการศึกษารายละเอียดของเครื่องจักรในการบดย่อยเศษไม้ แกลบ และชานอ้อย เป็นต้น เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการใช้

ชีวมวล เศษดินจากการย่อยไม้ส่งผลทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรเกิดการสึกหรอ ดังนั้นการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) ต้องพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุ และความเหมาะสมของกระบวนการเชื่อมพอกผิว เพราะสามารถที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่ใช้กับงานดินได้ยาวนานขึ้น [4] การเชื่อมพอกผิวแข็งนั้นจะต้องศึกษาส่วนประกอบของโลหะพื้น หน้าที่ของชิ้นส่วน ซึ่งชิ้นงานที่พอกผิวแข็งจะต้องดูลักษณะของงาน ขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน และที่สำคัญคือต้นทุนของการทดแทนชิ้นส่วน เป็นต้น [5] ในการเชื่อมพอกผิวแข็งสามารถใช้เทคนิคในการเชื่อมได้หลายเทคนิค เช่น กระบวนการเชื่อม ออกซิเจนอะซิไทลีน (Oxy Acetylene Gas Welding : OAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (Tungsten Inert Gas : TIG) กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยลวดเชื่อมสารพอกหุ้ม (Shield Metal Arc Welding : SMAW) และกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW) ในการเลือกใช้วิธีการเชื่อมที่มีความแตกต่างกันจะให้ประสิทธิภาพในการเชื่อม (Welding Efficiency) อัตราการซึมลึก (Dilution Ratio) และรวมถึงต้นทุนในการเชื่อม (Welding Cost) ที่แตกต่างกันจึงต้องมีการเลือกใช้วิธีการเชื่อมให้เหมาะสมกับลักษณะงาน [6]

เพื่อเป็นการเสนอทางเลือกที่สะดวกยิ่งขึ้น ด้วยระยะเวลาการทำงานที่สั้นลง กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เป็นไปได้ ทั้งนี้วัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างพื้น (Structural Substrate) ไม่จำเป็นจะต้องเป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อการชุบผิวแข็ง ทำให้ราคาต่ำกว่า นอกจากนี้ กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งยังเป็นกระบวนการที่สามารถดำเนินการได้ทันที ไม่จำเป็นจะต้องทำการชุบหรืออบโลหะเป็นเวลานาน ถึงแม้ราคาลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing Electrode / Filler Metal) จะสูง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายโดยรวมจะต่ำกว่า

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอทางเลือกในการเชื่อมซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่เกิดการสึกหรอ ในงานดิน ด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) วัสดุที่ใช้ในการเติมพอกผิวแข็งเป็นกลุ่มของทังสเตนคาร์ไบด์ (Fused Tungsten Carbide) ใช้กระบวนการเชื่อม เชื่อมแก๊สออกซิเจนอะซิไทลีน (Oxy Acetylene gas : OAW) ทำการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ทดสอบแบบ Dry Sand/Rubber Wheel (DSRW) [7] การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure Analysis)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรในการเชื่อมและจำนวนชั้นของแนวเชื่อมที่ทำให้เกิดการสึกหรอต่ำ

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ได้จากกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (Oxy Acetylene Gas Welding Process)

## 1.3 ขอบเขตในงานวิจัย

1.3.1 วัสดุพื้น ที่ใช้เป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400

1.3.2 กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองคือ กระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (Oxy Acetylene Gas Welding Process)

1.3.3 วัสดุที่ใช้ทำการพอกผิวแข็งเป็นลวดเชื่อมแบบเติมประเภททังสเตนคาร์ไบด์ (Fused Tungsten Carbide :Fused WC)

1.3.4 ในการเชื่อมพอกผิวแข็งจะใช้ช่างเชื่อมที่ได้ผ่านการทดสอบมาตรฐานฝีมือแห่งชาติ สาขาอาชีพช่างเชื่อมอาร์คโลหะด้วยมือระดับ 1

## 1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

### 1.4.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาข้อมูลและแนวทางในการวิจัย
- 2) ออกแบบการทดลองและจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง
- 3) ทำการเชื่อมงานที่ได้ออกแบบ
- 4) ทดสอบคุณสมบัติทางกลและทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

ทดสอบแบบ Dry Sand/Rubber Wheel

5) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติทางกล และการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ของชิ้นงานทดสอบ

- 6) เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง
- 7) สรุปผลการทดลองและส่งรายงานวิจัย

### 1.4.2 สถานที่ทำการวิจัย

1) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2) ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี

3) ศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา อาคารเรียนรวม 1 ห้อง CB 1203 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย (ม.ค.57 – มิ.ย.58) ระยะเวลา 1 ปี 6 เดือน

ขั้นตอนการทำงาน	เดือน																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1) ศึกษาข้อมูลและแนวทางในการวิจัย	←————→																			
2) ออกแบบการทดลองและจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง				←————→																
3) ทำการเชื่อมตามที่ได้ออกแบบ							←————→													
4) ทดสอบคุณสมบัติทางกลและทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65											←————→									
5) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติทางกล และการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ของชิ้นงานทดสอบ														←————→						
6) เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง															←————→					
7) สรุปผลการทดลองและส่งรายงานวิจัย																		←————→		



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้ในการเชื่อมพอกผิวแข็งสำหรับการเชื่อมซ่อมบำรุงที่ใช้กับอุปกรณ์งานดิน
- 1.5.2 เพื่อเป็นแนวทางในการเชื่อมพอกผิวแข็งสำหรับการใช้งานภาคเกษตรและที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.3 เพื่อสร้างทางเลือกให้ธุรกิจและอุตสาหกรรมในการที่จะนำไปใช้กับงานซ่อมบำรุง



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยใช้ลวดเติมชนิดทั้งสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งกระบวนการเชื่อมที่จะทำการศึกษาคือ กระบวนการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีน (Oxy Acetylene Welding : OAW) รวมทั้งค้นคว้าหาข้อมูลและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยเพื่อเป็นแนวทาง ในการที่จะนำมาประกอบการศึกษาจนบรรลุเป้าหมายตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งมีหัวข้อดังนี้

- 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของกระบวนการเชื่อมโลหะ
- 2.2 หลักการของกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน (Oxyacetylene Welding: OAW)
- 2.3 ข้อมูลพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400
- 2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)
- 2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Metallography Examination)
- 2.6 การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65
- 2.7 การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing)
- 2.8 ความร้อนในการเชื่อม (Heat Input)
- 2.9 ความเจือจางของโลหะ (Dilution)
- 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของกระบวนการเชื่อมโลหะ

เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการผสาน โลหะให้ติดกันและเป็นเนื้อเดียวกัน ขณะทำการเชื่อมจะเกิดบ่อหลอมละลายและทำการเติมเนื้อโลหะเพิ่มลงไป ในบ่อหลอม เมื่อเกิดการเย็นตัวจะทำให้โลหะเกิดความแข็งแรง มีพลังงานที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมโลหะ เช่น พลังงานจากแก๊ส พลังงานจากกระแสไฟฟ้า พลังงานจากลำแสงเลเซอร์ พลังงานจากการใช้อิเล็กตรอนบีม พลังงานจากการเสียดสี เป็นต้น ในช่วงศตวรรษที่ 20 กระบวนการเชื่อมมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เพื่อเป็นการทดแทนการต่อโลหะด้วยการใช้หมุดย้ำ [8] ปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการเชื่อมให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น การนำไปใช้ในกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง ซึ่งในงานวิจัยเล่มนี้จะใช้กระบวนการเชื่อมแก๊ส ในการทดลอง

### 2.1.1 การเชื่อมพอกผิวโลหะ [9]

การพอกผิวโลหะเป็นวิธีที่ใช้วัสดุชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันเคลือบบนผิวชิ้นงานที่ต้องการ เช่น การเคลือบผิวโลหะ โลหะผสม เซรามิก พลาสติก การเคลือบผิวโลหะ อาจจะเป็นลักษณะผิวงานที่ไม่ได้หลอมละลายรวมกับโลหะพื้นที้นำไปเคลือบ เช่น การชุบสังกะสี การชุบเงิน และการชุบดีบุก โลหะผสมมักจะถูกนำมาเคลือบกับชิ้นงานด้วยกรรมวิธีการพอกผิวแข็ง นั้นเป็นวิธีที่ทำให้โลหะที่นำมาพอกนั้นหลอมละลายติดกับผิวของโลหะชิ้นงาน เมื่อได้ทำการพอกผิวและได้ความแข็ง กรรมวิธีนี้เรียกว่า การพอกผิวแข็ง (Hardsurfacing)

### 2.1.2 หลักการเชื่อมพอกผิวโลหะ

เป็นการทำให้เกิดชั้นโลหะผสมกันอย่างถูกต้องบนผิวโลหะชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานนั้นคงทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี ทนต่อการสึกหรอจากการเสียดสีซึ่งอาจเกิดจากโลหะด้วยกัน หรือโลหะชิ้นงานกับวัสดุอื่น ตลอดจนทนต่อการแตกร้าวหรือแตกหักของเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสม ส่วนมากสามารถพอกผิวแข็งได้ เว้นแต่จะเป็นกลุ่มของเหล็กกล้าวานาเดียม และเหล็กไฮสปีด ซึ่งในการเชื่อมพอกผิวแข็งสามารถเชื่อมได้หลายวิธี เช่น กระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน (Oxyacetylene Welding : OAW) กระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas : TIG) กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้ม (Shielded Metal Arc Welding : SMAW) การพ่นผงโลหะ (Metal Spraying) ระบบพลาสมา (Plasma Arc Welding) Atomic Hydrogen Arc Welding

## 2.2 หลักการของกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (Oxy acetylene Welding)

การเชื่อมแก๊ส หมายถึง เป็นกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายชนิดหนึ่งโดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง และออกซิเจน ทำให้โลหะหลอมละลายติดกัน ในการหลอมละลายติดกันของโลหะนั้น จะเติมโลหะหรือให้โลหะหลอมละลายติดกันเองได้ แก๊สที่ใช้ในการเชื่อมประกอบด้วยออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และแก๊สอะเซทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) หรือบางครั้งเรียกการเชื่อมนี้ว่า ออกซิ-อะเซทิลีน (Oxyacetylene Welding : OAW) แก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ในกระบวนการเชื่อมแก๊สนั้นมีหลายชนิด เช่น แก๊สอะเซทิลีน แก๊สโพรเพน แก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น แก๊สอะเซทิลีนมีการนิยมนำมาใช้มาก เพราะแก๊สอะเซทิลีนจะให้ปริมาณความร้อนที่สูงถึง 3,480 องศาเซลเซียส และลวดเชื่อมที่ใช้เดิมมีความยาว 90 มิลลิเมตร และมีความโต 1.6-9.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะงานที่จะทำการเชื่อม ในการผสมระหว่าง ออกซิเจนกับอะเซทิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ จะได้ชนิดของเปลวไฟเชื่อมแก๊สซึ่งมีอยู่ 3 ชนิด และแต่ละชนิดนี้จะให้ความร้อนที่แตกต่างกันดังนี้

### 2.2.1 เปลวคาร์บูไรซิง (Carburizing Flame)

เป็นเปลวไฟที่มีส่วนผสมของแก๊สอะเซทิลีนมากกว่าแก๊สออกซิเจน การเผาไหม้จะมีแก๊สอะเซทิลีนเหลืออยู่จำนวนหนึ่ง เหมาะสำหรับการเชื่อมชิ้นงานที่ต้องการเติมคาร์บอนที่ผิวชิ้นงานหรือเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ซึ่งต้องการใช้อุณหภูมิหลอมละลายไม่สูงนัก เชื่อมอะลูมิเนียม แมกนีเซียม และใช้ในการเล่นประดาน มีอุณหภูมิสูงประมาณ 2,800 องศาเซลเซียส เปลวไฟจะมีอยู่ 3 ชั้น

### 2.2.2 เปลวกลาง (Neutral Flame)

เป็นเปลวไฟที่มีส่วนผสมของแก๊สอะเซทิลีนกับแก๊สออกซิเจนในอัตราส่วนเท่ากัน เปลวไฟชั้นในเป็นรูปกรวยปลายมน ให้ความร้อนสูงประมาณ 3,500 องศาเซลเซียส เหมาะกับการนำมาใช้เชื่อมเหล็กเหนียว เหล็กหล่อและตัดโลหะ

### 2.2.3 เปลวออกซิไดซิง (Oxidizing Flame)

เป็นเปลวไฟที่มีส่วนผสมของแก๊สอะเซทิลีนน้อยกว่าแก๊สออกซิเจน เปลวไฟชั้นในจะเป็นรูปกรวยปลายแหลมและสั้น ถ้าใช้เชื่อมเหล็กจะเกิดประกายไฟหรือสะเก็ดไฟกระเด็น ออกซิเจนจะทำให้ น้ำโลหะเป็นฟอง ไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการเชื่อมเหล็ก เพราะจากการเผาไหม้จะมีออกซิเจนเหลืออยู่และเข้าไปรวมตัวในน้ำเหล็กที่หลอมละลาย ทำให้แนวเชื่อมเปราะ ความแข็งแรงต่ำ จึงนิยมใช้เฉพาะเชื่อมทองเหลืองและบรอนซ์

### 2.3 ข้อมูลพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400

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

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า SS400 [10]

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

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

Material	C	Si	Mn	P	S	Al	Ca	Cr	Mo	Ni
SS400	0.152	0.343	0.788	0.028	0.009	0.049	-	0.032	0.002	0.0152

### 2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)

เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญในด้านวิศวกรรม ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับความแข็งแรงของวัสดุ สามารถกำหนดขนาดของชิ้นงานให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing) ในการทดสอบคุณสมบัติทางกลในแต่ละคุณสมบัติส่วนมีวิธีในการทดสอบที่แตกต่างกัน เช่น ต้องการทราบคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง

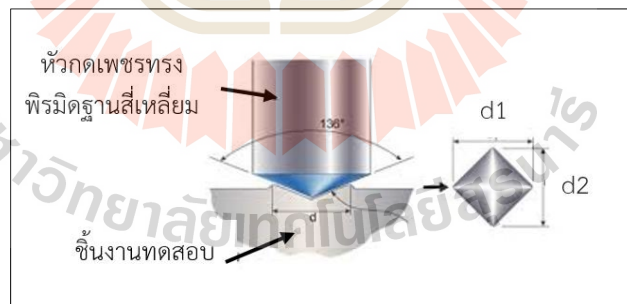
(Tensile.Strength) ควรใช้วิธีการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) เป็นต้น

#### 2.4.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

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

##### 1) การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)

การทดสอบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) จะใช้หลักการเดียวกับการทดสอบแบบบริเนลล์ เปลี่ยนจากหัวกดลูกบอลชุบแข็งเป็นหัวกดที่ทำด้วยเพชรเจียรไนเป็นทรงพिरามิดทำมุม 136 องศา กดด้วยแรง  $F$  ตั้งฉากกับชิ้นงานทดสอบ รอยกดที่ได้จะนำไปวัดเส้นทแยงมุม  $d$  ทั้งสองด้าน ซึ่งความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมจะนำไปคำนวณหาค่าความแข็งของชิ้นงาน



รูปที่ 2.1 แสดงการกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส [11]

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.1)$$

$$HV = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ผิวรอยกด}} \quad (2.2)$$

$$HV = \frac{0.102F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2} \quad (2.3)$$

$$HV = \frac{0.189F}{d^2} \quad (2.4)$$

โดย F คือ แรงที่ทำการกดขึ้นงาน (N)

D คือ เส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm.)

ตารางที่ 2.3 ค่าความแข็งโดยประมาณของเกรนเหล็กกล้า

ชนิดของเกรน	ความแข็งโดยประมาณ (HV)
เฟอร์ไรต์ (Ferrite)	80
ออสเตไนต์ (Austenite)	250
เพอร์ไลต์, กลม (Pearlite, granular)	200
เพอร์ไลต์, แฉก (Pearlite, lamellar)	300
ซอร์ไบต์ (Sorbite)	350
ทรูสไตต์ (Troostite)	400
ซีเมนไตต์ (Cementite)	600 - 650
มาร์เทนไซต์ (Martensite)	400 - 900

## 2) การทดสอบแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก สามารถที่จะใช้หัดทดสอบได้ทั้งหัวเพชรและหัวบอล ซึ่งมีลักษณะการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น หัวกดที่เป็นหัวลูกบอลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว ควรใช้น้ำหนักในการกดได้ไม่เกิน 100 kg. ใช้กดโลหะประเภท โลหะผสมทองแดง เหล็กกล้า โลหะผสมของอะลูมิเนียม และเหล็กหล่ออบเหนียว เป็นต้น ส่วนหัวกดที่เป็นหัวเพชร ที่น้ำหนัก 150 kg จะใช้กดเหล็กกล้า เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง และวัสดุที่มีความแข็งกว่า 100 HRB มีเงื่อนไขในการทดสอบคือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดจะต้องไม่มากกว่าหรือเท่ากับ 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด และระยะห่างจุดศูนย์กลางของรอยกดต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด [12]

## 2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallogical Investigation)[13]

### 2.5.1 การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา

#### 1) การตรวจสอบในระดับโครงสร้างมหภาค (Macro-scopic examination)

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานโดยใช้กำลังขยายต่ำ เมื่อมีการเตรียมงานโดยการขัดหยาบ ขัดละเอียด ขัดเงา และกัดกรด แล้วสามารถตรวจสอบได้โดยตาเปล่า หรืออาจใช้กำลังขยายได้ไม่เกิน 10 เท่า

#### 2) การตรวจสอบในระดับโครงสร้างจุลภาค (Micro-Scopic Examination)

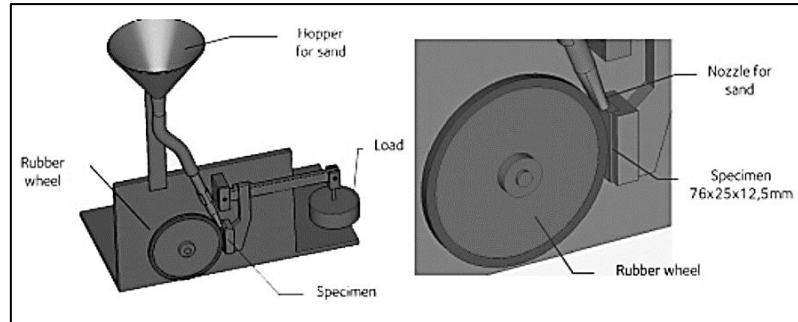
การวิเคราะห์นี้จะทำได้กับชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขัดละเอียด ขัดมันและกัดกรดมาแล้ว เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานโลหะที่ต้องใช้กำลังขยายสูงตั้งแต่ 10 เท่าขึ้นไป สิ่งสำคัญในการวิเคราะห์โครงสร้างคือ การตรวจสอบและศึกษาจำนวนของเฟสหรือเกรน สัดส่วนของเกรนในแต่ละชนิดของโลหะ รวมทั้งขนาด รูปร่าง และการกระจายของเกรน ซึ่งวัสดุเดียวกันอาจจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันได้ ขึ้นอยู่กับที่มาของวัสดุนั้นด้วย ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคนั้นจะต้องมีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ นับว่าเป็นสิ่งสำคัญมาก ซึ่งมีอยู่หลายวิธี และควรเลือกวิธีให้เหมาะสมกับวัสดุและโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์

## 2.6 การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

เป็นกรรมวิธีการทดสอบที่ครอบคลุมขั้นตอนในห้องปฏิบัติการ โดยมีการกำหนดค่าความต้านทานของรอยขีดข่วนของวัสดุ โดยวิธีการทดสอบด้วยทรายแห้งและล้อยาง กรรมวิธีการทดสอบนี้ เป็นการกระทำซ้ำๆ ของวัสดุ ผลจากการทดสอบการสึกหรอจะบันทึกเป็นปริมาณการสูญเสียเป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร ซึ่งกระบวนการทดสอบจะระบุวัสดุที่มีความต้านทานสูงกว่า จะมีปริมาณการสูญเสียที่ต่ำกว่า การใช้ทรายแห้งและล้อยางในการทดสอบรอยขีดข่วน มีความเกี่ยวข้องกับมาตรฐานในการทดสอบรอยขีดข่วนของชิ้นงานทดสอบ กับการควบคุมขนาดของเม็ดทราย และส่วนประกอบของรอยขีดข่วนนี้เป็นการแนะนำระหว่าง ชิ้นงานในการทดสอบ และการหมุนของยาง เป็นการทำให้เกิดแรงกดลง พร้อมกับการหมุนของล้อที่มีการระบุแรง โดยวิธีที่มีแกนคันโยก ซึ่งมีการควบคุมกรไพลของทราย [14] การสูญเสียน้ำหนักเป็น การวัดสำหรับการกำหนดหลักเกณฑ์เวลาการแสดงผลสรุปการสูญเสีย สามารถคำนวณได้ดังนี้ [15]

$$Volumeloss(mm^3) = \frac{massloss(g)}{density(g/cm^3)} \times 1000 \quad (2.5)$$





รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างเครื่องทดสอบการสึกหรอ ASTM G65 [15]

## 2.7 การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing : NDT)

เป็นการตรวจสอบหาจุดบกพร่องต่างๆ ที่อาจเกิดจากการใช้งาน ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานปัจจุบันการทดสอบแบบไม่ทำลายได้ถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายในเรื่องของความปลอดภัย และด้านการประกันคุณภาพ[16]

### 2.7.1 การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection : VT)

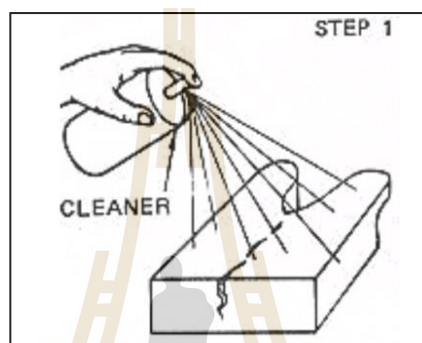
การตรวจสอบด้วยสายตา จัดว่าเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing) เป็นวิธีการตรวจสอบที่จำเป็นและนิยมใช้กันมาก เพราะไม่ยุ่งยากในการปฏิบัติและไม่จำเป็นต้องมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ยุ่งยากมาก แต่ผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องมีความรู้ในทั้งด้านทฤษฎีและปฏิบัติเกี่ยวกับการผลิต ซึ่งสิ่งบกพร่องที่สามารถตรวจสอบได้นั้น จะต้องเป็นสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นที่ผิวนอกของชิ้นงานได้แก่ รูพรุนหรือการเกิดตามด การเกิดสะเก็ดโลหะที่เกิดจากกระบวนการเชื่อม เช่น สแลคฝังบนผิวเนื้อเชื่อม รอยกัดลึกด้านข้าง (Under Cut) การบิดงอ การแตกร้าวของชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือในการที่จะช่วยในการตรวจสอบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้แก่ แวนขยาย ไฟฉาย ไม้บรรทัด ตลับเมตร เกจวัดวงงานเชื่อม และเกจวัดมุม เป็นต้น

### 2.7.2 การตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึม (Penetrant Testing : PT)

การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะใช้หลักการดูดซับของเหลวโดยที่ของเหลวมีความสามารถดูดซึมเข้าไปในช่องว่างเล็กๆได้ การตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึม สามารถที่จะตรวจหาสิ่งบกพร่องที่ผิวบนของชิ้นงานโดยที่ชิ้นงานจะทำมาจากวัสดุสิ่งใดๆ ก็ได้ ที่ไม่มีลักษณะเป็นรูพรุน (Nonporous Material) สิ่งที่เป็นที่บกพร่องที่ผิว ได้แก่ รอยแตกร้าวที่ผิวและรูพรุน เป็นต้น การตรวจสอบด้วยวิธีนี้สามารถใช้ได้ผลดีกับชิ้นงานที่เป็นโลหะ เช่น อลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดง เหล็กหล่อ เหล็กกล้าทั่วไป เหล็กกล้าไร้สนิม และไททานเนียม เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถ

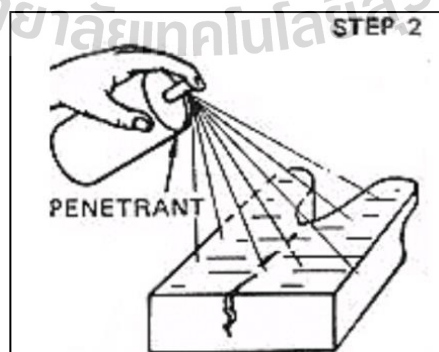
ใช้ตรวจสอบวัสดุอื่นๆ เช่น เซรามิก พลาสติก ยาง และแก้ว เป็นต้น วิธีการตรวจสอบด้วยของเหลวแทรกซึมมีอยู่ 6 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 หลังทำความสะอาดจัดคราบสีออกไซด์ ไขมันออกจากผิวหน้างาน บริเวณที่จะทำการตรวจสอบโดยการขัดด้วยวิธีใช้แปรงลวด และวิธีใช้เคมี เช่น ใช้ผงซักฟอก สารละลายต่างรื้อน ออกจากผิวหน้างานบริเวณที่จะทำการตรวจสอบ แล้วจึงพ่นสเปรย์กระป๋อง น้ำยาทำความสะอาด (Remover) ที่ผิวหน้างานที่จะทำการตรวจสอบ ทิ้งไว้ 2-3 นาทีจากนั้นใช้ผ้าสะอาดที่ไม่เป็นขุยเช็ดหรือทำให้แห้ง



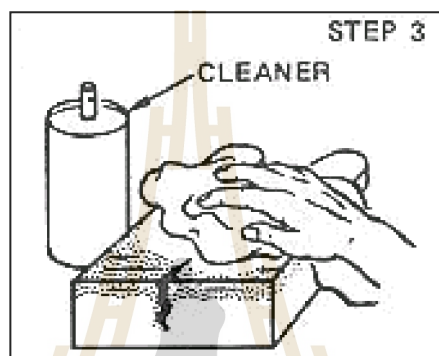
รูปที่ 2.3 แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 1 [17]

ขั้นตอนที่ 2 พ่นเคลือบน้ำยาแทรกซึม (Penetrant) ลงบนผิวงานบริเวณที่จะทำการตรวจสอบ ทิ้งระยะเวลา (Dwell Time) 5-10 นาที หรือตามคำแนะนำของผู้ผลิต ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เพื่อให้ น้ำยาแทรกซึม มีเวลาแทรกตัวเข้าไปในร่องเปิดของจุดบกพร่องจนทั่ว การใช้ Dwell Time ที่นานเกินไปไม่ส่งผลเสียใดๆ ยกเว้นนานจนกระทั่งน้ำยาแทรกซึมแข็งตัวก่อน



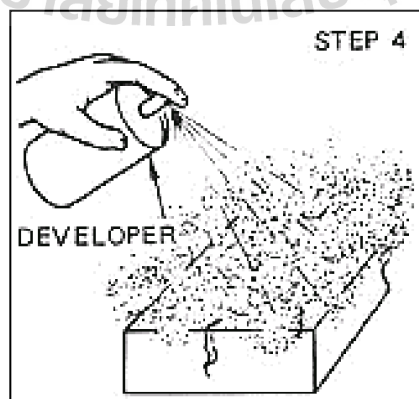
รูปที่ 2.4 แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 2 [17]

ขั้นตอนที่ 3 กำจัดน้ำยาแทรกซึมส่วนเกินออกจากผิวหน้าของงานด้วยการเช็ดด้วยผ้าสะอาดเพราะการฉีดพ่นด้วยกระป๋องน้ำยา Remover โดยตรงอาจไปชะล้างน้ำยาตรวจแทรกซึมออกจากจุดบกพร่องได้ ถือเป็นขั้นตอนที่ยุงยากเพราะอาจไปทำให้น้ำยาแทรกซึมที่ไหลเข้าไปในช่องเปิดของจุดบกพร่อง ถูกเช็ดหายไปวิธีการกำจัดน้ำยาแทรกซึมส่วนเกินออก ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาแทรกซึม เช่นล้างด้วยสารละลายแล้วตามด้วยล้างด้วยน้ำสะอาดหรือใช้เคลือบด้วยสาร Emulsifier แล้วตามด้วยล้างน้ำสะอาด จากนั้นต้องทำให้ผิวหน้างานแห้งและสะอาด โดยเช็ดด้วยผ้าสะอาดหรือเป่าด้วยลมร้อน การเช็ดหรือล้างน้ำยาส่วนเกินออกไม่หมดอาจทำให้เกิดผลผิดพลาดได้



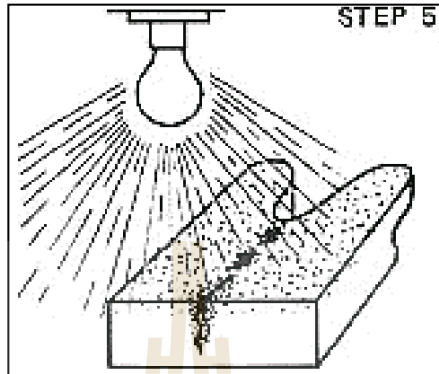
รูปที่ 2.5 แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 3 [17]

ขั้นตอนที่ 4 พ่นน้ำยาเคลือบ (Developer) ที่ระยะเวลาต่ำสุดประมาณ 10 นาทีหรือใช้เวลานานมากขึ้นถ้ารอยร้าวแคบมาก เพื่อให้ Developer ทำปฏิกิริยาดึงน้ำยาแทรกซึมที่อยู่ภายในรอยร้าวหรือ จุดบกพร่องอื่นกลับขึ้นมาที่ผิวหน้าของชิ้นงานตรวจสอบ เพื่อที่จะทำการอ่านและวิเคราะห์ผล สำหรับน้ำยา Developer ชนิดเปียกอาจเคลือบผิวหน้างานด้วยวิธีการทาด้วยแปรงหรือจุ่มชิ้นงานทดสอบลงในอ่างบรรจุ Developer โดยตรง



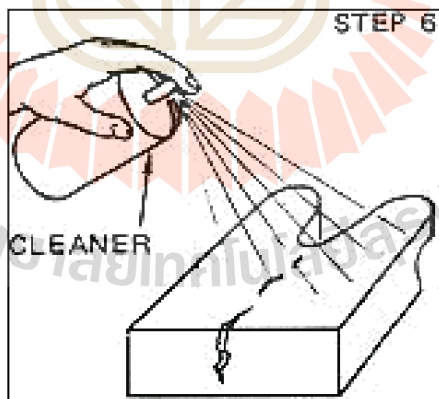
รูปที่ 2.6 แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 4 [17]

ขั้นตอนที่ 5 การตรวจสอบผล (Inspection) ในที่มีแสงสว่างเหมาะสมกับชนิดของน้ำยาแทรกซึม (Penetrant) ที่สามารถอ่านค่าด้วยตาเปล่าหรือใช้แสง Back Light เพื่อสามารถค้นหา รอยร้าวหรือรูพรุนอื่นๆ ที่ผิวหน้าได้ทั่วถึง และบันทึกผล เช่นถ่ายภาพเป็นหลักฐาน



รูปที่ 2.7 แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 5 [17]

ขั้นตอนที่ 6 การทำความสะอาดภายหลังการตรวจสอบ (Post Clean) โดยการใช้ผ้าสะอาดเช็ดเพื่อกำจัดสารเคมีจากน้ำยา Penetrant และ Developer ออกจากผิวหน้าให้หมดแล้วพ่นน้ำยา Remover ทำความสะอาดและใช้ผ้าเช็ดให้แห้ง แล้วจึงเป่าลมร้อนให้แห้ง เพื่อป้องกันการกัดกร่อนในภายหลัง



รูปที่ 2.8 แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 6 [17]

## 2.8 ความร้อนในการเชื่อม (Heat input)[18]

ความร้อนในการเชื่อม (Heat input) จะมีผลต่อการหลอมละลายของแนวเชื่อม ความกว้างของแนวเชื่อม และความนูนของแนวเชื่อม รวมถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) ซึ่งค่าความร้อนในการเชื่อมจะมีหน่วยเป็น KJ/mm. เมื่อมีความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้ค่าการหลอมละลายเพิ่มขึ้น

ส่งผลทำให้ความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นด้วย แต่ความหนาของแนวเชื่อมจะลดลง ดังนั้นค่าความร้อนที่ได้ในการเชื่อมมีความสำคัญต่อแนวและรวมถึงคุณภาพของงานเชื่อม [18] การคำนวณหาค่าความร้อนในการเชื่อมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$HeatInput = EnergyInput \times HeatEfficiency \quad (2.6)$$

$$EnergyInput = \frac{Volt \times Amp \times 60}{Velocity(mm/min) \times 60} \quad (2.7)$$

$$HeatEfficiency = Amp \times ArcVoliage \quad (2.8)$$

## 2.9 ความเจือจางของโลหะ (Dilution)

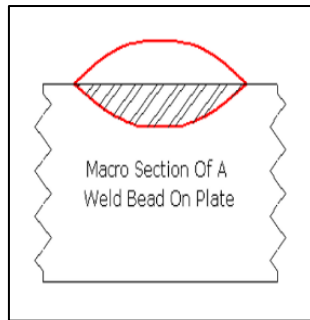
ในการเชื่อมโลหะชนิดที่แตกต่างกัน คุณสมบัติส่วนผสมทางเคมีของวัสดุจะถูกหลอมละลายผสมรวมกัน หรือเรียกว่า ความเจือจาง ซึ่งความเจือจางของโลหะเชื่อมควบคุมโดยการกำหนดน้ำหนักรวมของวัสดุประเภทต่างๆ เพื่อมาผสมกัน โดยใช้การชั่งน้ำหนัก [19]

### 2.9.1 สาเหตุที่ทำให้เกิดความเจือจางคือ

- 1) ความเร็วในการเดินสูง (High Travel speed) ความร้อนที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการแทนที่ของลวดเชื่อม
- 2) กระแสไฟเชื่อมสูง (High Welding Current) กระบวนการเชื่อมที่เกิดกระแสไฟที่สูง เช่น กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submergr Arc Welding : SAW) สามารถที่จะเกิดความเจือจางสูง
- 3) ความบางของวัสดุ (Thin Material) เช่น แผ่นโลหะบาง สามารถที่จะก่อให้เกิดความเจือจางระดับสูง และการเตรียมรอยต่อ (Joint Preparation) ซึ่งความเจือจางมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเจือจาง} = a/(a + A) \times 100 \quad (2.9)$$

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



รูปที่ 2.9 แสดงความเงือจางของ โลหะ (Dilution) [19]

การเงือจาง (Dilution) ระหว่างชั้นพื้นและลวดเชื่อมที่เดิมจะต้องผสมกัน ควรที่จะมีการควบคุม เนื่องจากสัดส่วนการผสมระหว่างเนื้อโลหะพื้นและลวดเดิมนั้นมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ [20] ในการพอกผิวแข็งนั้น ส่วนผสมทางเคมีจะต้องมีความสอดคล้องของอัตราการเงือจางโดยโลหะพื้น เพราะฉะนั้น โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมต่างๆ มีผลกระทบต่อค่าความแข็งของโลหะเชื่อม [21]

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) ถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานและช่วยลดต้นทุนในการสั่งซื้ออุปกรณ์ต่างๆ ได้ มีงานวิจัยที่ให้ความสำคัญในเรื่องของการนำอุปกรณ์ชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เกิดปัญหาต่างๆ สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่และมีประสิทธิภาพ เช่น การแตกร้าว การสึกหรอ เป็นต้น ซึ่งเมื่อเกิดการเสียหายจะต้องมีการสั่งซื้อใหม่ และจะต้องใช้งบประมาณในการสั่งซื้อเป็นจำนวนมากดังนั้นในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ

สุรธยา ลีมนา ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอก โดยใช้เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 โดยใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้า กระบวนการเชื่อมมิก/แม็ก และกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ซึ่งก่อนการเชื่อมและหลังการเชื่อมจะให้ความร้อนที่ต่างกัน รวมทั้งทำการศึกษาบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) พบว่าค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมที่ได้จากกระบวนการเชื่อมไส้ฟลักซ์จะมีค่าใกล้เคียงกับเนื้อเดิมมากกว่ากระบวนการเชื่อมไฟฟ้า และกระบวนการเชื่อมมิกแม็ก ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อนทั้ง 3 กระบวนการ มีค่าใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมและเนื้อ โลหะเดิม [22]

ไพบุลย์ หาญมนต์ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมที่มีผลต่อการหลอมลึกความกว้างความสูงและบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ด้วยกระบวนการเชื่อม MIG โดยใช้ค่าความร้อนในงานเชื่อม (Heat Input) 6 ระดับคือ

1.425 KJ/mm. 2.640KJ/mm. 4.461KJ/mm. 6.486 KJ/mm. 8.025 KJ/mm. และ 10.412 KJ/mm. ความเร็วในการเชื่อม 110 mm./sec ด้วยลวดเชื่อมชนิด AWS ER 308 L-16 พบว่าแนวเชื่อมที่ใช้ค่าความร้อนในงานเชื่อม (Heat Input) สูงขึ้นจะให้ค่าการหลอมลึกเพิ่มมากขึ้นให้ค่าความกว้างของแนวเชื่อมกว้างมากขึ้นให้ค่าความสูงของแนวเชื่อมลดต่ำลงและทำให้บริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีความกว้างและค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น สรุปได้ว่าอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมมีผลต่อการหลอมลึกความกว้างความสูงและบริเวณกระทบร้อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้ [18]

นพกร ภูระยา และอิศรทัต พึ่งอัน ได้ศึกษาคุณสมบัติโลหะเชื่อมโดยการจำลองทางกายภาพ โดยใช้โลหะเชื่อม ได้แก่ ER309, ER308L, ER316, ER347, ER70S-6, SS304, CS (Carbon Steel) FTC (Fused Tungsten Carbide) และใช้กระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW ในการทดสอบ วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค และวิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์ไรต์ นอกจากนี้ยังให้ความสำคัญในเรื่องของการควบคุมความเจือจาง (Dilution Control) ของโลหะเชื่อม พบว่าส่วนผสมทางเคมีนั้นมีผลต่อการทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ และในส่วนการพิจารณาความเจือจางของโลหะ และพบว่าปริมาณของลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC มีผลต่อความแข็งแรงของโลหะ [19]

สุพร ฤทธิภักดี ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็ก AISI 1020 ศึกษาการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องมือและเครื่องจักร และเสนอทางเลือกในการเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุ โดยทำการศึกษาการสึกหรอของชิ้นผิวแนวเชื่อมของลวดเชื่อมพอกผิวแข็งบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1020 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ทำการเปรียบเทียบลวดเชื่อมในกลุ่มที่10 ตามมาตรฐาน DIN8555 และทำการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีตามมาตรฐาน ASTM G65 ผลิตภัณฑ์A แบบ Dry Sand Rubber Wheel : (DSRW) ซึ่งจะใช้เหล็กกล้าคาร์บอน AISI1020 ใช้ลวดเชื่อม E10-UM-65-GR และลวดเชื่อมE10-UM-60-GR พบว่าค่าความแข็งที่ได้จากลวดเชื่อม E10-UM-65-GR มีความแข็งสูงกว่า ลวดเชื่อม E10-UM-60-GR ส่วนของผลการทดสอบการสึกหรอ พบว่า ชิ้นผิวแนวเชื่อมที่มีแนวเชื่อมสองชั้นของลวดเชื่อม E10-UM-65-GR ให้ค่าต้านทานการสึกหรอที่สูงกว่าชั้นสามและชั้นหนึ่ง ส่วนลวดเชื่อม E10-UM-60-GR ชั้นที่สามจะให้ค่าความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า ชั้นสองและหนึ่ง [23]

ยงยุทธ คุลยกุล และคณะ ได้มีการวิจัยศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของการเชื่อมพอกผิวแข็งของวัสดุเหล็ก AS3678 เกรด 350 โดยใช้กระบวนการเชื่อม 3 กระบวนการ คือ กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กระบวนการเชื่อมมิกแม็ก และกระบวนการเชื่อมไส้ฟลักซ์ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละกระบวนการ ซึ่งจะทำการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65ในการทดลอง ผลการทดลองพบว่า เนื้อเชื่อมในแต่ละกระบวนการมีความแตกต่างกัน โดยกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ให้ค่าความต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด ซึ่งให้ค่าความแข็งเท่ากับ 213.4 HV ส่วนกระบวนการเชื่อมมิกแม็กจะให้ค่าความต้านทานการสึกหรอน้อยที่สุด

ซึ่งให้ค่าความแข็งเท่ากับ 174.8 HV ดังนั้น กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมใส่ฟลักซ์ให้ค่าที่มีความเหมาะสม ซึ่งเป็นทางเลือกในการที่จะนำไปใช้งานให้ได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสม [4]

G.R.C. Pradeep et al ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการพอกผิวแข็งของวัสดุ AISI 1020 โดยทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมอาร์ค (Arc Welding) และกระบวนการเชื่อม TIG ต้องการที่จะกำหนดกระบวนการพอกผิวแข็งที่ดีที่สุดของเหล็ก AISI 1020 จากการศึกษาพบว่า ชิ้นงานในการทดลองที่ใช้กระบวนการเชื่อม TIG ให้คุณสมบัติในการสึกหรอที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานในการทดลองของกระบวนการเชื่อมอาร์ค (Arc Welding) ที่ความเร็วในการเชื่อมที่ 1.256 เมตรต่อวินาที นอกจากนี้ยังพบว่า กระบวนการเชื่อมอาร์คให้คุณสมบัติในการสึกหรอที่ดีที่สุดที่ความเร็วในการเชื่อมที่ 1.571 เมตรต่อวินาที [24]

อริวิชญ์ อามิต ได้ทำการวิจัยเปรียบเทียบอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันในการเชื่อมพอกผิวแข็ง และวัสดุพื้นที่ใช้คือ เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 และใช้วัสดุในเติมพอกผิวแข็งคือ Fused Tungsten Carbide และใช้กระบวนการเชื่อม 2 กระบวนการ คือ กระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) และทดสอบการสึกหรอความมาตรฐาน ASTM G65 พบว่ากระบวนการเชื่อม OAW ให้ค่าความต้านทานการสึกหรอดีกว่ากระบวนการเชื่อม TIG การกระจายตัวของคาร์ไบด์ของการกระบวนการเชื่อมอยู่ด้านบนของผิวเชื่อม แต่ของกระบวนการเชื่อมทิก จะอยู่บริเวณขอบของแนวเชื่อม [25]

การเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นกระบวนการซ่อมบำรุงวัสดุอุปกรณ์กระบวนการหนึ่งที่ได้รับ ความนิยมเนื่องจากสามารถทำงาน ณ บริเวณของวัสดุอุปกรณ์นั้นๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีการเคลื่อนย้ายชิ้นงานไปหาเครื่องมือ โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้ในการป้องกันการสึกหรอของอุปกรณ์ [26-27] เพื่อยืดอายุในการใช้งาน สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น หรือทนอุณหภูมิได้สูงขึ้น ในงานที่จำเป็นต้องทำงานเกี่ยวกับดินซึ่งมีหิน กรวด ทราย ปนอยู่มาก ทำให้เกิดการสึกหรอของอุปกรณ์ได้ง่าย จึงมีการใช้การเชื่อมพอกผิวแข็งเข้าร่วมด้วยเพื่อที่จะลดการสึกหรอดังกล่าว [20] นอกจากนี้ การเชื่อมพอกผิวแข็งยังถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมประเภทขุดเจาะ ซึ่งรวมถึงอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมัน [28] เพื่อเป็นการป้องกันการสึกหรอจากการทำงานในการขุดทรายน้ำมัน (Sand Oil) โดยการใช้งานลักษณะดังกล่าวจะเป็นการใช้งานที่ใกล้เคียงกับการใช้งานดินที่ใช้ในการเกษตรของประเทศไทย การเชื่อมพอกผิวแข็งสามารถเชื่อมลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไปได้เลย โดยอาจมีการอุ่นชิ้นงานหรือไม่อุ่นชิ้นงานก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานและส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานที่ทำร่วมด้วยผิวหน้าของการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing Deposit) สามารถเป็นวัสดุได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับประเภทของลวดหรือวัสดุที่เติมลงไป เช่น มีอนุภาคของคาร์ไบด์อยู่บนผิวงาน [29] ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นคาร์ไบด์ประเภทต่างๆ โดยกระบวนการเชื่อมพอกจะใช้กระบวนการเชื่อมทิก



ซึ่งกระบวนการอื่นๆ สามารถกระทำได้เช่นกัน เช่น การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ หรือการเชื่อมด้วยการเชื่อมแก๊ส เช่นเดียวกัน นอกจากการได้ความแข็งจากการเกิดคาร์ไบด์แล้ว [30-31] ยังอาจได้ทำแข็งมาจากการเปลี่ยนแปลงเฟส ในที่นี้คือการเกิดมาร์เทนไซต์ (Martensite) การเลือกใช้ประเภทของความแข็งที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่ต้องการใช้ เช่น กรณีการสึกหรอบแบบเลื่อนไถล (Sliding Wear) การเกิดเฟสที่มีความแข็งอย่างเดียวในลักษณะของมาร์เทนไซต์นั้นเพียงพอต่อการใช้ที่ไม่มีแรงกระแทกเกิดขึ้น แต่หากมีแรงกระแทกเกิดขึ้น การเกิดเฟสลักษณะนี้ จะไม่เหมาะสม เนื่องจากเกิดการเปราะและแตกร้าวง่าย ทำให้เสี่ยงต่อการหลุดล่อนของชั้นพอกผิวแข็งออกมา ดังนั้นการเกิดความแข็งที่มาจกคาร์ไบด์จะเหมาะสมกว่า

สำหรับวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะได้ความแข็งจาก Tungsten Carbide ซึ่งเกิดจากลวดเชื่อมหรือวัสดุพอกผิวแข็งที่เลือกใช้ จะมีอนุภาคต่างๆ ของคาร์ไบด์อยู่บนโครงสร้าง (Matrix) พื้นที่ย่อนกว่า เมื่อได้รับการเสียดสี อนุภาคของคาร์ไบด์จะให้ความแข็งและต้านทานการสึกหรอ ในขณะที่เมื่อได้รับแรงกระแทก โครงสร้างพื้นที่ย่อนกว่าจะมีหน้าที่รับแรงกระแทก ทำให้ชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งยึดติดกับโลหะชิ้นงานได้ยิ่งขึ้น

ดังนั้นการวิจัย การเชื่อมพอกผิวแข็งสำหรับงานดินที่ต้องมีทั้งการเสียดสีจากชั้น ดิน ทราข การเลือกวัสดุพอกผิวแข็งในลักษณะที่เกิดคาร์ไบด์บนชั้นที่ย่อนกว่า จึงมีโอกาที่จะได้ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการใช้งาน



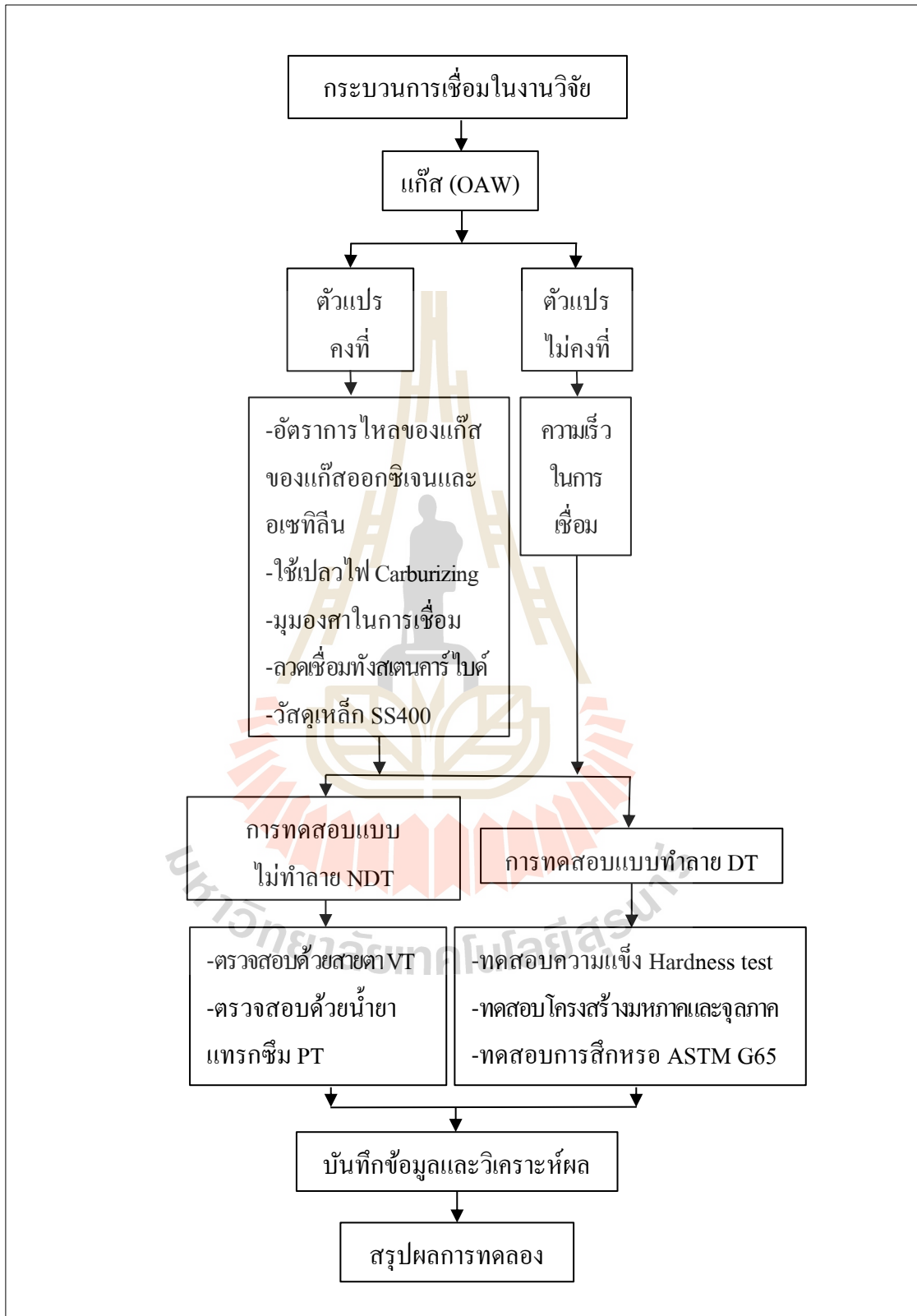
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน (Oxy Acetylene Welding Process : OAW) โดยใช้ลวดเชื่อมแบบชนิดเติมทั้งสแตนคาร์ไบด์ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Fused Tungsten Carbide : Fused WC) และใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 เป็นชิ้นงานในการทดลอง จะใช้อัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีนและออกซิเจนที่เหมาะสมในการเชื่อมจากนั้นทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง จากการทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา และคุณสมบัติทางกล การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินงานตามขั้นตอน ดังนี้

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

### 3.1 แผนผังการดำเนินงานเชื่อมในงานวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน

### 3.2 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ในการวิจัย

เครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยได้รับการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกจากอาคารเครื่องมือ 1 อาคารเครื่องมือ 4 อาคารเครื่องมือ 6 และอาคารเครื่องมือ 10 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมทั้งได้รับการอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบและสถานที่ของห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา อาคารเรียนรวม 1 ห้อง CB 1203 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและมีการอบรมความปลอดภัยและการใช้เครื่องมือที่ถูกหลักวิธี โดยรับสิทธินักศึกษาโครงการวิจัยได้ใช้เครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์ ประกอบไปด้วย

#### 3.2.1 ชุดอุปกรณ์ในการเชื่อมด้วยแก๊สอะเซทิลีน



รูปที่ 3.2 แสดงชุดอุปกรณ์กระบวนการเชื่อมด้วยแก๊สอะเซทิลีน

### 3.2.2 เครื่องตัด Wire Cut รุ่น CHARMILLES TECHNOLOGIES



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องตัด Wire Cut

### 3.2.3 เครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ทดสอบแบบ Dry Sand/Rubber Wheel



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องทดสอบการสึกหรอ

### 3.2.4 เครื่องอัดชิ้นงานด้วยเรซิน (Hot Mounting Presses) คือการทำให้



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องอัดเรซิน

### 3.2.5 เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน

### 3.2.6 เครื่องขัดผงอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่องขัดผงอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

### 3.2.7 กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพ

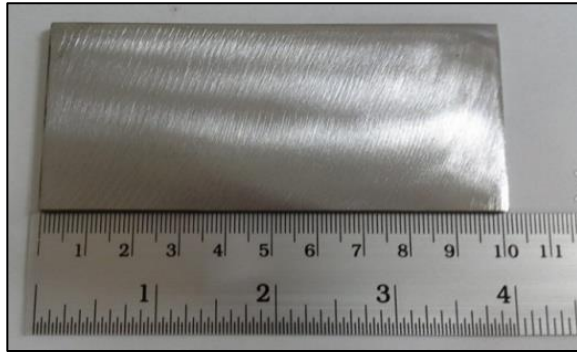
ในการทดสอบจะใช้กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสามารถที่จะให้ระดับกำลังขยายตั้งแต่กำลังขยายต่ำ 100 เท่าไปจนถึงกำลังขยายสูง 1000 เท่า



รูปที่ 3.8 แสดงกล้องจุลทรรศน์

### 3.2.8 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 เป็นชิ้นงานในการทดลองเชื่อมเป็นเหล็กแผ่นรีดร้อน เป็นเหล็กที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในงาน โครงสร้างทั่วไป สามารถนำไปใช้ในงานเชื่อม โครงสร้างต่าง ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นเหล็กขนาด 60x100x4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.9 แสดงเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400

### 3.2.9 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

เป็นลวดเชื่อมแบบเติมประเภททังสเตนคาร์ไบด์ (Fused Tungsten Carbide : Fused WC) ประเภท A T Fe20 G21-GF-55-CG



รูปที่ 3.10 แสดงลวดเติมทังสเตนคาร์ไบด์

### 3.2.10 การทดสอบแบบไม่ทำลาย

#### 1) การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection)

ทำการตรวจสอบสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นที่ผิวของของชิ้นงาน ได้แก่ รูพรุนหรือการเกิดตามด การเกิดสะเก็ด โลหะที่เกิดจากกระบวนการเชื่อม เช่น รอยกัดลึกด้านข้าง (Under Cut) การบิดงอ การแตกร้าวของชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือที่ช่วยในการตรวจสอบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ แวนขยาย ไฟฉาย ไม้บรรทัด ตลับเมตร

#### 2) การตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึม (Penetrant Testing)

การตรวจสอบด้วยน้ำยาแทรกซึม สามารถที่จะตรวจหาสิ่งบกพร่องที่เปิดปากที่ผิว ได้แก่ รอยแตกร้าวที่ผิวและรูพรุน เป็นต้น ซึ่งน้ำยาสารแทรกซึมใน 1 ชุดจะมี 3 กระป๋องคือ น้ำยาทำความสะอาด (Remover) น้ำยาแทรกซึม (Penetrant) และน้ำยาเคลือบ (Developer)





รูปที่ 3.11 แสดงชุดน้ำยาสารแทรกซึม

### 3.2.11 เครื่องมือในการทดสอบสมบัติทางกล

เครื่องทดสอบความแข็ง เป็นเครื่องทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers) เครื่องหมายเลขรุ่น FUTUR-TECH โมเดล FM-800 สามารถอ่านผลการทดสอบจากเครื่องโดยตรงเป็นตัวเลขดิจิทัล หัวกดเพชรมุม 136 องศา ใช้วัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส และการทดสอบ (Rockwell Hardness Test) เป็นเครื่อง Wilson Hardness Rockwell 574 หัวกดที่ใช้เป็นหัวเพชร ที่น้ำหนัก 150 kg. จะใช้กด เหล็กกล้า เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง และวัสดุที่มีความแข็งกว่า 100 HRB



รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Vicker Hardness Test)



รูปที่ 3.13 แสดงเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

### 3.3 การกำหนดปัจจัยและออกแบบการทดลอง

จุดประสงค์ของการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาตัวแปรในกระบวนการเชื่อม รวมไปถึงจำนวนของชั้นแนวเชื่อมที่ทำการเชื่อมพอกผิว ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของงานเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีกระบวนการเชื่อม OAW ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยที่สำคัญที่จะทำการศึกษาดังนี้

#### 3.3.1 ปัจจัยคงที่ในการเชื่อม

- 1) เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์ในการควบคุมการเชื่อม
- 2) เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ของมาตรฐาน JIS
- 3) ลวดเชื่อมแบบเติมประเภททั้งสแตนคาร์ไบต์

#### 3.3.2 ปัจจัยที่กำหนดในการเชื่อม

- 1) การศึกษาคุณสมบัติความแข็งและค่าความต้านการสึกหรอของชิ้นงานของกระบวนการเชื่อม OAW
- 2) การศึกษาค่าความต้านทานการสึกหรอของชั้นแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม OAW

การกำหนดค่าในการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีขนาด 1x3 นิ้ว (25.4x76.2 มิลลิเมตร) และใช้ระบุ Specified Procedure A อัตราการไหลของทรายจะเป็น 300 ถึง 400 กรัมต่อนาที [14]

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม OAW ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม OAW

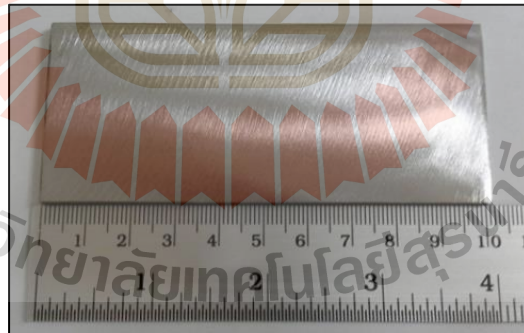
ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม	ค่า
เปลวไฟเชื่อม	Carburizing
แรงดันออกซิเจน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	70
แรงดันแก๊สอะเซทิลีน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	8
มุมของหัวเชื่อม (องศา)	15
อัตราการความเร็วในการเชื่อม (เซนติเมตรต่อนาที)	3.1-3.2

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองการเชื่อมชิ้นงาน จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เพื่อที่จะนำไปทดสอบความแข็ง และทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.4.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบการสึกหรอ

การเตรียมชิ้นงานในการทดลองโดยการตัดชิ้นงานในการทดลองเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ให้ได้ขนาดความกว้าง 60 ความยาว 100 และความหนา 4 มิลลิเมตร และทำการเจียรระโนปาดผิวหน้าที่เป็นผิวดำจากการขึ้นรูปด้วยความร้อน



รูปที่ 3.14 แสดงชิ้นงานในการทดลอง

#### 3.4.2 การเชื่อมชิ้นงานในการทดลอง

ทำการเชื่อมชิ้นงานทั้งหมด 3 ชั้นในแต่ละชั้นจะมีชิ้นงาน 3 ชิ้น จะใช้กระบวนการเชื่อมแก๊สอะเซทิลีน และกระบวนการเชื่อมทิกด้วยการใช้ลวดเชื่อมแบบเติมประเภททั้งสเตนคาร์ไบด์ (Fused Tungsten Carbide : Fused WC) กับวัสดุพื้นเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400



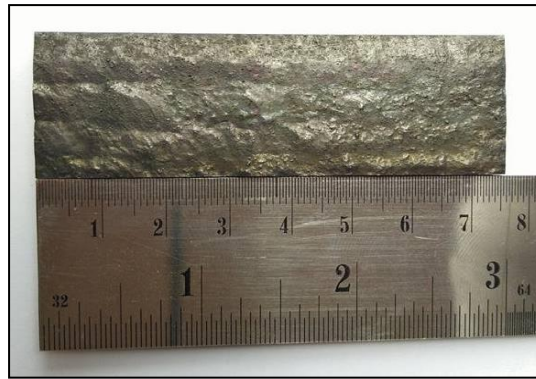
รูปที่ 3.15 แสดงชิ้นงานเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น



รูปที่ 3.16 แสดงชิ้นงานเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 3.17 แสดงชิ้นงานเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น



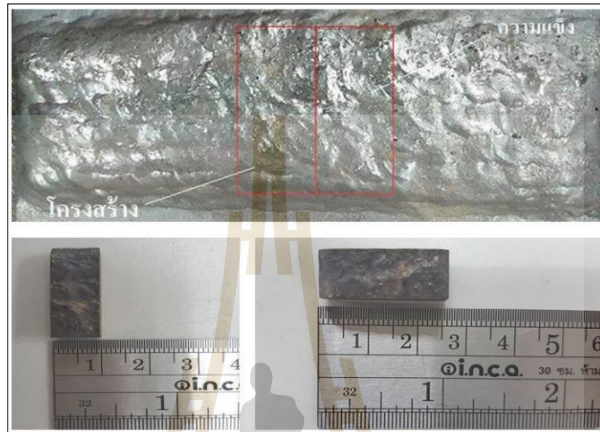
รูปที่ 3.18 แสดงชิ้นงานเชื่อม OAW ที่ผ่านการตัดสำหรับทดสอบการสึกหรอ

### 3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasion Test)

- 1) ทำความสะอาดชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมและตัดให้ได้ขนาดด้วย Solvent หรือ Cleaner และทำให้แห้ง
- 2) นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยม 3-4 ตำแหน่ง
- 3) นำชิ้นงานไปใส่ใน Holder ให้แน่น จากนั้นใส่ตุ้มน้ำหนักที่ Level Arm เพื่อกดให้ชิ้นงานติดกับล้อ
- 4) ปลดอยทรายโดยให้อัตราการไหลของทรายอยู่ในระดับมาตรฐานซึ่งอยู่ในระหว่าง 300 ถึง 400 กรัมต่อนาที
- 5) ควรมีการเช็คอุณหภูมิของล้อก่อนการทดสอบ ให้อยู่ในอุณหภูมิห้อง เพื่อป้องกันการเกิดความร้อน ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดลอง ซึ่งเลือกทดสอบตาม Specified Procedure A เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งมากต้องใช้เวลา 30 นาที ซึ่งจะแบ่งการบันทึกผลทุก 10 นาที
- 6) เริ่มทำการหมุนวงล้อและทำการลด Level Arm ลงเพื่อให้ชิ้นงานสัมผัสกับวงล้อพร้อมทั้งจับเวลา
- 7) เมื่อทำการทดสอบครบ 30 นาที หยุดการหมุนของล้อและการไหลของทราย และควรวัดอัตราการไหลของทรายก่อนและหลังการทดสอบด้วย หรือยกเว้นถ้าในกรณีใช้อัตราการไหลที่สม่ำเสมอแล้ว
- 8) นำชิ้นงานออกจากเครื่องเพื่อมาชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบและบันทึกผล

### 3.4.2 การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง

ในการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) และ โครงสร้างจุลภาค (Microstructure Test) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมทั้ง 2 กระบวนการจะถูกตัดชิ้นงานด้วยเครื่อง Wire Cut และนำเฉพาะส่วนกึ่งกลางของชิ้นงานและแยกเป็น 2 ส่วน แล้วนำไปอัดเรซิน เพื่อให้สะดวกในการทดสอบ



รูปที่ 3.19 แสดงขนาดและตำแหน่งในการตัดชิ้นงานของการเชื่อม OAW



รูปที่ 3.20 แสดงชิ้นงานอัดเรซินสำหรับทดสอบ โครงสร้างจุลภาคและความแข็ง

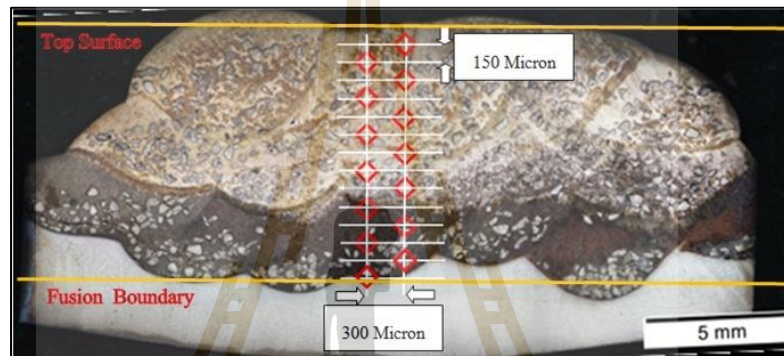
### 3.4.3 การศึกษาโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์

การศึกษาโครงสร้างมหภาค เพื่อคุณลักษณะการกระจายตัวของคาร์ไบด์และการหลอมลึก ส่วนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อที่คุณลักษณะของเกรนของชิ้นงานเชื่อม ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone) บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุ

พื้น (Fusion Zone) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) และบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone)

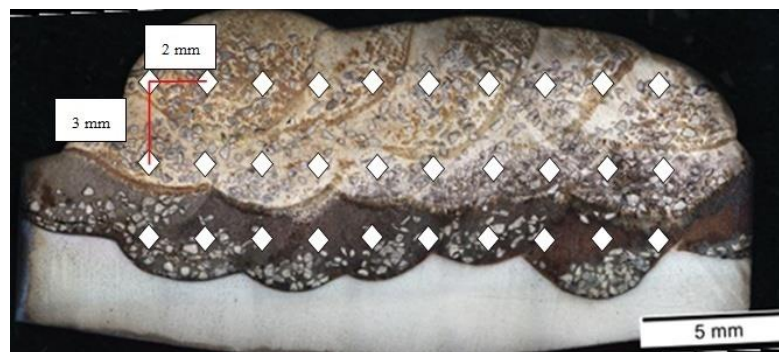
#### 3.4.4 ทดสอบความแข็ง

1) การทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ (Micro Hardness Vickers Test) โดยกำหนดตำแหน่งเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายความแข็งจากบริเวณขอบรอยเชื่อม (Fusion Boundary) ถึงผิวด้านบนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (Top Surface) โดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา น้ำหนักในการกด (Test Load) 300 kgf กดค้างไว้ (Dwell Time) เป็นเวลา 10 วินาทีทดสอบตามระยะดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงตัวอย่างตำแหน่งและชิ้นงานทดสอบความแข็ง Micro Hardness Vickers Test

2) การทดสอบความแข็งแบบ (Rockwell Hardness Test) โดยใช้สเกล C เป็นประเภทหัวกดเพชร Major Load อยู่ที่ 150 kgf ใช้กับวัสดุที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB จะกดช่วงกึ่งกลางของแนวเชื่อมแต่ละชั้น และระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอยกดกับขอบของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่า 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดซึ่งรอยกดหัวเพชรประมาณ 0.5 mm.



รูปที่ 3.22 แสดงตัวอย่างตำแหน่งและชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Test

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการศึกษากระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ด้วยลวดเติม (Filler Metal) ชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการศึกษาจำนวนชั้นของแนวเชื่อม คุณสมบัติทางกลโดยการทดสอบความแข็ง และทำการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 โดยผลของการทดลองของงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 การศึกษาโครงสร้างมหภาค

##### 4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น

กระบวนการเชื่อม OAW พบว่า ลวดเติมเกิดการหลอมละลายลึกเข้ากับวัสดุพื้นน้อย เนื่องจากกระบวนการเชื่อม OAW เป็นหลักการที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ทำให้เกิดบ่อหลอมที่ช้า ทำให้ความร้อนมีการกระจายอยู่ที่ผิวบนของชิ้นงาน ส่งผลทำให้ลวดเติมเกิดการหลอมละลายที่รวดเร็ว ทำให้ทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดีอยู่รอบๆ แนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น

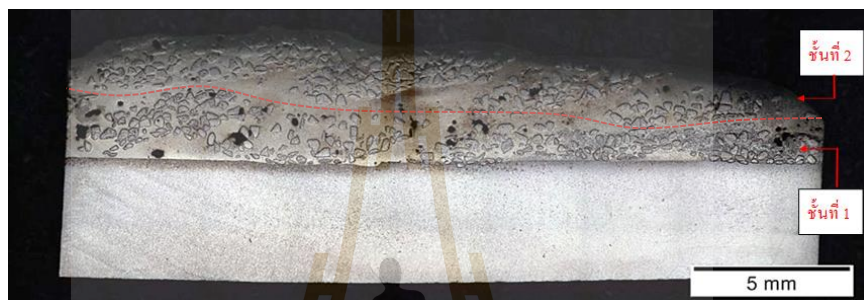
##### 4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแก๊ส OAW ของแนวเชื่อม 2 ชั้น

กระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้นพบว่าความสูงเฉลี่ยของเนื้อเชื่อมมีขนาด 3.97 มิลลิเมตร การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดี ลักษณะการให้ความร้อนของการเชื่อม OAW เป็นการแพร่กระจายความร้อนบนผิวชิ้นงานมาก ทำให้การหลอมละลายรวมกับแนวเชื่อมจำนวน 1 ชั้นค่อนข้างยาก ส่งผลให้บริเวณบางส่วนของเนื้อเชื่อมเกิดเป็นไม่สมบูรณ์ (รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3)





รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น



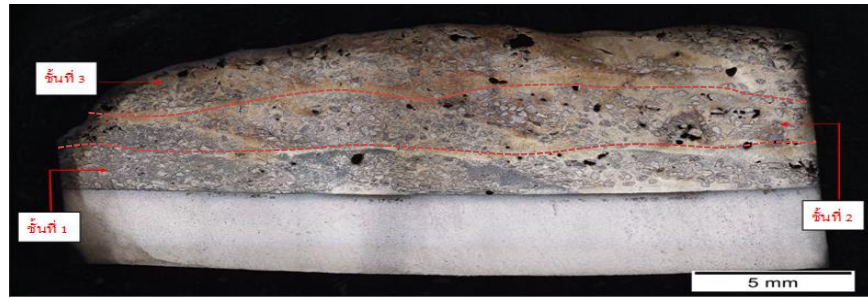
รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น

#### 4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อม 3 ชั้น

กระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อม 3 ชั้นพบว่า การให้ความร้อนและการหลอมละลายมีลักษณะที่เหมือนกันกับแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น ความสูงเฉลี่ยของเนื้อเชื่อมมีขนาด 7.66 มิลลิเมตร การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดี (รูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5)



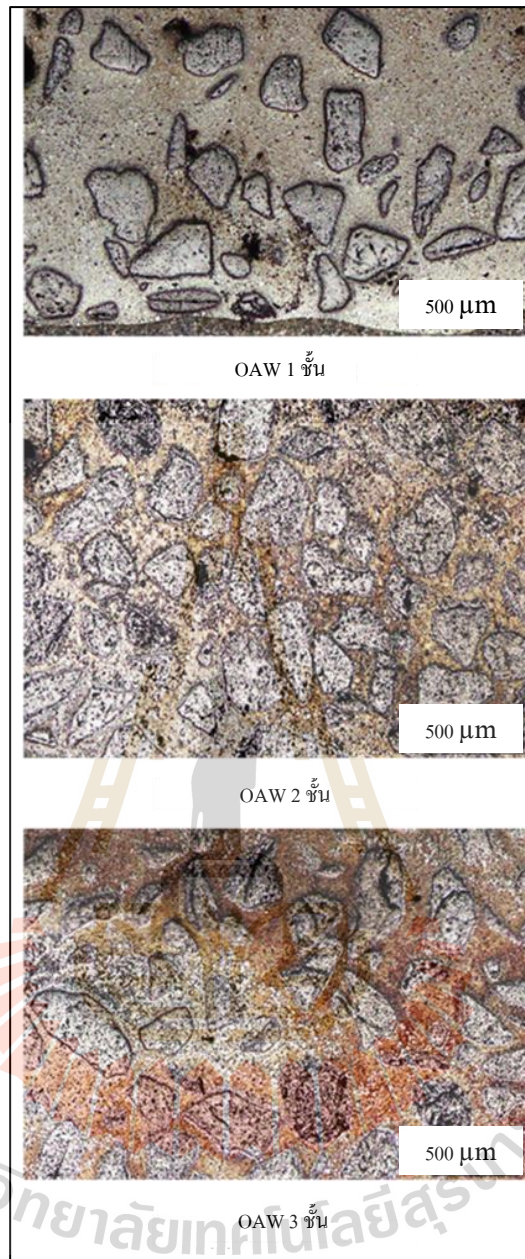
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น



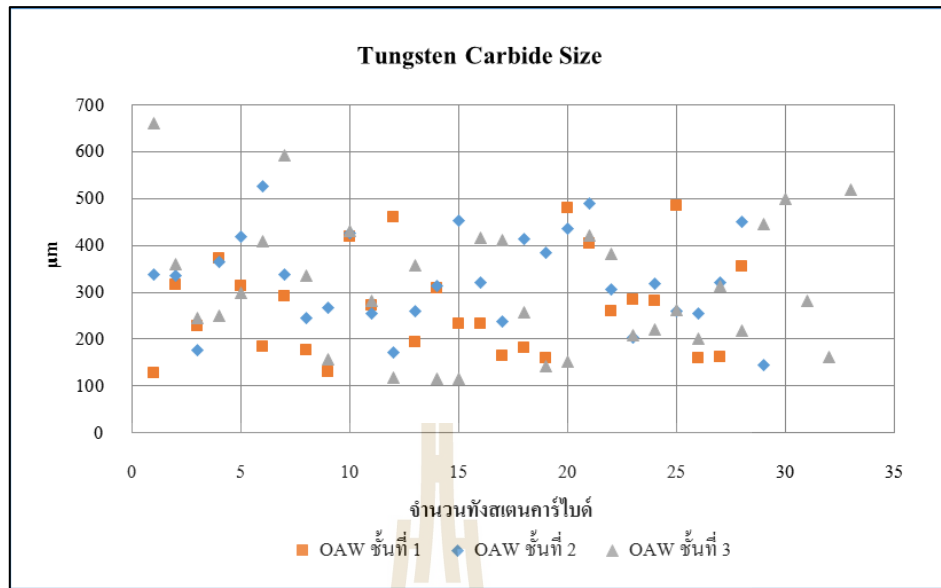
รูปที่ 4.5 แสดงการกระจายตัวของทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อม 3 ชั้น

#### 4.2 ผลทดสอบการวัดขนาดของทังสเตนคาร์ไบด์

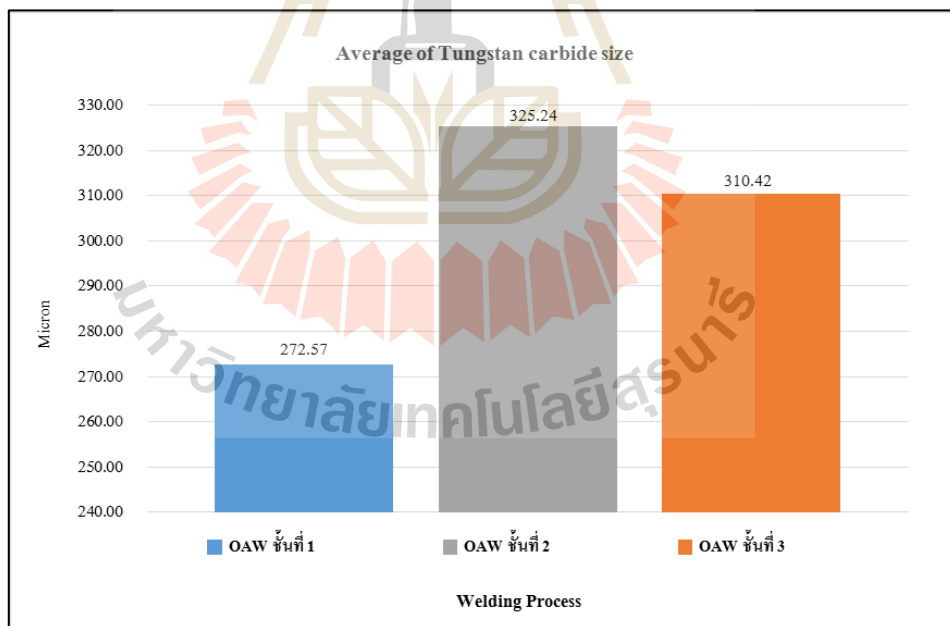
จากจำนวนชั้นของการเชื่อมที่แตกต่างกันอาจส่งผลกระทบต่อ การกระจายตัวของเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ในเนื้อเชื่อมได้ เนื่องจากความร้อนสะสมเข้าสู่ชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การหลอมละลายของเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาขนาดของเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide Size) ที่กระจายอยู่ในบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) (รูปที่ 4.6)



รูปที่ 4.6 แสดงขนาดเม็ดทั้งสเดนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อม OAW



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงจำนวนเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น

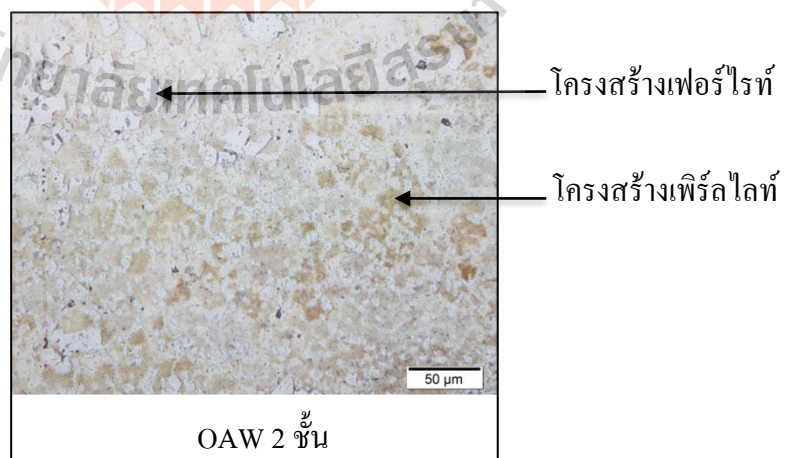
จากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 กระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อมจำนวน 1 ชั้น มีจำนวนเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ที่ 28 เม็ด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 272.57 ไมครอน กระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น มีจำนวนเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ที่ 29 เม็ด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 325.24 ไมครอน กระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น มีจำนวนเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ที่ 33 เม็ด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 310.42 ไมครอน

### 4.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม (Weld Metal) เมื่อทำการตัดชิ้นงานทดสอบที่ต้องการ นำไปขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์หยาบไปจนถึงเบอร์ละเอียด จากนั้นนำมากัดกรด แล้วทำการส่องเพื่อดูโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างบริเวณต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง เมื่อทำการส่องโครงสร้างสามารถแบ่งชิ้นงานเชื่อมออกเป็น 4 Zone ตามลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏ ได้แก่ บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone) บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุพื้น (Fusion Zone) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) และบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone)

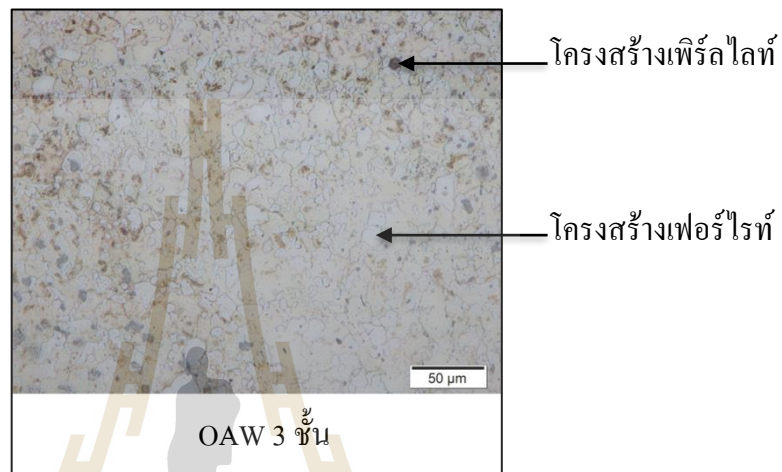
#### 4.3.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม (Weld Zone)

โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบ OAW ที่กำลังขยาย 50X พบว่า กระบวนการเชื่อม OAW ที่แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น ที่อัตราเร็วในการเชื่อม 3.23 เซนติเมตรต่อนาที เกิดโครงสร้างเดนไดท์ ประกอบไปด้วยเฟอไรต์ 44.6% และเพิร์ลไลท์ 55.4% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ 89509.85  $\mu\text{m}^2$  ขนาด Grain size เท่ากับ 10.33 ตามแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดง โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น

ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW ที่กำลังขยาย 50X พบว่า กระบวนการเชื่อม OAW ที่แนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้นที่อัตราเร็วในการเชื่อม 3.23 เซนติเมตรต่อนาที เกิดโครงสร้างเดนไดท์ ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรท์ 70.6 % และเพิร์ลไลต์ 29.4 % บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่  $89509.85 \mu\text{m}^2$  ขนาด Grain size เท่ากับ 11.04 ตามแสดงดังรูปที่ 4.10



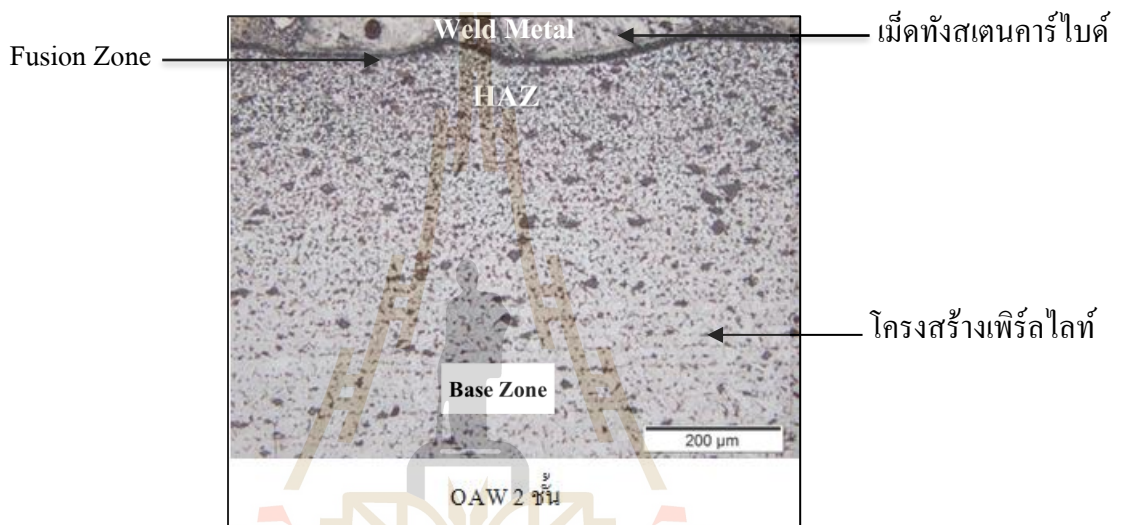
รูปที่ 4.10 แสดง โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น

ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW ทั้งจำนวน 2 ชั้นและ 3 ชั้น พบว่า ลักษณะโครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone) มีลักษณะเป็นเดนไดท์ประกอบด้วยเฟอร์ไรท์และเพิร์ลไลต์ ขนาดของเม็ดเกรนมีความละเอียดขึ้นเมื่อจำนวนชั้นของการเชื่อมเพิ่มขึ้น และความละเอียดของเกรนยังขึ้นอยู่กับประเภทกระบวนการเชื่อมและการให้ความร้อนในการเชื่อม ซึ่งในกระบวนการเชื่อม OAW การสร้างบ่อหลอมละลาย จะต้องใช้เวลานานกว่า ให้ความร้อนสะสมในชิ้นงานมาก เมื่อเย็นตัวในอากาศ ส่งผลทำให้เม็ดเกรนมีความละเอียดขึ้น (รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10)

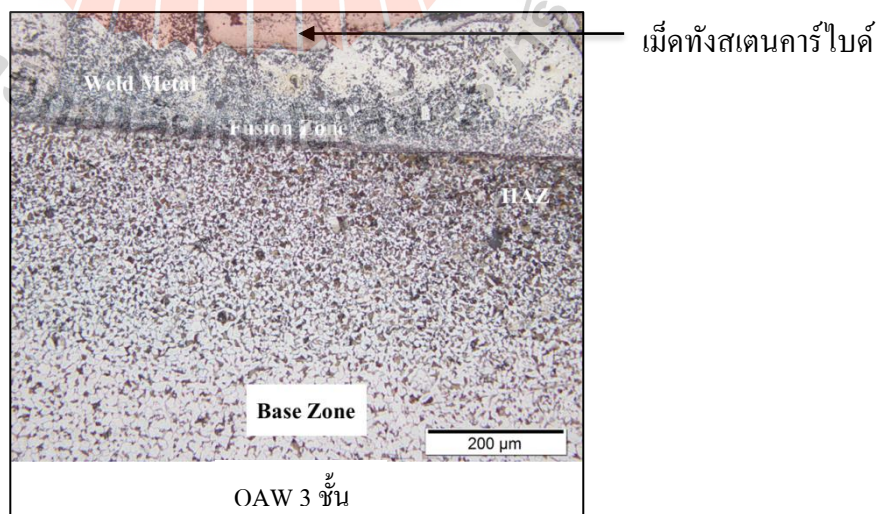
#### 4.3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของ Weld Metal, Fusion Zone, HAZ และ Base Zone

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ Weld Metal, Fusion Zone, HAZ และ Base Zone ที่กำลังขยาย 200X พบว่า กระบวนการเชื่อม OAW แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้นที่อัตราเร็วในการเชื่อม 3.23 เซนติเมตรต่อนาที โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุ (Fusion Zone) และบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบ (Base Zone) มีลักษณะของเกรนที่แตกต่างกัน และกระบวนการเชื่อม OAW แนวเชื่อม

จำนวน 3 ชั้นที่อัตราเร็วในการเชื่อม 3.23 เซนติเมตรต่อนาที โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุ (Fusion Zone) และบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบ (Base Zone) มีลักษณะของเกรนที่แตกต่าง ซึ่งมีขนาดของเกรนละเอียดกว่าการเชื่อม 2 ชั้น แสดงดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ซึ่งขนาดเกรนของโครงสร้างโลหะมีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะ ชิ้นงานโลหะที่มีขนาดเกรนเล็กและมีความละเอียดและจำนวนเกรนมาก วัสดุนั้นจะมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานโลหะที่มีขนาดเกรนหยาบและจำนวนเกรนน้อย



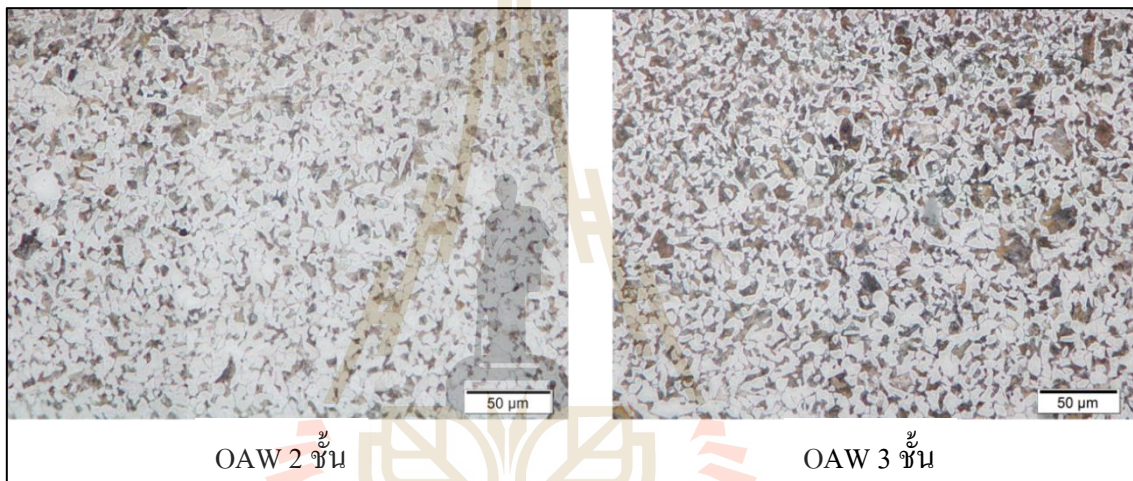
รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างบริเวณ Weld Metal, Fusion Zone, HAZ และ Base Zone ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างบริเวณ Weld Metal, Fusion Zone, HAZ และ Base Zone ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW 3 ชั้น

#### 4.3.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ)

โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) พบว่า ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ผ่าน การเชื่อมแบบ OAW 2 ชั้น ที่ระดับอัตราเร็ว 3.24 เซนติเมตรต่อนาที มีลักษณะโครงสร้าง เฟอร์ไรต์ 68.7% และเฟิร์ลไลต์ 31.3% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่  $89509.85 \mu\text{m}^2$  ขนาด Grain Size เท่ากับ 11.24 ไมครอน แสดงในรูปที่ 4.13 และกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น ที่ระดับอัตราเร็ว 3.23 เซนติเมตรต่อนาที มีลักษณะโครงสร้าง เฟอร์ไรต์ 58.7% และเฟิร์ลไลต์ 41.3% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่  $89509.85 \mu\text{m}^2$  ขนาด Grain Size เท่ากับ 11.77 ไมครอน แสดงดังในรูปที่ 4.13



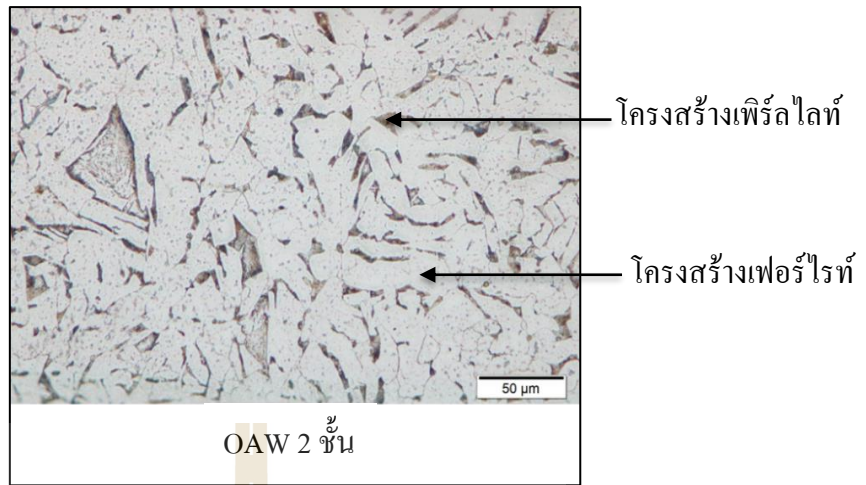
รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ของกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW ระหว่างการเชื่อม 2 ชั้นและ 3 ชั้น บริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบบร้อน (HAZ) จะเกิดเป็นโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์ แบบเดียวกัน

#### 4.3.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้น (Base Zone)

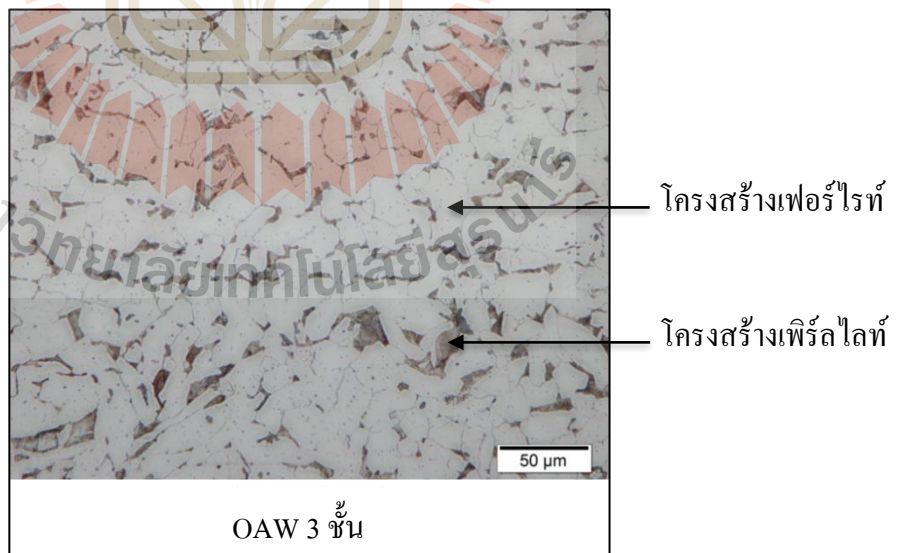
โครงสร้างจุลภาคของบริเวณวัสดุพื้น (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากได้รับอิทธิพลความร้อนจากกระบวนการเชื่อมมีลักษณะโครงสร้าง เฟอร์ไรต์ 72.8 % และเฟิร์ลไลต์ 27.2 % บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่  $89509.85 \mu\text{m}^2$  ขนาด Grain Size เท่ากับ 10.63 ไมครอน แสดงดังในรูปที่ 4.14





รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบ OAW จำนวน 2 ชั้น

กระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้นจะ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากได้รับอิทธิพลความร้อนจากกระบวนการเชื่อมมีลักษณะ โครงสร้างเพิร์ลไรท์ 78.2% และเฟอร์ไรต์ 21.8% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่าพื้นที่ 89509.85  $\mu\text{m}^2$  ขนาด Grain Size เท่ากับ 11.05 ไมครอน แสดงดังในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบ OAW จำนวน 3 ชั้น

จากรูปที่ 4.14 รูปที่ 4.15 จะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW พบว่า ขนาดของเกรนที่ได้จากกระบวนการเชื่อม 3 ชั้น ขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่กว่าที่ผ่านกระบวนการเชื่อม 2 ชั้น เนื่องจากการให้ความร้อนของการเชื่อม OAW เมื่อจำนวนชั้นของการเชื่อมเพิ่มขึ้นเกิดการสะสมความร้อนที่ชิ้นงานทำให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานเชื่อมค่อนข้างช้า ส่งผลทำให้เกรนมีระยะเวลาในการขยายตัวนานขึ้น เกรนจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น

#### 4.4 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

##### 4.4.1 แบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers)

การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานพอกผิวแข็ง เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ที่กำหนดคือ การทดสอบความแข็ง กระบวนการเชื่อม 2 ชั้น กระบวนการเชื่อม 3 ชั้น ซึ่งได้ทำการทดสอบ 2 วิธี ได้แก่

- 1) การทดสอบความแข็งแบบ Micro Vickers Hardness มาตรฐาน ASTM E-384
- 2) การทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Test รุ่น 574 มาตรฐาน

ASTM E18, ASTM D785, ASTM B294, ISO 6508 และ JIS Z2245

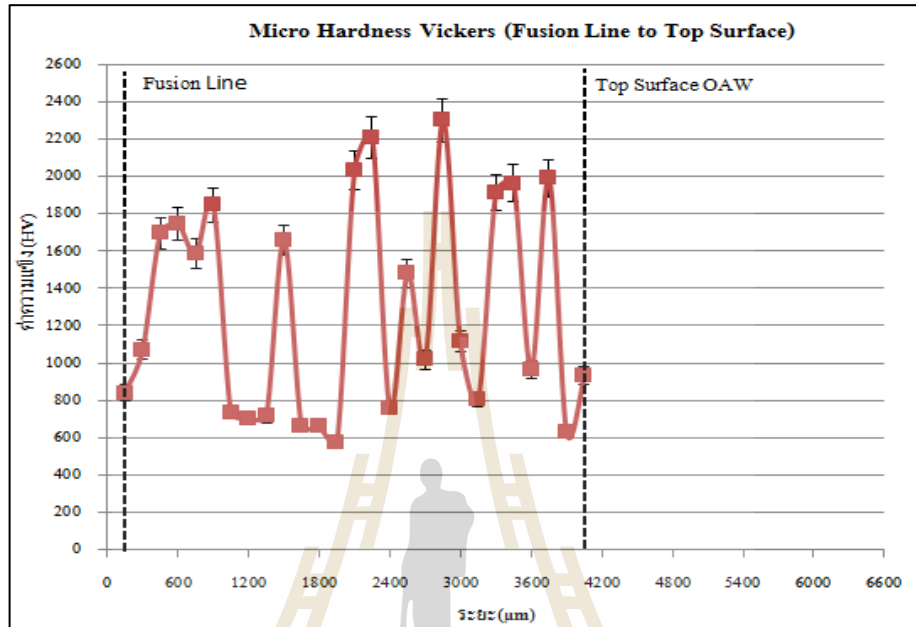
ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น

ระยะ(mm)	ระยะ(μm)	ความแข็ง HV		ระยะ(mm)	ระยะ(μm)	ความแข็ง HV	
		OAW				OAW	
0.15	150	839.4		2.25	2250	2210.3	
0.3	300	1071.6		2.4	2400	760	
0.45	450	1695.3		2.55	2550	1479.7	
0.6	600	1744.1		2.7	2700	1018.6	
0.75	750	1582.5		2.85	2850	2299.3	
0.9	900	1847.1		3	3000	1113.2	
1.05	1050	735.6		3.15	3150	804.6	
1.2	1200	704.1		3.3	3300	1911.5	
1.35	1350	714.7		3.45	3450	1964.1	
1.5	1500	1657.6		3.6	3600	966.7	
1.65	1650	659.9		3.75	3750	1991.2	
1.8	1800	661.7		3.9	3900	629.4	
1.95	1950	574.6		4.05	4050	929.9	
2.1	2100	2033.6		4.2	4200		

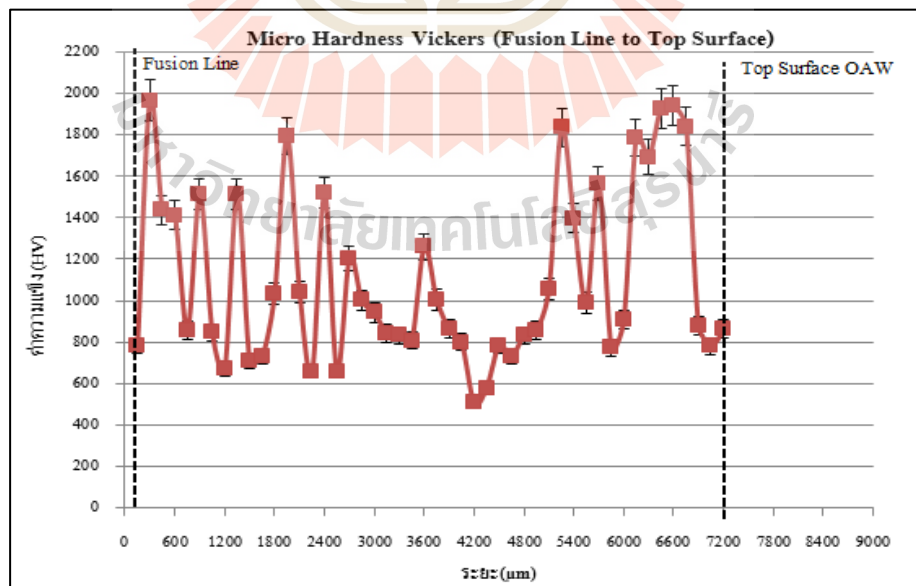
ตารางที่ 4.2 ความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น

ระยะ(μm.)	ความแข็งHV	ระยะ(μm.)	ความแข็งHV
	OAW		OAW
150	783.3	3750	1005.3
300	1965.3	3900	863
450	1436.4	4050	799.1
600	1410.5	4200	507.2
750	858.3	4350	579.7
900	1512.3	4500	783.3
1050	846.2	4650	730.9
1200	671.9	4800	832.9
1350	1514.7	4950	856.9
1500	709.9	5100	1055.3
1650	732.2	5250	1834.4
1800	1035.4	5400	1397.8
1950	1793	5550	989.6
2100	1043.9	5700	1564.9
2250	657.2	5850	772
2400	1519.4	6000	906
2550	657.7	6150	1787.9
2700	1204.7	6300	1692.5
2850	1001	6450	1928.4
3000	941.8	6600	1939.8
3150	842	6750	1838.6
3300	831.6	6900	880.9
3450	807.4	7050	780.7
3600	1259.1	7200	862.7

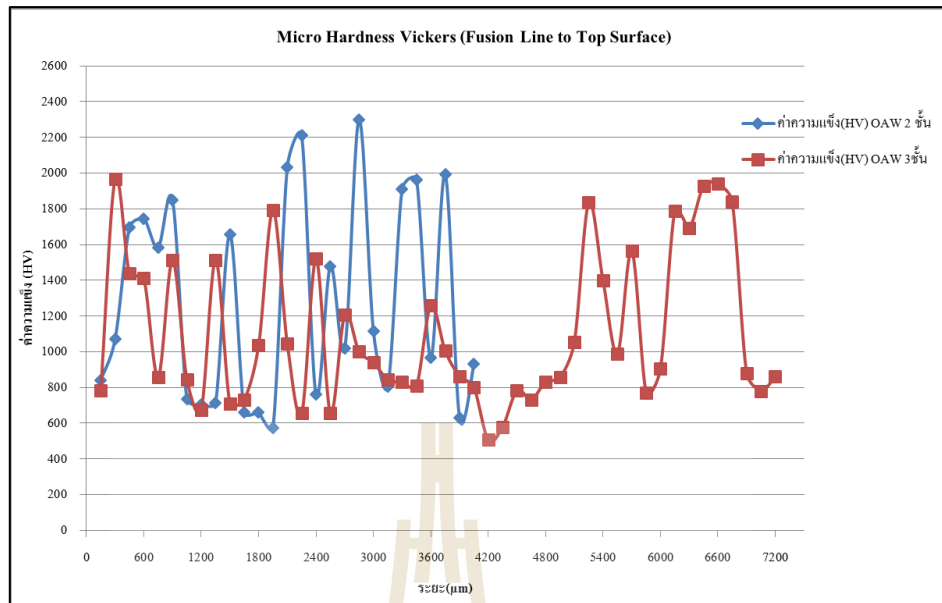
จากข้อมูลค่าความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น และ 3 ชั้น ในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 สามารถนำมาสร้างกราฟ แสดงความแข็งของของแนวเชื่อมในตำแหน่งต่างๆ ได้ดังรูปกราฟที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความแข็งของของแนวเชื่อม 2 ชั้น  
ของกระบวนการเชื่อมแบบ OAW



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความแข็งของของแนวเชื่อม 3 ชั้น  
ของกระบวนการเชื่อมแบบ OAW



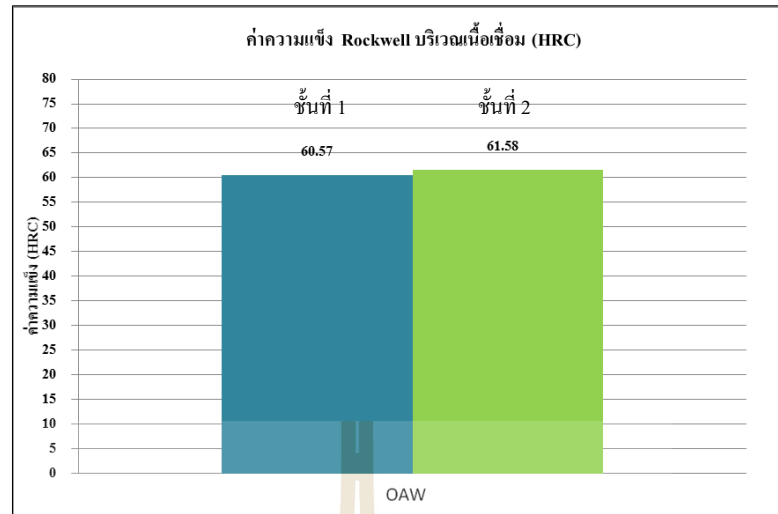
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแข็งของของแนวเชื่อม 2 ชั้น และ 3 ชั้น  
ของกระบวนการเชื่อมแบบ OAW

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงการกระจายตัวของความแข็งจากขอบรอยเชื่อม (Fusion Boundary) ไปจนถึงผิวด้านบนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (Top Surface) มีระยะประมาณ 6300  $\mu\text{m}$  พบว่า บริเวณที่เกิดถุกเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ทั่วทั้งแนว สังกเกตได้จากกราฟที่สูงสุดและต่ำสุด ซึ่งหมายถึงการกระจายตัวของเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ดีค่าความแข็งมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งการเชื่อมแบบ 2 ชั้น และ 3 ชั้นดังรูปที่ 4.18

#### 4.4.2 แบบ Rockwell

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลความแข็งแบบ Rockwell Hardness ของการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น

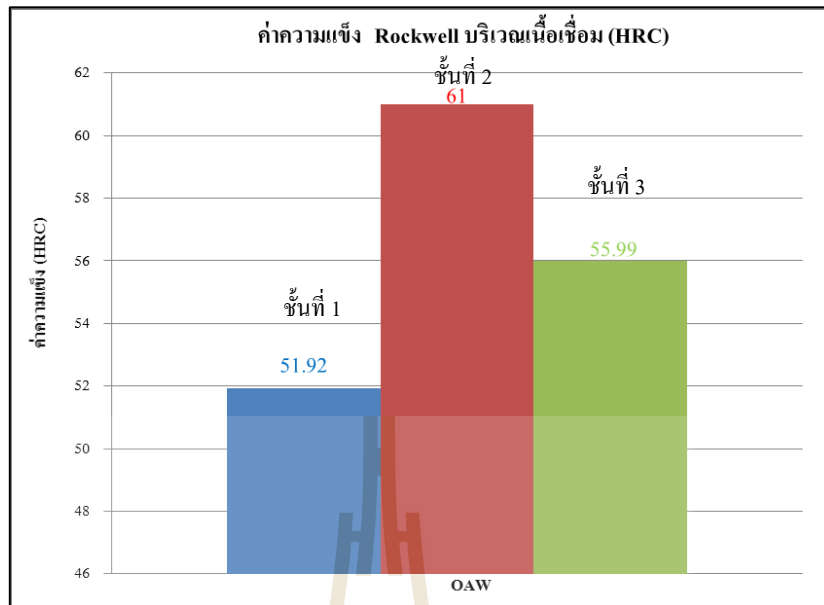
จุดที่	ค่าความแข็ง(HRC)		จุดที่	ค่าความแข็ง(HRC)	
	OAW			OAW	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1	59.6	59.6	6	58.9	58.7
2	58.4	61.4	7	62.5	57.5
3	60.7	62.8	8	55.2	58.4
4	61.8	65.4	9	61.7	65.6
5	64.2	63.3	10	62.7	63.1



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแข็งระหว่างกระบวนการเชื่อม OAW แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลความแข็งแบบ Rockwell Hardness ของการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น

จุดที่	ค่าความแข็ง(HRC)		
	OAW		
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
1	54.9	59.6	54.6
2	56.6	64.6	59.7
3	53	58.5	59.5
4	49.6	66.6	49.9
5	33.2	60.5	60
6	54.8	66.6	62.9
7	47.5	64.1	56.3
8	58.6	61.5	57.7
9	52.4	50.7	46.4
10	58.6	57.3	52.9



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแข็งของกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น

จากรูปที่ 4.19 ส่วนกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้นให้ค่าความแข็ง 60.57 HRC และจำนวน 2 ชั้นให้ค่าความแข็ง 61.58 HRC ส่วนรูปที่ 4.20 เป็นการเปรียบเทียบชิ้นงานเชื่อมทั้ง 3 ชั้น พบว่าแนวเชื่อมจำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น มีค่าความแข็งที่ดีขึ้นคือ จำนวน 1 ชั้น ให้ค่าความแข็ง 51.92 HRC และจำนวน 2 ชั้น ให้ค่าความแข็ง 61 HRC แต่แนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้น ให้ค่าความแข็งที่ลดลงจากจำนวน 2 ชั้น คือ 55.99 HRC เนื่องจากบริเวณผิวบนของแนวเชื่อม 3 ชั้นเกิดจากอิทธิพลของความร้อน ทำให้เกิดบ่อหลอมละลายที่ช้า ส่งผลทำให้การหลอมละลายของลวดเติม (Filler Metal) แนวไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็น โพรงอากาศ ทำให้ค่าความแข็งลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งของแนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้น ก็ยังให้ความแข็งที่สูง

#### 4.5 ผลทดสอบการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ Abrasive Resistance ตามมาตรฐาน ASTM G65

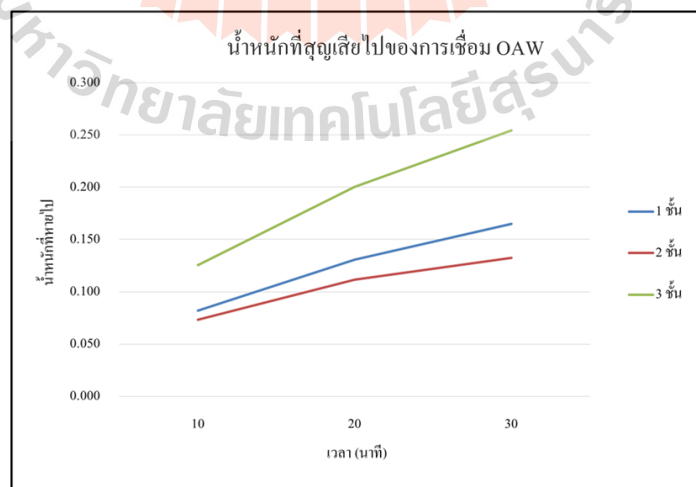
จากการทดสอบเพื่อศึกษาความต้านทานการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ (Abrasion Test) ตามมาตรฐาน ASTM G65 ของชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็งด้วยวิธีการ OAW โดยพิจารณาความต้านทานจากน้ำหนักของชิ้นงานที่สูญเสียไป

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลทดสอบการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ Abrasive Resistance ตาม  
มาตรฐาน ASTM G65 ของกระบวนการเชื่อม OAW

ประเภท	จำนวน ชั้น	ชั้นที่	น้ำหนัก ก่อน ทดสอบ	น้ำหนักหลังการทดสอบ			น้ำหนักที่หายไป		
				10 นาที (g)	20 นาที (g)	30 นาที (g)	10 นาที (g)	20 นาที (g)	30 นาที (g)
OAW	1	1	93.922	93.826	93.772	93.742	0.096	0.150	0.180
		2	95.242	95.163	95.122	95.089	0.079	0.120	0.153
		3	98.002	97.931	97.879	97.839	0.071	0.123	0.163
		Avg.	95.722	95.640	95.591	95.557	0.082	0.131	0.165
	2	1	153.366	153.290	153.251	153.231	0.076	0.115	0.135
		2	148.769	148.700	148.666	148.648	0.069	0.103	0.121
		3	150.447	150.372	150.330	150.305	0.075	0.117	0.142
		Avg.	150.861	150.787	150.749	150.728	0.073	0.112	0.133
	3	1	190.363	190.238	190.163	190.109	0.125	0.201	0.254
		2	189.102	188.965	188.671	188.809	0.137	0.231	0.293
		3	191.624	191.510	191.454	191.408	0.114	0.170	0.216
		Avg.	190.363	190.238	190.163	190.109	0.125	0.201	0.254

#### 4.5.1 วิเคราะห์ผลการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง

1) อัตราน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานของกระบวนการเชื่อม OAW ของ  
ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น

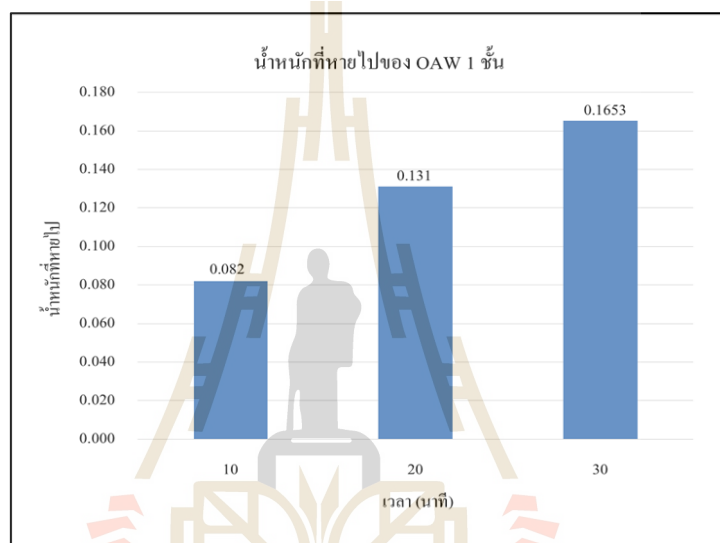


รูปที่ 4.21 แสดงกราฟแสดงเวลาและน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง  
จำนวนที่ 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ของกระบวนการเชื่อม OAW



จากรูปที่ 4.21 พบว่า อัตราน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น มีอัตราการต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด รองลงมาคือ 1 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นซึ่งมีความสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งคือ เนื่องจากบริเวณผิวบนของแนวเชื่อม 3 ชั้นเกิดจากอิทธิพลของความร้อน ทำให้เกิดบ่อหลอมละลายที่ช้า ส่งผลทำให้การหลอมละลายของลวดเติม (Filler Metal) แนวไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็นโพรงอากาศ ทำให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานการสึกหรอลดลง

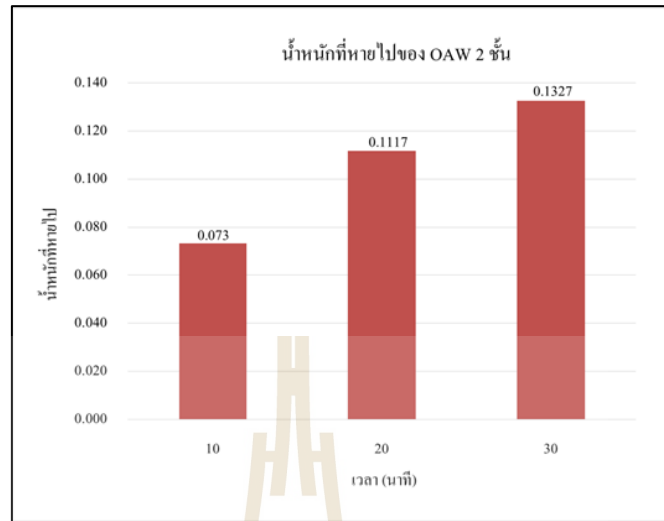
การเปรียบเทียบอัตราน้ำหนักที่หายไปของกระบวนการเชื่อม OAW ของชิ้นงาน 1 ชั้น



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลาของกระบวนการเชื่อม OAW ของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น

จากรูปที่ 4.22 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ (Abrasion Test) เมื่อทำการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปของกระบวนการ OAW พอกผิวแข็ง 1 ชั้น พบว่า ในแต่ละช่วงเวลามีระดับของน้ำหนักที่สูญเสียไปเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความแข็ง ซึ่งแสดงว่า บริเวณของผิวบนของแนวเชื่อมให้ค่าความต้านทานการสึกหรอและค่าความแข็งสูงสุด

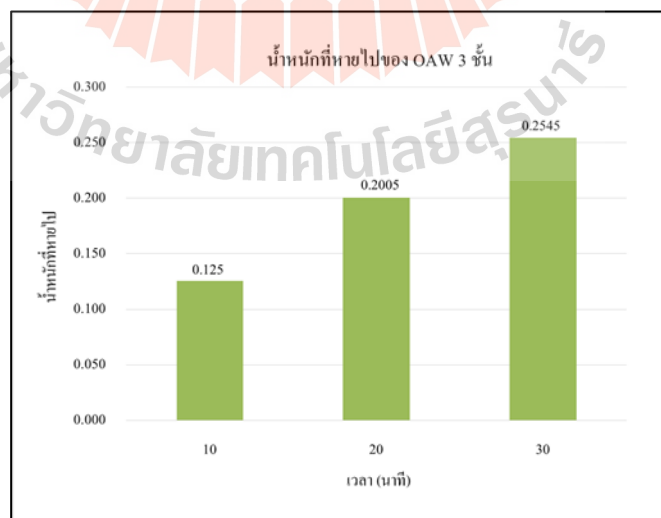
การเปรียบเทียบอัตราน้ำหนัที่หายไปของกระบวนการเชื่อม OAW ของชิ้นงาน 2 ชั้น



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลาของกระบวนการเชื่อม OAW ของชิ้นงาน 2 ชั้น

จากรูปที่ 4.23 พบว่า กระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น มีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งในช่วง 30 นาที

การเปรียบเทียบอัตราน้ำหนัที่หายไปของกระบวนการเชื่อม OAW ของชิ้นงาน 3 ชั้น



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราน้ำหนัที่หายไปกับเวลาของกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น

จากรูปที่ 4.24 พบว่า กระบวนการเชื่อม OAW ในแต่ละช่วงเวลาในการทดสอบมีการสูญเสียของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ดังที่กล่าวมาแล้วคือ บริเวณผิวบนของแนวเชื่อม 3 ชั้นเกิดจากอิทธิพลของความร้อน ทำให้เกิดบ่อหลอมละลายที่ชำรุด ส่งผลทำให้การหลอมละลายของสวดเติม (Filler Metal) แนวไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็นโพรงอากาศ ทำให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานการสึกหรอลดลง



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปผลการวิจัยได้เป็น 4 หัวข้อคือ

5.1.1 โครงสร้างมหภาค

5.1.2 โครงสร้างจุลภาค

5.1.3 สมบัติทางกล

5.1.4 การทดสอบการต้านทานการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

##### 5.1.1 โครงสร้างมหภาค

1) ความสูงของเนื้อเชื่อมและการหลอมลึก

จากการตรวจสอบ โครงสร้างแบบมหภาคของแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW ระหว่าง 2 ชั้นและ 3 ชั้น พบว่า กระบวนการเชื่อม OAW ซึ่งไม่มีการใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ต้องใช้ระยะเวลาของความร้อนในการสร้างบ่อหลอมละลาย ทำให้ลวดเติม (Filler Metal) เกิดการหลอมละลายได้รวดเร็วและเกิดการหลอมลึกได้น้อย

2) การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ในแนวเชื่อม

การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ ของกระบวนการเชื่อม OAW แนวเชื่อมทั้ง 3 ชั้น กับวัสดุพื้น การหลอมละลายจากความร้อนที่ไม่มีการใช้กระแสไฟฟ้าและไม่มีการเกิดแรงดันของไฟฟ้า ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของเม็ดคาร์ไบด์น้อยไม่เกิดการตกตะกอน การกระจายอย่างอิสระทั่วทั้งบริเวณของชั้นแนวเชื่อม

### 3) ปริมาณเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์

ในการวัดปริมาณจะเลือกส่วนที่มีการกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอ พบว่า เม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ในกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้นจะให้ขนาดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีการกระจายตัวของเม็ดทั้งสแตนที่สม่ำเสมอตลอดเนื้อเชื่อม

#### 5.1.2 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone) การเชื่อม OAW ทั้ง 2 ชั้นและ 3 ชั้น เป็นโครงสร้างแบบเดนไดท์ประกอบด้วย เฟอไรท์และเพิร์ลไลท์ ให้เปอร์เซ็นต์ ที่ต่างกัน ซึ่งการเชื่อม OAW ในแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น จะให้ปริมาณของเพิร์ลไลท์สูงที่สุด และเม็ดเกรนมีความละเอียด การเชื่อม OAW การสร้างบ่อหลอมละลาย จะต้องใช้ระยะเวลา ทำให้ความร้อนสะสมในชิ้นงานมาก เมื่อมีการเย็นตัวในอากาศ ส่งผลทำให้เม็ดเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น

โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) เกิดเป็นโครงสร้างเฟอไรท์และเพิร์ลไลท์ ที่มองเห็นความแตกต่างกันได้ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการได้รับอิทธิพลจากความร้อนที่ต่างกัน และระยะเวลาในการเย็นตัวที่รวดเร็ว ส่งผลทำให้เม็ดเกรนมีความละเอียดขึ้น และให้ค่าความแข็งที่สูงขึ้นด้วย

โครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone) เกิดเป็น โครงสร้างเฟอไรท์ และเพิร์ลไลท์ ที่ความแตกต่าง ซึ่งโครงสร้างเฟอไรท์จะมีปริมาณที่สูง

#### 5.1.3 สมบัติทางกล

จากการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness) ชิ้นงานจะให้ค่าความแข็งที่สูง ทำการกดชิ้นงานในแนวตั้ง วัดจากขอบรอยเชื่อม (Fusion Boundary) ไปจนถึงผิวด้านบนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (Top Surface) การเชื่อม OAW จะให้ค่าเฉลี่ย 1281.49 HV แนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้น จะให้ความแข็งเฉลี่ย 1108.85 HV ซึ่งบริเวณที่มีความแข็งสูงจะเป็นการกดสัมผัสกับเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแบบ Rockwell ที่ทำการกดชิ้นงานในแนวนอน แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้นจะให้ค่าความแข็งเฉลี่ย 61 HRC ซึ่งเป็นค่าความแข็งที่สูงที่สุด

#### 5.1.4 การทดสอบการต้านทานการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

การทดสอบการต้านทานการสึกหรอของการเชื่อม OAW โดยใช้ความเร็วเฉลี่ยที่ 3.1 เซนติเมตรต่อนาที พบว่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งจำนวน 2 ชั้นมีการต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด รองลงมาคือการเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้นและ 3 ชั้นตามลำดับ

การเปรียบเทียบชิ้นงานในการทดสอบ เมื่อมีการเชื่อมพอกผิวเพิ่มขึ้นจำนวน 3 ชั้น เกิดการกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ดีในทุกๆระดับชั้นของแนวเชื่อม ในแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น

จะให้ค่าความแข็งสูงที่สุด และค่าความต้านการสึกหรอสูงที่สุด แต่เมื่อทำการทดสอบแนวเชื่อม 3 ชั้น ค่าความแข็งเกิดการลดต่ำลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความต้านทานการสึกหรอที่มีการลดต่ำลงเช่นเดียวกัน ส่งผลมาจากการให้ความร้อนบริเวณผิวบนของแนวเชื่อม 3 ชั้น อิทธิพลของความร้อน ทำให้เกิดบ่อหลอมละลายที่ช้า ส่งผลทำให้การความร้อนในการหลอมละลายของลวดเติม (Filler Metal) ไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็นโพรงอากาศในบางส่วน ทำให้ค่าความแข็งลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งของแนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้น ก็ยังให้ความแข็งที่สูง ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานที่เหมาะสม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการเชื่อมงานด้วยคน จะต้องมีความชำนาญในด้วงานเชื่อมสูง อาจทำให้เกิดการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานได้

5.2.2 ในการทดสอบการสึกหรอควรมีการทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานมีความเรียบบริเวณผิวทดสอบ เพราะจะให้ค่าในการทดสอบการสึกหรอมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น

5.2.3 ควรมีการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมในส่วนของ การควบคุมอุณหภูมิ และการเย็นตัวของงานเชื่อมเพื่อไม่ให้เกิดการบิดของชิ้นงานและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค

## บรรณานุกรม

1. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2556). **สถิติการเกษตรของประเทศไทย** พิมพ์ที่ ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. นนทบุรี
2. กรมการส่งเสริมการเกษตร (2556-2559). **แผนยุทธศาสตร์กรมส่งเสริมการเกษตร**
3. สุขอังคณา ดี และคณะ (2555). **การเปรียบเทียบความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางระหว่างการอบชุบและการพอกผิวสำหรับงานด้านทันตการเสียดสี**. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
4. ขงยุทธ คลยกุล และคณะ (2555). **ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของการเชื่อมพอกผิววัสดุเหล็ก AS3678 เกรด 350**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา.
5. G. R. C. Pradeep, A. Ramesh, B. Durga Prasad (2555). Hardfacing of AISI 1020 Steel by Arc Welding in Comparison with TIG Welding Process. Mechanical Engineering JNTUA, Anantapur, India.
6. X. Wang, L. Cheng, M. Zhang, and Z. Zou. 2009. Fabrication of Multiple Carbide Particles Reinforced Fe-based Surface Hardfacing Layer Produced by Gas Tungsten Arc Welding Process. Surface and Coatings Technology 203 (8) : 976 – 980
7. นพกร ภู่อะรัมย์และอิสรทัต พึ่งอิน. **การศึกษาคุณสมบัติโลหะเชื่อมโดยการจำลองทางกายภาพ**. ศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุง สำนักงานวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สาขาวิศวกรรมการเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
8. วิชิต เลื่อมใส สุรชัย ขจรเดชะศักดิ์และอุดม สมไชยา. (2554) **การศึกษาและพัฒนาวิธีการทำงานที่มีผลต่อการโค้งงอของบานประตูเตาอบอ่อนจากการเชื่อมมิกซ์**. กลุ่มวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
9. ] <https://sites.google.com/site/karcheuxmkas/home/hlak-kar-cheuxm-loha-dwy-kaes-xxk-si-xasethilin> [วันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ 2559]
10. เหล็กรูปพรรณ มาตรฐาน JIS SS400  
[http://www.sb-trademark.co.th/product-metal-steel\\_JIS.php](http://www.sb-trademark.co.th/product-metal-steel_JIS.php)

11. อภิชาติ พานิชกุลและอุษณีย์ กิตกำธร. **การวัดความแข็ง**. การอบชุบด้วยความร้อน หน่วยวิจัยการประยุกต์ใช้ความรู้ทางโลหะวิทยาสำหรับการขึ้นรูปโลหะ(IMIARU)สาขาวิชาวิศวกรรมโลหะการสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
[http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement\\_Of\\_Hardness.html](http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html)
12. วิวัฒน์ โตนิล.(2558) **โลหะวิทยา**. สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ : 313-321
13. [http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/images/stories/files/published/39no2-6\(1\).pdf](http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/images/stories/files/published/39no2-6(1).pdf)  
[วันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ 2559]
14. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the DrySand/Rubber Wheel Apparatus.
15. “Sliding abrasion test (ASTMG65)”Online  
[http://www.creusabro.com/concept/laboratry\\_wear\\_tests/sliding.aspx](http://www.creusabro.com/concept/laboratry_wear_tests/sliding.aspx)
16. สมนึก วัฒนศรีกุล.(2549) **การทดสอบวัสดุ**. ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
17. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. **คู่มือแนวทางปฏิบัติที่เป็นเลิศในการตรวจสอบอุปกรณ์รับแรงดัน**. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย โครงการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต โดยการศึกษาพัฒนาวิธีการปฏิบัติเพื่อตรวจสอบอุปกรณ์รับแรงดันสำหรับอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล.
18. ไพบูลย์ หาญมนต์. **การศึกษาอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมที่มีผลต่อการหลอมลึกความกว้าง ความสูงและบริเวณกระทบร้อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโดยกระบวนการเชื่อมมิก**. สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล กรุงเทพมหานคร.
19. นพกร ภูระยัมและอิสรทัต พึ่งอัน. **การศึกษาคูณสมบัติโลหะเชื่อมโดยการจำลองทางกายภาพ**. ศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุง สำนักงานวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สาขาวิศวกรรมการเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
20. S. Yamamoto in. Arc welding of specific steel and cast irons. Edited by Thechnointer Publication/Shinko welding service Publishing.Japan (2008).
21. Kita shinagawa, Shinagawa ku, Tokyo. Arc welding of specific steel and cast irons. Published by Kobe steel, LTD. Japan (2015).



22. สุรัถยา ถิ่นนา (2553). *การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงด้าของผิวเชื่อมพอกของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340*. สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
23. สุพร ฤทธิภักดี . *พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็ก AISI 1020*. วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
24. G. R. C. Pradeep, A. Ramesh, B. Durga Prasad (2555). Hardfacing of AISI 1020 Steel by Arc Welding in Comparison with TIG Welding Process. Mechanical Engineering JNTUA, Anantapur, India.
25. อธิวิษณุ อามิตร. (2557). *เปรียบเทียบอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันในการเชื่อมพอกผิวแข็ง*. (ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
26. R. C. Shivamurthy, M. Kamaraj, R.Nagarajan, S. M. Shariff and G. Padmanabham. (2010). Slurry Erosion Characteristics and Erosive Wear Mechanisms of Co-Based and Ni-Based Coatings Fofmed by Laser Surface Alloying. Metallurgical and Materials Transaction A (2): 470-486
27. D. Kesavan and M. Kamaraj. ( 2010) . The Microstructure and high temperature were performance of a nickel base hardfaced coating. Surface and cortings Technology 204 (24): 4034-4043
28. R. Llewellyn and C. Tuite, (1995). Hardfacing Fights Wear in oil Sand Operation. Welding Journal 74 (Mar): 55-60
29. X.Wang, L. Cheng, M. Zhang, and Z.Zou. (2009). Fabrication of Multiple Carbide Paticles Reinforced Fe-based Surface hardfacing layer Produced by Gas Tungsten arc Welding Process. Surface and coating and Technology 203 (8): 976-980
30. L. Zong, Z.J. Liu. (2011). Microstructure and Wear Proties of Fe-Based Alloy Hardfacing Layers. Advanced Material Research 291-294: 201-204


31. N. Phuraya, and I. Phung-on, A Study of the Properties of Weld Metal on Hardfacing Weld Metal, Proceedings of RSU Research Conference 2008, 3 April 2008, Bangkok, Thailand.





ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมวัสดุ SS400 และตารางการทดลอง

		7/6/2559 17:30:47						
Method:	Fe-10						7/6/2559 17:29:45	
Comment:	low alloy steel	Element concentration						
Sample Name:	SS400							
	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.152	0.0403	0.802	0.0269	0.0097	0.0319	0.0025	0.0152
2	0.152	0.0318	0.791	0.0295	0.0092	0.0327	0.0023	0.0151
3	0.154	0.0307	0.770	0.0277	0.0091	0.0320	0.0024	0.0153
< x > (3)	<b>0.152</b>	<b>0.0343</b>	<b>0.788</b>	<b>0.0280</b>	<b>0.0093</b>	<b>0.0322</b>	<b>0.0024</b>	<b>0.0152</b>
sd	0.0012	0.0053	0.0165	0.0014	0.00030	0.00041	0.00011	0.00007
rsd	0.8	15.3	2.1	4.9	3.2	1.3	4.6	0.4
	<b>Al</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0509	0.0049	0.0185	< 0.00020	0.0033	0.0013	0.0042	0.00082
2	0.0491	0.0044	0.0196	< 0.00020	0.0036	0.0010	0.0035	0.00081
3	0.0480	0.0055	0.0202	< 0.00020	0.0037	0.0013	0.0050	0.0011
< x > (3)	<b>0.0493</b>	<b>0.0050</b>	<b>0.0194</b>	<b>&lt; 0.00020</b>	<b>0.0035</b>	<b>0.0012</b>	<b>0.0042</b>	<b>0.00092</b>
sd	0.0014	0.00056	0.00084	0.00000	0.00025	0.00016	0.00074	0.00018
rsd	2.9	11.3	4.3	0.0	7.2	13.4	17.7	20.0
	<b>Sn</b>	<b>Zr</b>	<b>Bi</b>	<b>Ca</b>	<b>Ce</b>	<b>Sb</b>	<b>Se</b>	<b>Te</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0024	0.00035	0.0017	0.0010	0.00091	0.0045	0.0172	< 0.0010
2	0.0023	0.00042	0.0020	0.00074	0.00099	0.0053	0.0177	< 0.0010
3	0.0025	0.00042	0.0020	0.00057	0.0012	0.0046	0.0178	< 0.0010
< x > (3)	<b>0.0024</b>	<b>0.00040</b>	<b>0.0019</b>	<b>0.00077</b>	<b>0.0010</b>	<b>0.0048</b>	<b>0.0176</b>	<b>&lt; 0.0010</b>
sd	0.00013	0.00004	0.00015	0.00023	0.00014	0.00044	0.00036	0.00000
rsd	5.4	9.9	7.8	29.2	13.9	9.2	2.0	0.0
	<b>Ta</b>	<b>B</b>	<b>Ag</b>	<b>N</b>	<b>Fe</b>			
	%	%	%	%	%			
1	0.0062	< 0.00010	< 0.00004	0.0194	98.7			
2	0.0059	< 0.00010	0.00007	< 0.00040	98.8			
3	0.0054	< 0.00010	0.00009	0.0260	98.7			
< x > (3)	<b>0.0058</b>	<b>&lt; 0.00010</b>	<b>0.00007</b>	<b>0.0153</b>	<b>98.7</b>			
sd	0.00040	0.00000	0.00003	0.0133	0.0199			
rsd	6.9	0.0	39.9	87.1	0.0			

รูปที่ ก.1 แสดงตารางผลการวิเคราะห์ส่วนผสมของวัสดุ SS400

ตารางที่ ก.1 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 1, 2, 3 ของชั้นที่ 1

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
1	1	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	47	482	542	2.03	5/28/2559
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	235	621	473	2.25	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	227	650	485	2.33	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	243	637	574	3.19	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	244	601	630	3.44	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	246	637	614	3.11	
		7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	611	598	3.08	
2	1	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	44	471	373	2.46	5/27/2559
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	229	612	535	2.31	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	241	660	512	3.04	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	245	744	506	2.38	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	246	570	487	2.18	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	598	429	2.29	
		7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	224	627	709	2.29	

ตารางที่ ก.1 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 1, 2, 3 ของชั้นที่ 1 (ต่อ)

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
3	1	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	87	686	464	2.30	5/26/2559
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	220	513	506	2.12	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	721	508	3.08	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	215	705	597	2.52	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	210	701	480	2.14	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	224	721	564	2.31	
		7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	238	711	712	1.58	



ตารางที่ ก.2 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 4 ของชั้นที่ 1, 2

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
4	1	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	42	598	512	1.56	5/28/2559
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	242	604	465	2.10	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	230	602	560	3.29	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	241	652	506	2.47	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	608	577	3.25	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	240	620	636	3.23	
	2	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	239	599	600	2.58	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	224	632	505	2.58	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	246	640	599	2.57	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	241	671	630	3.48	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	241	627	589	4.37	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	665	574	4.27	

ตารางที่ ก.3 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 5 ของชั้นที่ 1, 2

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
5	1	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	65	648	598	1.30	5/26/2559
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	239	578	449	1.52	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	246	748	620	2.05	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	229	665	641	2.05	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	245	642	609	1.55	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	241	646	651	2.20	
	2	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	239	741	670	2.44	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	792	682	3.00	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	239	733	720	2.46	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	243	727	714	3.03	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	736	724	3.18	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	246	708	702	2.50	



ตารางที่ ก.4 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 6 ของชั้นที่ 1, 2

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
6	1	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	70	407	386	1.25	5/26/2559
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	224	615	493	1.47	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	215	691	611	2.06	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	244	527	444	2.09	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	700	641	2.26	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	238	711	592	2.31	
		7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	244	719	599	2.28	
	2	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	233	744	593	2.38	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	247	707	659	2.43	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	782	686	2.42	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	759	744	3.03	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	765	609	2.58	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	830	816	2.54	

ตารางที่ ก.5 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 7 ของชั้นที่ 1, 2, 3

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชั้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ	
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม			
7	1	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	54	632	621	1.27	5/31/2559	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	637	600	1.32		
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	635	653	1.54		
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	247	716	683	2.02		
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	753	795	2.10		
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	247	661	649	2.32		
		7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	647	903	2.42		
		8	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	244	642	806	2.28		
			1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	246	675	684	2.14	
		2	2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	758	814	2.26	
			3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	732	723	3.05	
			4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	834	641	3.26	
			5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	246	815	802	3.41	
			6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	863	938	3.52	
	7		GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	245	826	889	3.24		

		1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	734	774	3.38	
--	--	---	-----	-------	----------	-----	-----	-----	-----	-----	------	--

ตารางที่ ก.5 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 7 ของชั้นที่ 1, 2, 3 (ต่อ)

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
7	3	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	734	774	3.38	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	717	822	3.42	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	796	823	4.43	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	767	818	3.24	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	247	845	713	4.30	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	851	809	3.39	

ตารางที่ ก.6 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 8 ของชั้นที่ 1, 2, 3

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
8	1	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	74	460	423	1.45	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	242	662	761	1.48	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	247	666	616	2.33	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	714	749	2.30	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	245	813	846	2.53	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	245	679	595	2.25	
		7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	757	694	3.11	
		8	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	709	790	3.34	
	2	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	717	699	4.11	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	237	709	740	3.52	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	733	784	4.16	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	796	724	3.53	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	668	756	4.24	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	246	692	616	4.15	

		7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	720	807	4.06	
	3	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	245	776	1035	4.02	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	240	722	758	4.05	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	746	937	4.05	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	681	682	5.10	

ตารางที่ ก.6 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 8 ของชั้นที่ 1, 2, 3 (ต่อ)

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
8	3	5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	715	864	4.50	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	800	802	3.51	

ตารางที่ ก.7 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 9 ของชั้นที่ 1, 2, 3

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชั้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
9	1	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	39	833	708	2.38	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	704	632	2.47	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	695	810	2.59	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	232	692	766	3.15	
		5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	634	838	3.29	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	670	609	3.14	
		7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	711	672	2.50	
		8	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	671	648	2.36	
	2	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	741	781	3.23	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	245	691	672	3.51	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	723	885	4.12	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	773	935	4.23	

9	2	6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	249	679	940	4.16	
		7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	748	624	3.27	
	3	1	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	244	778	770	2.51	
		2	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	838	837	3.07	
		3	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	791	714	3.39	
		4	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	248	779	866	4.27	

ตารางที่ ก.7 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 9 ของชั้นที่ 1, 2, 3 (ต่อ)

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชั้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
9	3	5	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	250	833	894	3.54	
		6	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	244	806	797	4.05	





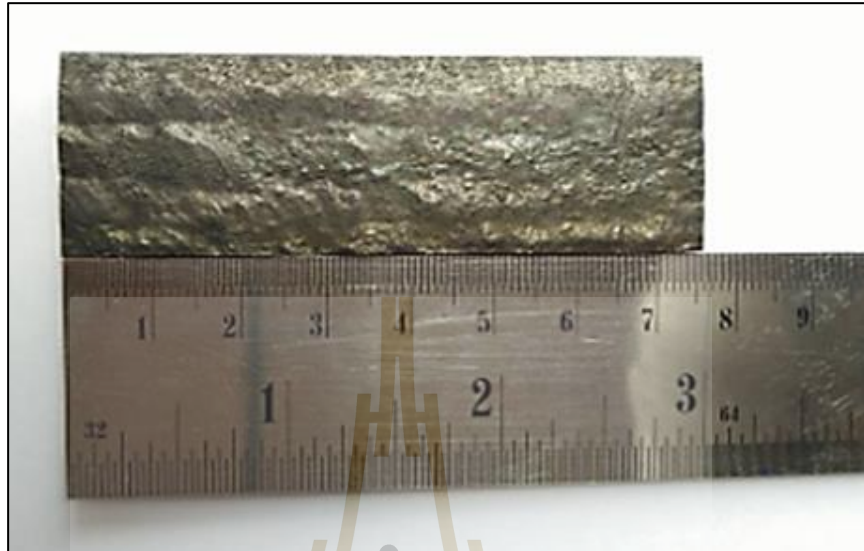




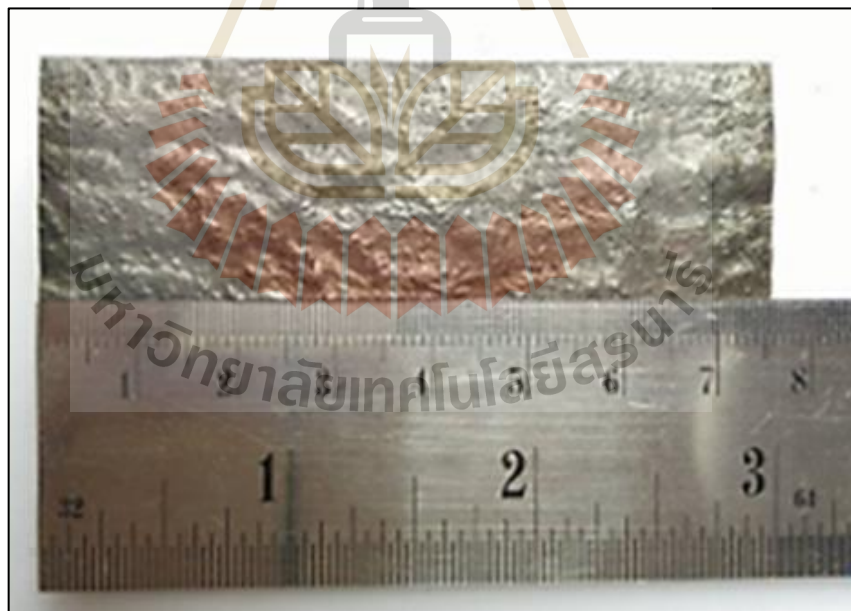
ภาคผนวก ข

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW

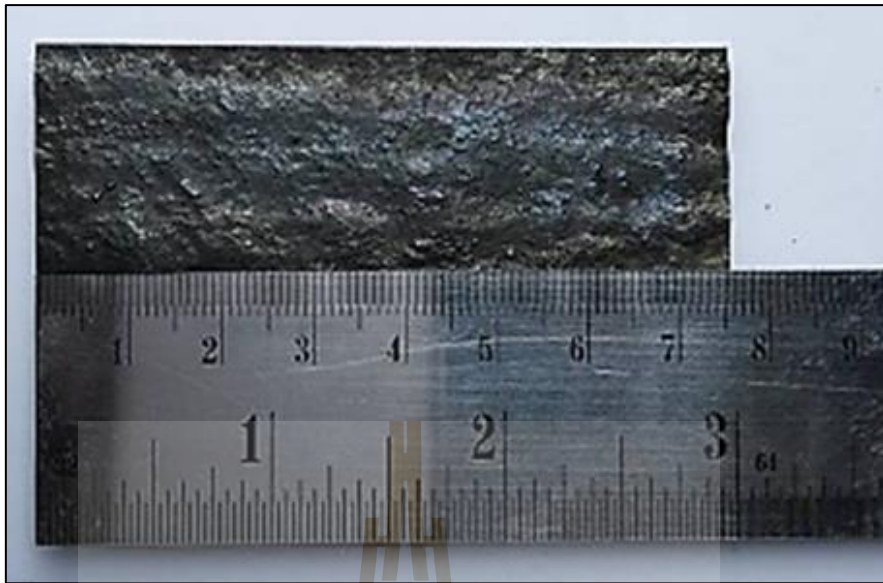
ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW (Oxy Acetylene gas Welding : OAW)



รูปที่ ข.1 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 1



รูปที่ ข.2 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2



รูปที่ ข.3 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 3



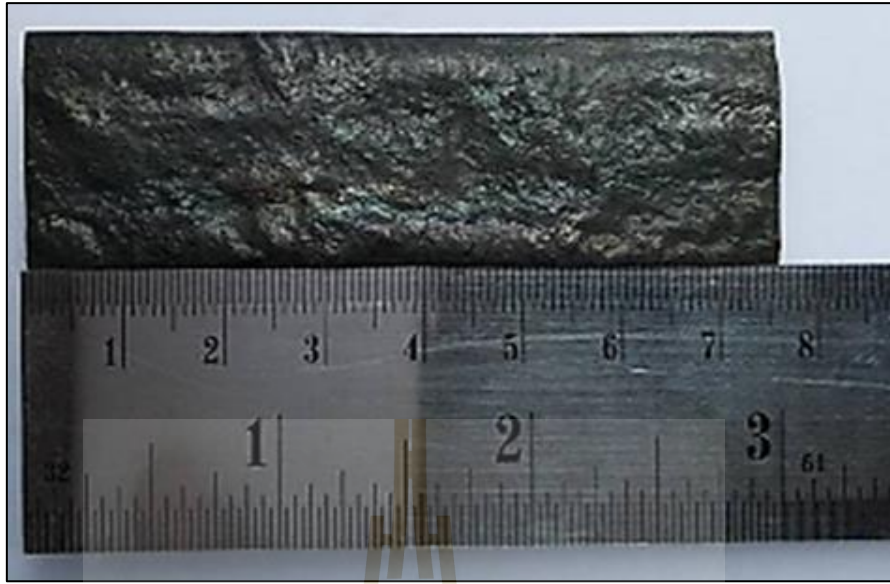
รูปที่ ข.4 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 1



รูปที่ ข.5 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 2



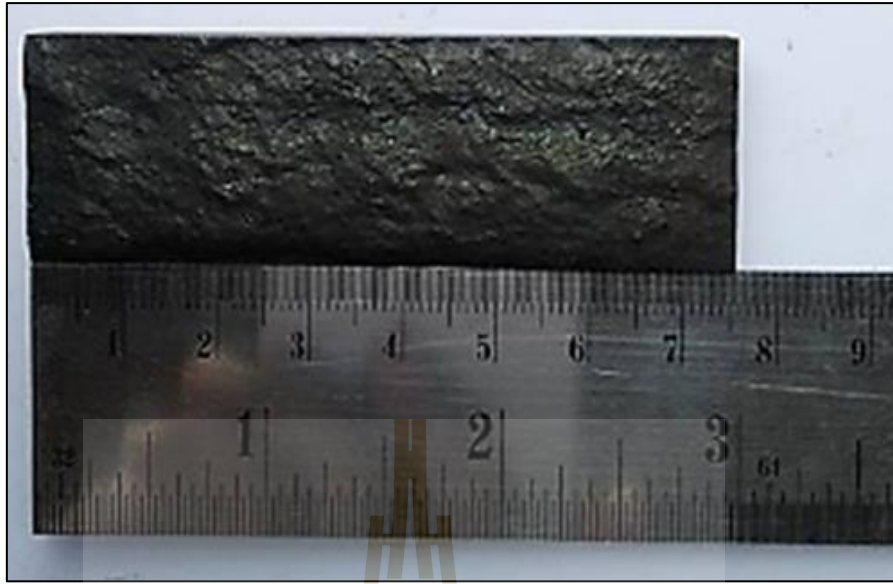
รูปที่ ข.6 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3



รูปที่ ข.7 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 1



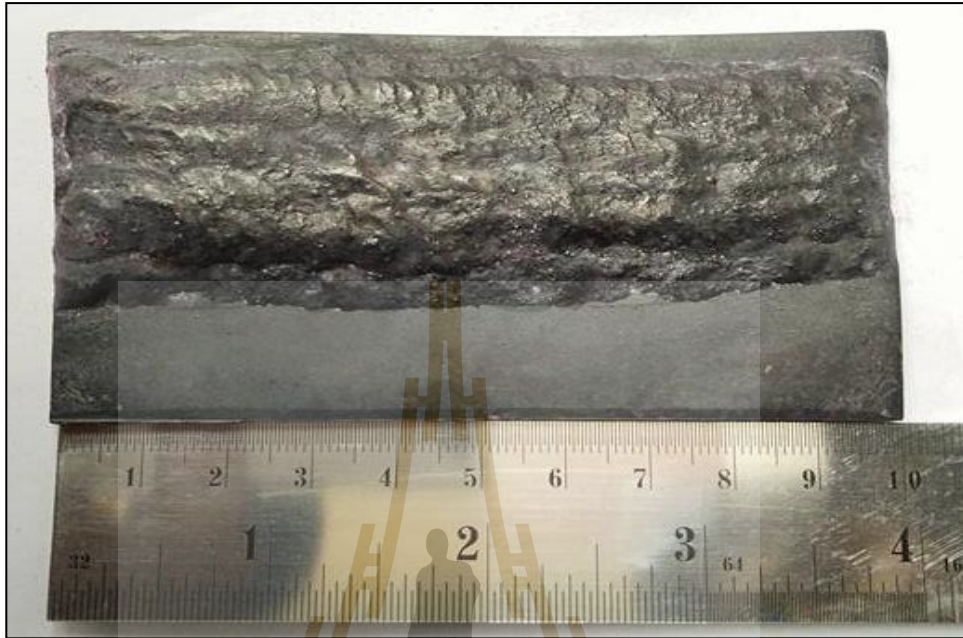
รูปที่ ข.8 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 2



รูปที่ ข.9 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 3



## ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึม (PT)



รูปที่ ข.10 แสดงชิ้นงานทดสอบ PT ของการเชื่อม OAW



รูปที่ ข.11 แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Penetrant ของการเชื่อม OAW



รูปที่ ข.12 แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Developer ของการเชื่อม OAW







ภาคผนวก ก.

ใบผลการทดสอบของกล้องจุลทรรศน์



## Stream Report

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$

### Sample Results:

aa	Sample 01
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 12:25:45
Standard	ASTM A 247

Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Ferrite / Pearlite Ratio	72.0% / 28.0%
Total Particles per $\text{mm}^2$	0.000
Total nodular particles per $\text{mm}^2$	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Weld zone OAW 2ชั้น  
Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Summary)



## Stream Report

**Analysis summary:**

Reference Group	Sample 01	
Sample Comment	This sample is produced by dilato	
Date	9/6/2559 11:06:47	
Standard	ASTM E112	
ASTM Grain Size Number G	10.33	+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		8.92
Elongation		1.40
Average Number of Intercepts		214.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		112.10

**Sample Results:**

Reference Group	Sample 01	
ASTM Grain Size Number G	10.33 +/- 0.00	
Mean Intercept Length [μm]		8.92
Elongation		1.40
Average Number of Intercepts		214.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0.11
Sample Comment	This sample is produced by dilatometers. We war	



Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Image Results)



## Stream Report



**Sample Information:**

Reference : Sample 01  
Group :

**Image Results:**

Image Name	weld	214
Number of Intercepts		1908.95
Pattern Length		
Image Comment	point 1	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Cast Iron analysis  
(Summary)



## Stream Report

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$

### Sample Results:

aa	WZ
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 11:12:00
Standard	ASTM A 247

Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Ferrite / Pearlite Ratio	44.6% / 55.4%
Total Particles per $\text{mm}^2$	0.000
Total nodular particles per $\text{mm}^2$	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

HAZ zone OAW 2 ชั้น  
Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Summary)



## Stream Report

**Analysis summary:**

Reference	Sample 01		
Group			
Sample Comment	This sample is produced by dilato		
Date	9/6/2559 11:00:36		
Standard	ASTM E112		
ASTM Grain Size Number G	11.24		+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		6.51	
Elongation		0.94	
Average Number of Intercepts		271.00	
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		153.55	

**Sample Results:**

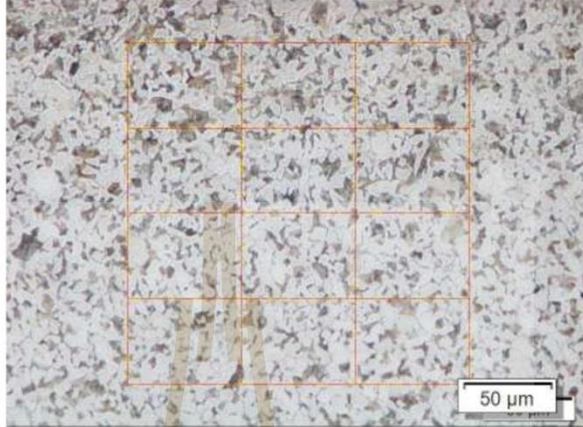
Reference	Sample 01		
Group			
ASTM Grain Size Number G	11.24 +/- 0.00		
Mean Intercept Length [μm]		6.51	
Elongation		0.94	
Average Number of Intercepts		271.00	
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0.15	
Sample Comment	This sample is produced by dilatometers. We war		



Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Image Results)



## Stream Report



**Sample Information:**

Reference : Sample 01  
Group :

**Image Results:**

Image Name	HAZ.tif	271
Number of Intercepts		1764.88
Pattern Length		
Image Comment	point 1	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Cast Iron analysis  
(Summary)



## Stream Report

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	82255.45 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	82255.45 $\mu\text{m}^2$

### Sample Results:

aa	HAZ
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 11:03:21
Standard	ASTM A 247

Total Number of Images	1
Total Sample Area	82255.45 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	82255.45 $\mu\text{m}^2$
Ferrite / Pearlite Ratio	68.7% / 31.3%
Total Particles per $\text{mm}^2$	0.000
Total nodular particles per $\text{mm}^2$	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Base zone OAW 2 ชั้น

Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Summary)





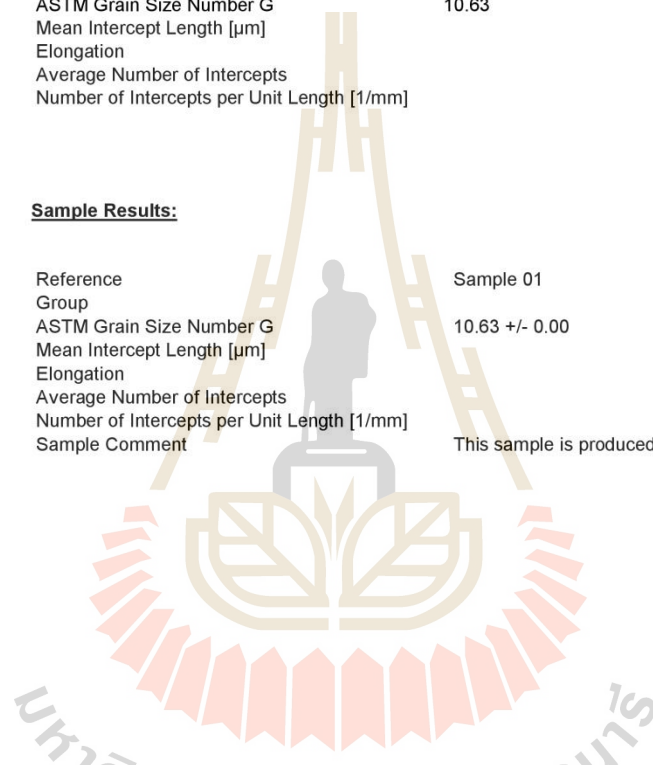
## Stream Report

**Analysis summary:**

Reference Group	Sample 01	
Sample Comment	This sample is produced by dilato	
Date	9/6/2559 10:50:22	
Standard	ASTM E112	
ASTM Grain Size Number G	10.63	+/- 0.00
Mean Intercept Length [µm]		8.03
Elongation		1.21
Average Number of Intercepts		199.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		124.59

**Sample Results:**

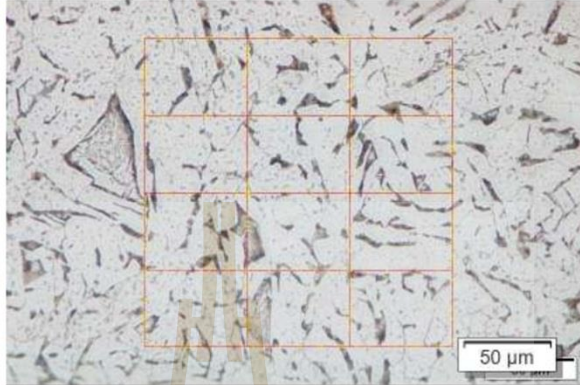
Reference Group	Sample 01	
ASTM Grain Size Number G	10.63 +/- 0.00	
Mean Intercept Length [µm]		8.03
Elongation		1.21
Average Number of Intercepts		199.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0.12
Sample Comment	This sample is produced by dilatometers. We war	



Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Image Results)



## Stream Report



**Sample Information:**

Reference : Sample 01  
Group :

**Image Results:**

Image Name	base	199
Number of Intercepts		1597.21
Pattern Length		
Image Comment	point 1	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Cast Iron analysis  
(Summary)



## Stream Report

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	74703.65 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	74703.65 $\mu\text{m}^2$

### Sample Results:

aa	BASE
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 10:53:39
Standard	ASTM A 247

Total Number of Images	1
Total Sample Area	74703.65 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	74703.65 $\mu\text{m}^2$
Ferrite / Pearlite Ratio	72.8% / 27.2%
Total Particles per $\text{mm}^2$	0.000
Total nodular particles per $\text{mm}^2$	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Weld zone OAW 3 ชั้น

Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Summary)



## Stream Report

**Analysis summary:**

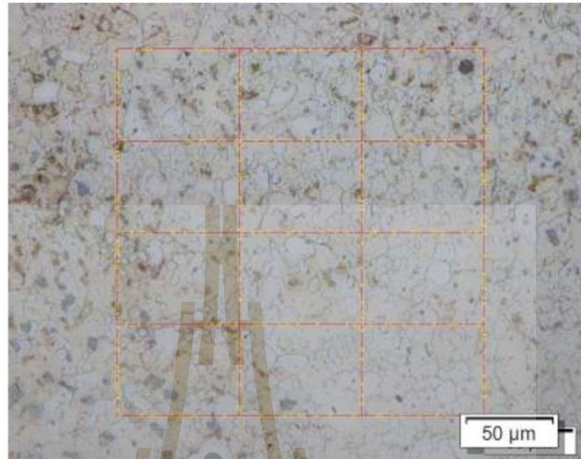
Reference Group	Sample 01	
Sample Comment	This sample is produced by dilato	
Date	9/6/2559 11:33:05	
Standard	ASTM E112	
ASTM Grain Size Number G	11.04	+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		6.97
Elongation		1.18
Average Number of Intercepts		274.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		143.53

**Sample Results:**

Reference Group	Sample 01	
ASTM Grain Size Number G	11.04 +/- 0.00	
Mean Intercept Length [μm]		6.97
Elongation		1.18
Average Number of Intercepts		274.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0.14
Sample Comment	This sample is produced by dilatometers. We war	



Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Image Results)

**Sample Information:**

Reference : Sample 01  
Group :

**Image Results:**

Image Name	weld	274
Number of Intercepts		1908.95
Pattern Length		
Image Comment	point 1	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Cast Iron analysis  
(Summary)



## Stream Report

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$

### Sample Results:

aa	Sample 01
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 11:35:18
Standard	ASTM A 247

Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Ferrite / Pearlite Ratio	70.6% / 29.4%
Total Particles per $\text{mm}^2$	0.000
Total nodular particles per $\text{mm}^2$	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

HAZ zone OAW 3 ชั้น

Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Summary)



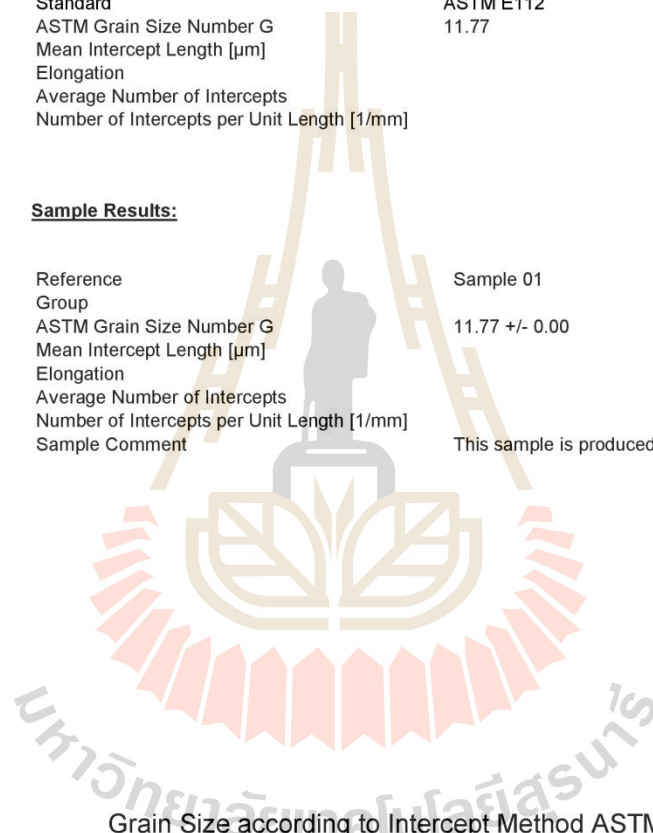
## Stream Report

**Analysis summary:**

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment	This sample is produced by dilato	
Date	9/6/2559 11:28:00	
Standard	ASTM E112	
ASTM Grain Size Number G	11.77	+/- 0.00
Mean Intercept Length [ $\mu\text{m}$ ]		5.42
Elongation		0.97
Average Number of Intercepts		352.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		184.39

**Sample Results:**

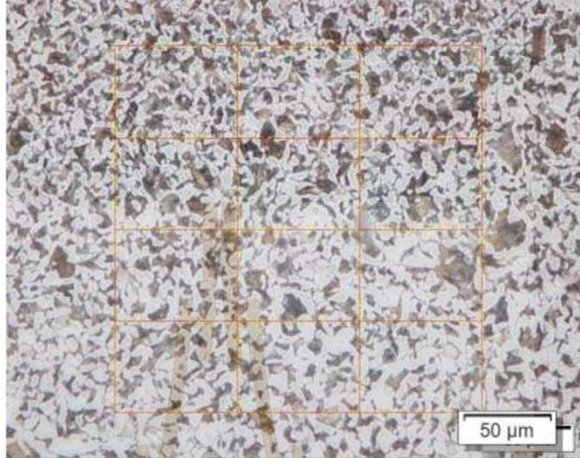
Reference	Sample 01	
Group		
ASTM Grain Size Number G	11.77 +/- 0.00	
Mean Intercept Length [ $\mu\text{m}$ ]		5.42
Elongation		0.97
Average Number of Intercepts		352.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0.18
Sample Comment	This sample is produced by dilatometers. We war	



Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Image Results)



## Stream Report



**Sample Information:**

Reference : Sample 01  
Group :

**Image Results:**

Image Name	HAZ	352
Number of Intercepts		1908.95
Pattern Length		
Image Comment	point 1	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Cast Iron analysis  
(Summary)





## Stream Report

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$

### Sample Results:

aa	Sample 01
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 11:29:32
Standard	ASTM A 247

Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Ferrite / Pearlite Ratio	58.7% / 41.3%
Total Particles per $\text{mm}^2$	0.000
Total nodular particles per $\text{mm}^2$	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Base zone OAW 3 ชั้น  
Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Summary)



## Stream Report

**Analysis summary:**

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment	This sample is produced by dilato	
Date	9/6/2559 11:15:25	
Standard	ASTM E112	
ASTM Grain Size Number G	10.08	+/- 0.00
Mean Intercept Length [ $\mu\text{m}$ ]		9.74
Elongation		1.11
Average Number of Intercepts		196.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		102.67

**Sample Results:**

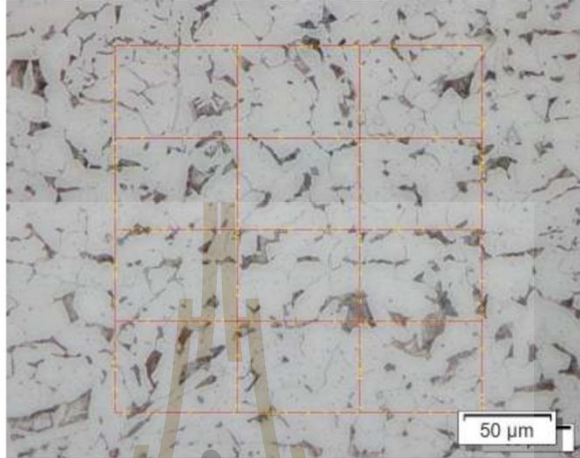
Reference	Sample 01	
Group		
ASTM Grain Size Number G	10.08 +/- 0.00	
Mean Intercept Length [ $\mu\text{m}$ ]		9.74
Elongation		1.11
Average Number of Intercepts		196.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0.10
Sample Comment	This sample is produced by dilatometers. We war	



Grain Size according to Intercept Method ASTM E112  
(Image Results)



## Stream Report



**Sample Information:**

Reference : Sample 01  
Group :

**Image Results:**

Image Name	base.tif	196
Number of Intercepts		1908.95
Pattern Length		
Image Comment	point 1	



Cast Iron analysis  
(Summary)



## Stream Report

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$

### Sample Results:

aa	base
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 11:18:58
Standard	ASTM A 247

Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Etched Sample Area	89509.85 $\mu\text{m}^2$
Ferrite / Pearlite Ratio	78.2% / 21.8%
Total Particles per $\text{mm}^2$	0.000
Total nodular particles per $\text{mm}^2$	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ประวัตินักวิจัย

จกกล ศรีธร เกิดเมื่อวันที่ 14 มกราคม พ.ศ.2521 ที่จังหวัดปทุมธานี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปีพ.ศ. 2542 และจบการศึกษาระดับปริญญาโทจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปีพ.ศ. 2544 หลังจากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกร ประจำห้องปฏิบัติการยานยนต์ ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สวทช. และได้รับทุนรัฐบาลไปศึกษาต่อระดับปริญญาเอก ที่ประเทศอังกฤษ ณ University of Nottingham เมื่อปีพ.ศ. 2548 ในสาขา Manufacturing Engineering and Operations Management โดยสำเร็จการศึกษาเมื่อปีพ.ศ. 2552 และกลับมาทำงานในตำแหน่งนักวิจัย ห้องปฏิบัติการระบบอัตโนมัติและแมคคาทรอนิกส์ที่ MTEC เป็นเวลา 4 ปีก่อนจะย้ายมาเป็นอาจารย์ที่ มทส. เมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2556 จนถึงปัจจุบัน

# COMPARISON OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HARD-FACING WELDS GENERATED BY GTAW AND OAW WELDING PROCESSES

Jongkol Srithorn<sup>1</sup>, Kampon Promsupha<sup>2</sup>

School of Industrial Engineering, Institutes of Engineering,

Suranaree University of Technology

E-Mail: Jongkol@sut.ac.th

## ABSTRACT

There are many welding processes can be used to perform hard-facing welds. The objective of this research is to compare the microstructure and mechanical properties of the welds that performed by two welding processes: oxyacetylene and gas tungsten arc welding. Base metal is low carbon steel and fused tungsten carbide is used as a filler metal. Various experiments are carried out by that processes. For GTAW, the current are varied from 90 to 120 ampere at constant welding speed. Carburizing flame is used in oxyacetylene welding process. The result is exhibited that at the current of 110 ampere the distribution of tungsten carbide in weld metal is even. The hardness of the welds using OAW is higher than that of GTAW process which is 868.86 HV and 664.5 HV in respectively. For the welds microstructure of both processes are consisted of ferrite and pearlite with fine grain structure. In addition, the welding speed has an effect on the microstructure and mechanical properties of the welds.

## 1. INTRODUCTION

Nowaday, welding processs has been developed for convenience for further use and greater efficiency. Different welding methods cause different welding efficiency, dilution ration, and welding cost. Therefore, consideration must be given to welding process selection in order to fulfil requirement of work (W.Wo & L.T.Wu,1996). Effect of heat input is another factor influencing bead quality such as penetration, width, height, and heat affected zone (HAZ) of metal (Cited Dec 21 2015).

Hard-facing welding process is a popular method for repairing surface of worn parts. Several factors affecting result of welding include type of electrode, material type and so on (Sukangkana Lee, 2012). Operating hard-facing welding process must consider the appropriateness of material and welding process since these factors can increase service life of parts (Yongyuth Donyakul, 2012).

Oxy Acetylene Gas Welding is one of the processes used in hard-facing welding process since it is convenient and provides high temperature. It can penetrate high hardness materials such as tungsten carbide. However, the use of acetylene must consider operation safety and law (N. Parkin & C.R. Flood 1979). Different welding method results in mechanical properties and microstructure of metal.

The objective of this research is to compare microstructure and mechanical properties of hard-facing welding process using Tungsten Inert Gas Welding Method and Oxy Acetylene Welding Method. Materials used in hard-facing welding is Fused Tungsten Carbide: Fused WC.

## 2. EXPERIMENT

### 2.1 Experimental Apparatus

Materials used in this study is SS400 grade carbon steel with dimension of 100x150x12 mm. Electrodes used are Fused WC with 3.5 mm diameter. Hard-facing welded work pieces are then cut and only the middle of work pieces are used to test microstructure and mechanical properties (Figure 1).



Figure 1. Work piece for microstructure and mechanical properties testing.

### 2.2 Technique

#### 2.2.1 Experiment Design

For the method of Tungsten Inert Gas Welding, the welding parameters are current, voltage, tip angle, and

welding speed (Table 1). Welding current is set at four levels (90, 100, 110, and 120 Amp). Welding current is important for mechanical properties (Noppakorn and Isaratat,2008) Voltage is 14.3 V. and tip angle is 15°. Welding speeds used are 9.2, 11.2, and 15.3 cm/s. For the Oxy Acetylene Welding Method, the welding condition are shown in Table 2.

Table 1. Parameters of Tungsten Inert Gas Welding.

Welding parameters	Value
Welding current (Amp.)	90, 100, 110, 120
Welding voltage (V.)	14.3
Tip angle (degree)	15
Travel speed (cm/min)	9.2, 11.2, 15.3

Table 2. Parameters of Oxy Acetylene Welding.

Welding parameters	Value
Flame	Carburizing
Oxygen pressure (lb./in2)	3-5
Acetylene pressure (lb./in2)	3-5
Tip angle (degree)	15
Travel speed (cm/min)	4.3

### 2.2.2 Hardness Test

Result of hardness test can be used to analyze property of materials such as wear resistance (Somnuk Watanasriyakul,2006) For the hardness test in this study, the indentation is made on the work piece horizontally and vertically as shown in Figures 2 and 3. The welding current that provides the greatest hardness is selected to determine the travel speed with the greatest hardness.

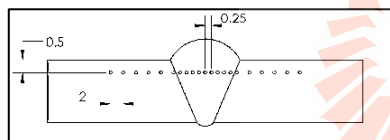


Figure 2. The horizontal indentation of the work piece.

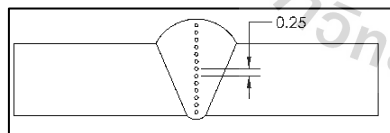


Figure 3. The vertical indentation of the work piece.

## 3. ANALYSIS

### 3.1 Hardness Test

The result of hardness test shows that Tungsten Inert Gas Welding with welding current of 110 Amp. provides the greatest hardness (664.5 HV). Then, the work pieces with current condition of 110 Amp. with different travel speeds are then compared. It is found that the travel speed of 11.2 cm/min yields the greatest hardness (Figure 4).

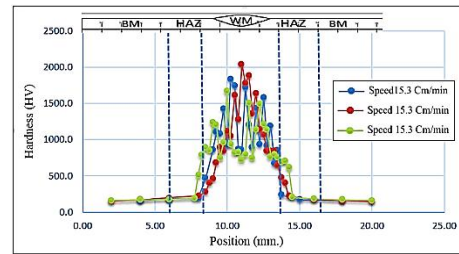


Figure 4. The relationship between travel speed and hardness

### 3.2 Macrostructure

After investigating the macrostructure of Tungsten Inert Gas Welding, it is found that different welding current influence welding bead (Figure 5). Welding current of 90 Amp. results in small bead and low penetration. This is because lower current causes rapid cooling. Therefore, tungsten carbide is spread all over the bead. Welding current of 100 Amp. makes it easier to control the melting of electrode and also results in perfect bead. By greater heat at the bead and the work piece, tungsten carbide is mostly placed at the bottom of the bead. For the 110 Amp. current, the electrode is well melted. The bead is perfect. The spread of tungsten carbide when using the 110 Amp. current is better than when using the 100 Amp. current. For the 120 Amp. current, the bead is wide and flat. Tungsten carbide is well spread. However, the penetration is too high. This can affect dilution of materials and change the mechanical properties (Noppakorn and Isaratat,2008).

Oxy Acetylene Welding with carburizing flame requires low oxygen flow rate. This can prevent the work piece from cracking of bead during welding and damage. Figure 6 shows that the bead is wider than the bead of Tungsten Inert Gas Welding and low penetration. Tungsten carbide is spread all over the bead. This helps controlling the flame of Acetylene feather (3x) to be twice longer than the flame of the inner cone (x) (Cited Dec 21 2015) as shown in Figure 7.

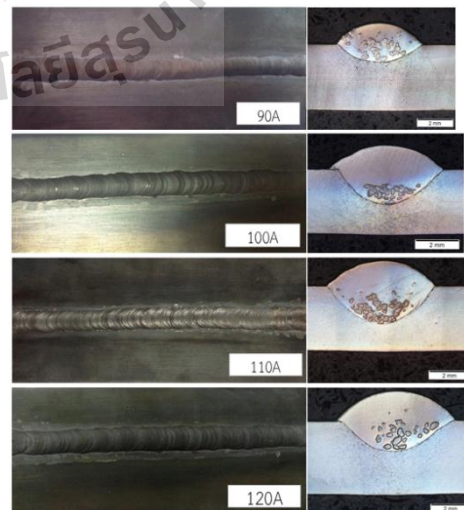


Figure 5. (a) TIG bead.



Figure 6. OAW bead.

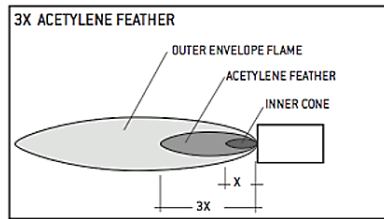


Figure 7. Oxy Acetylene flame (Cited Dec 21 2015).

### 3.2 Microstructure

Tungsten Inert Gas Welding has dendrite structure which composes of ferrite and pearlite. Different welding current and travel speed causes different percent of ferrite and pearlite as shown in Table 3. Lower welding current leads to bigger grain, whereas greater welding current leads to finer grain. Using 100 Amp. welding current brings about the similar microstructure as using 110 and 120 Amp. welding current. The grain size affects mechanical properties (Figures 7 and 8). Metals with small grain size and large number of grain have greater strength than those with big grain size and small number of grain. For the structure at HAZ area, the grain is long and fine. The grain of 90 Amp. welding current is bigger than that of 100 Amp. welding current. The grain sizes of 110 and 120 Amp. welding current are quite similar (Figures 7 and 8).

The microstructures of the Oxy Acetylene Welding and the Tungsten Inert Gas Welding are almost alike. From Table 3, it is obvious that the areas of weld metal, HAZ, and base metal of the Oxy Acetylene Welding shows high percent of pearlite. This is because the Oxy Acetylene Welding produces greater heat and thus greater amount of heat accumulated in the work piece (Figures 9 and 10).

Table 3. Percent of ferrite and pearlite for each welding current and process condition.

No.	Welding process	Current (A)	Position	Microstructure	
				Ferrite (%)	Pearlite (%)
1	TIG	90	Weld Metal	75.7	24.3
			HAZ	74.6 - 97.1	9.9 - 25.4
			Base Metal	82.5 - 88	12 - 17.5
2	TIG	100	Weld Metal	71 - 81.4	18.6 - 29
			HAZ	74.6 - 97.1	9.9 - 25.4
			Base Metal	82.5 - 88	12 - 17.5
3	TIG	110	Weld Metal	71 - 81.4	18.6 - 29
			HAZ	74.6 - 97.1	9.9 - 25.4
			Base Metal	82.5 - 88	12 - 17.5
4	TIG	120	Weld Metal	71 - 81.4	18.6 - 29
			HAZ	74.6 - 97.1	9.9 - 25.4
			Base Metal	82.5 - 88	12 - 17.5
5	OAW	Carburizing flame	Weld Metal	70 - 75	25 - 30
			HAZ	82.1	17.9
			Base Metal	82.1	17.9

Table 4. Percent of ferrite and pearlite at the travel speed of 11.2 and 15.3 cm./min.

Position	Microstructure			
	Ferrite (%)		Pearlite (%)	
	11.2 Cm/min	15.3 Cm/min	11.2 Cm/min	15.3 Cm/min
Weld Metal	71.0	79.5	20.5	29.0
HAZ	90.1	83	9.9	17
Base Metal	88	85.3	12	14.7

From Table 4, when using higher travelling speed, percents of ferrite and pearlite are greater at weld metal area. This is because speed reduces heat accumulated in the work piece. However, at HAZ and base metal areas, the cooling down is slow. This results in lower percent of pearlite but higher percent of ferrite (Figures 11, 12, and 13).

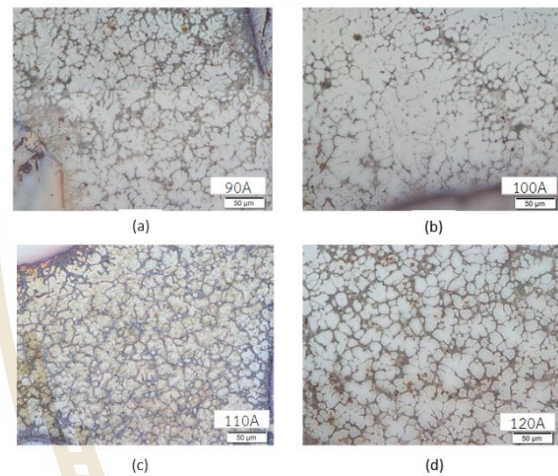


Figure 7. Microstructure at weld metal of Tungsten Inert Gas Welding.

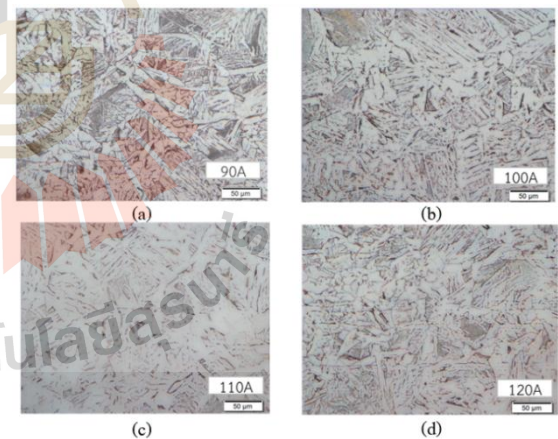


Figure 8. Microstructure at HAZ of Tungsten Inert Gas Welding.

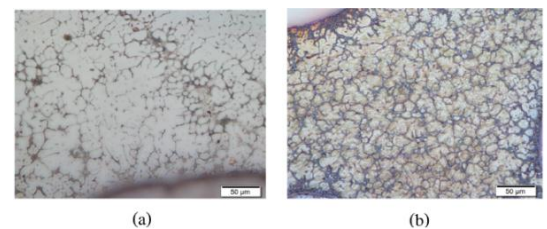


Figure 9. (a) Microstructure at weld metal area of Tungsten Inert Gas Welding. (b) Microstructure at weld metal area of Oxy Acetylene Welding.



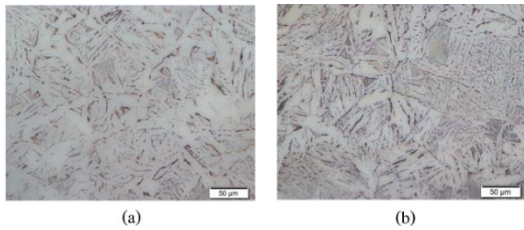


Figure 10. (a) Microstructure at HAZ area of Tungsten Inert Gas Welding. (b) Microstructure at HAZ area of Oxy Acetylene Welding.

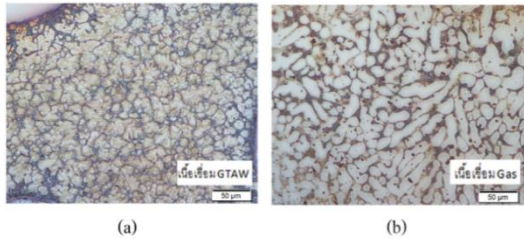


Figure 11. (a) Microstructure at weld metal area with travel speed of 11.2 cm./min. (b) Microstructure at weld metal area with travel speed of 15.3 cm./min.

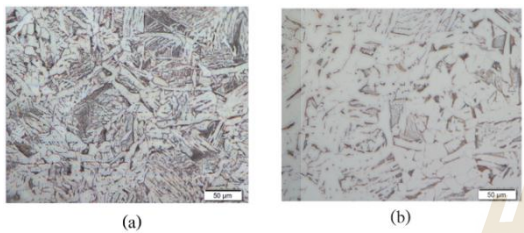


Figure 12. (a) Microstructure at HAZ area with travel speed of 11.2 cm./min. (b) Microstructure at HAZ area with travel speed of 15.3 cm./min.

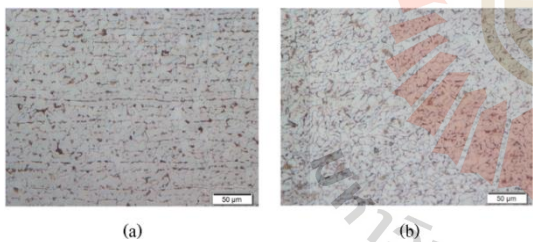


Figure 13. (a) Microstructure at base metal area with travel speed of 11.2 cm./min. (b) Microstructure at base metal area with travel speed of 15.3 cm./min.

## CONCLUSIONS

1. The process of Tungsten Inert Gas Welding with 110 Amp. welding current produces the most appropriate bead and the hardness of 664.5 HV. It also provides a well spread of tungsten carbide. Using the travel speed of 11.2 cm./min. results in high hardness and perfect bead.

2. For Oxy Acetylene Welding process with carburizing, it shows low penetration. Tungsten carbide is not melted with base metal. Since tungsten carbide is spread all over the bead, the bead has high hardness (868.86 HV).

3. Microstructure of both processes are ferrite and pearlite, but their grains are different. This affects mechanical structure of the materials.

## REFERENCES

W.Wo, L.-T.Wu, The wear behavior between hardfacing material, *Metall. Mater. Trans. A* 27A 3639-3648. 1996.

Paiboon Hanmon, study of influence of heat input to penetration wideness height and heat affected zone(HAZ) in weld metal of stainless steel by metal inert gas welding process.[online].[Cited Dec 21 2015].From:[http://kuon.lit.b.ku.ac.th/cgi-bin/KUCON.exe?rec\\_id=011645&database=KUCON&search\\_type=link&table=mona&back\\_path=/KUCON/mona&lang=thai&format\\_name=TFMON](http://kuon.lit.b.ku.ac.th/cgi-bin/KUCON.exe?rec_id=011645&database=KUCON&search_type=link&table=mona&back_path=/KUCON/mona&lang=thai&format_name=TFMON)

Sukangkana Lee, A Comparison of Hardness of the Medium Carbon Steel between oil Quench and Hard facing Welding in the Application,2012.

Yongyuth Duniyakul, Investigation of Wear Behaviors of Surface Welding Steel AS3678 Grade350,2012.

N. Parkin and C.R. Flood. *Welding Craft Practice. CHAPTER 1 Oxy-Acetylene gas Welding. Second Edition. Pages 1-52. 1979.*

Noppakorn and Isaratat, Study Properties of Weld Metal by Physical Simulation,2008.

Somnuk Watanasriyakul, *Material Testing, 2006*

Hardfacing deposit methods Oxygen-Acetylene process.[online].[Cited Dec 21 2015].From:<http://www.heralloys.com/hardfacing-deposit-methods-oxygen-acetylene-process#sthash.7dMXGrzw.dpuf>



**Jongkol Srithorn** received the B.Eng.(2001),from King Mongkut's University of Technology Thonburi B.Eng.(2001), from Chulalongkorn University, Ph.D. (2012), (Manufacturing & Operation Management).She is a Lecturer, Department of Industrial Engineering, Suranaree University of Technology.



**Kampon Promsupha** B.Eng.(Industrial engineering).(2011) From Rajamangala University of echnology isan. Currently Studying for Master Degree in Industrial Engineering, Suranaree University.