

กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับอุปกรณ์งานดิน
การเกษตรโดยกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน
และกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุม



นายคำพูน พรหมสุภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**HARDFACING PROCESS TUNGSTEN CARBIDE FOR
AGRICULTURAL EARTH MOVING BY OXY
ACETYLENE WELDING AND TUNGSTEN INERT GAS
WELDING PROCESSES**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2015**

กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับอุปกรณ์งานดินการเกษตร
โดยกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีนและกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสคลุม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.จنگล ศรีชร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อิสรทัต พึ่งอัน)

กรรมการ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ปภากร พิทยชาวล)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คำพูน พรหมสุภะ : กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับอุปกรณ์งานดิน
การเกษตรโดยกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีนและกระบวนการเชื่อมอาร์ค
ทั้งสแตนเลสคลุม (HARDFACING PROCESS TUNGSTEN CARBIDE FOR
AGRICULTURAL EARTH MOVING BY OXY ACETYLENE WELDING AND
TUNGSTEN INERT GAS WELDING PROCESSES) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์
ดร.จกกล ศรีธรรม, 151 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอทางเลือกในการเชื่อมซ่อมบำรุงเกี่ยวกับอุปกรณ์งานดินด้วย
กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง(Hardfacing Welding Process)ซึ่งทำการศึกษาระบวนการเชื่อม
2 กระบวนการคือ กระบวนการเชื่อม OAW และกระบวนการเชื่อม TIG วัสดุที่ใช้ในการเติมพอก
ผิวแข็งเป็นลวดเติมประเภททั้งสแตนคาร์ไบด์ ทำการศึกษาโครงสร้างมหภาค และ โครงสร้างจุลภาค
การทดสอบความแข็ง และการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM G65

ผลการศึกษาโครงสร้างมหภาคพบว่า แนวเชื่อม TIG จำนวน 1 ชั้น ทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีการ
รวมกลุ่มกันอยู่บริเวณด้านล่างของแนวเชื่อม เนื่องจากการเชื่อม TIG ใช้กระแสไฟฟ้าในการอาร์ค
ทำให้เกิดความร้อนสูงบริเวณบ่อหลอม ส่งผลทำให้เม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์เคลื่อนตัวเป็นอิสระและ
ตกลงด้านล่างของแนวเชื่อม ส่วนแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น และ 3 ชั้น พบว่า มีการกระจายตัวของ
ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ดีกว่าแนวเชื่อม 1 ชั้น เนื่องจากแนวเชื่อมมีปริมาณการเจือจางกับวัสดุพื้นทีลดลง
เม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์เกิดการเคลื่อนตัวน้อยลง ทำให้เกิดการกระจายตัวอยู่ทั่วไปของแนวเชื่อม ส่วน
แนวเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น พบว่า แนวเชื่อมไม่เกิดการหลอมลึก ทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการ
กระจายตัวที่ดีอยู่ทั่วบริเวณแนวเชื่อมทั้ง 2 ชั้น และ 3 ชั้น เนื่องจากการเชื่อม OAW จะให้ความร้อน
ที่แพร่กระจายเป็นทิศทางที่กว้าง ทำให้ลวดเติมเกิดการหลอมละลายได้รวดเร็วกว่าวัสดุพื้น
ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค พบว่า ชิ้นงานเกิดโครงสร้างเดนไดท์ ซึ่งประกอบไปด้วยเฟอร์ไรท์
และเพิร์ลไลต์ที่เหมือนกัน โดยการให้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความ
ร้อนในแต่ละกระบวนการเชื่อมที่ต่างกัน ซึ่งเมื่อมีการกระจายตัวของเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ดี มีผล
ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ชิ้นงานสามารถทนต่อความต้านทานการสึกหรอ

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

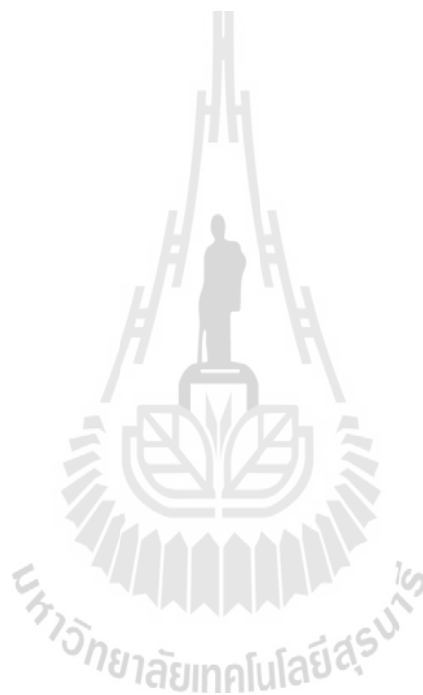
KAMPOON PROMSUPHA : HARDFACING PROCESS TUNGSTEN
CARBIDE FOR AGRICULTURAL EARTH MOVING BY OXY
ACETYLENE WELDING AND TUNGSTEN INERT GAS WELDING
PROCESSES. THESIS ADVISOR : JONGKOL SRITHORN, Ph.D., 151 PP.

HARDFACING/TUNGSTENCARBIDE/MICROSTRUCTUER/HARDNESS/
ABRASIVE WEAR TEST/TIG/OAW

This research presents the new optional welding repair method for earth moving equipment. Hard facing welds were performed by Oxyacetylene gas welding (OAW) and Tungsten inert gas welding (TIG). Carbon steel grade SS 400 was used as a base metal and fused tungsten carbide was selected as hard facing material. The properties of the welds will be evaluating in terms of macrostructure, microstructure, hardness testing and abrasive wear test (ASTMG65)

The macrostructure of the welds reveals that for the single layer of the welds performed by TIG, the tungsten carbides were found at the bottom of the weld due to the welding arc and high heat intensity. For the 2nd and 3rd layers of the welds the distribution of tungsten carbides was distributed on the top surface of deposit layer due to the lower dilution of the welds. The single layer of the welds carried out by OAW have no dilution and carbides were found at the top surface of the weld. The distribution of tungsten carbide in 2nd and 3rd layer of the welds was spread all over the weld due to the low heat intensity of OAW. For the welds microstructure of both processes are consisted of ferrite and pearlite with dendrite structure.

The percentage of ferrite and pearlite are different due to the cooling rate of the welding processes. The abrasive wear testing reveals that the distribution of the tungsten carbide has an effect on the wear resistance and the hardness of the welds.



School of Industrial Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความกรุณาและอนุเคราะห์ช่วยแนะนำช่วยเหลือเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จาก อาจารย์ ดร. จงกล ศรีธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศรทัต พึ่งอัน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วมที่กรุณาให้คำแนะนำปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องรวมถึงแนวทางการดำเนินงานที่ถูกต้องคณะผู้ทำการศึกษาจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

การจัดทำงานโครงการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ดีจากความช่วยเหลือและความร่วมมือจากคุณปริญญา นาคี คุณธกานต์ หวังสุดศิริคุณสาวศิริพรศิริวงศ์ คุณปนัดดาบุญธรรม คุณวโรบล เพ็ชรหมื่นไวย และ คุณปิยกมล คู่สุข นักศึกษาปริญญาตรี ที่คอยให้ความช่วยเหลือชี้แนะในเรื่องต่าง ๆ จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทำโครงการวิจัย จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ศูนย์อาคารเครื่องมือ 1 อาคารเครื่องมือ 2 และอาคารเครื่องมือ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่อำนวยความสะดวกในเรื่องของเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย ตลอดจนบุคลากรที่สนับสนุนมีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลในงานวิจัย และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม 3 และศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา อาคารเรียนรวม 1 ห้อง CB 1203 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลเป็นที่ปรึกษาในการทำโครงการฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ตลอดจนการดูแลและให้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะของการทำงานวิจัยข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คำพูน พรหมสุภา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของกระบวนการเชื่อมโลหะ.....	7
2.2 หลักการของกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (OAW).....	8
2.3 หลักการของกระบวนการเชื่อมทิก (TIG).....	9
2.4 ข้อมูลพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400.....	10
2.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test).....	11
2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical Investigation).....	13
2.7 การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65.....	14
2.8 การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing).....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9 ความร้อนในการเชื่อม (Heat Input).....	19
2.10 ความเจือจางของโลหะ (Dilution).....	19
2.11 การโปรแกรม PLC.....	21
3 การศึกษาและวิธีการดำเนินการ.....	25
3.1 แผนผังการดำเนินงานเชื่อมในงานวิจัย.....	26
3.2 เครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย.....	27
3.3 การกำหนดปัจจัยและออกแบบการทดลอง.....	34
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	35
4 ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง.....	42
4.1 การศึกษาโครงสร้างมหภาค.....	42
4.2 ผลทดลองการวัดขนาดของทั้งสแตนคาร์ไบด์.....	46
4.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	51
4.4 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing).....	57
4.5 ผลทดสอบการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ Abrasive Resistance ตามมาตรฐาน ASTM G65.....	64
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมวัสดุ SS400 และตารางการทดลอง.....	77
ภาคผนวก ข. ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW.....	101
ภาคผนวก ค. ใบผลการทดสอบของกล้องจุลทรรศน์.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	151

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานวิจัย..... 4
2.1	คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า SS400..... 11
2.2	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 11
2.3	ค่าความแข็งโดยประมาณของเกรนเหล็กกล้า..... 13
3.1	ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม OAW..... 34
3.2	ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม TIG..... 35
4.1	ค่าความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 2 ชั้น..... 57
4.2	ค่าความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 3 ชั้น..... 58
4.3	ข้อมูลความแข็งแบบ Rockwell Hardness ของการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 2 ชั้น..... 61
4.4	ข้อมูลความแข็งแบบ Rockwell Hardness ของการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 3 ชั้น..... 62
4.5	ข้อมูลทดสอบการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ Abrasive Resistance ตามมาตรฐาน ASTM G65 ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW..... 64
ก.1	การบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 1, 2, 3 ของชั้นที่ 1..... 79
ก.2	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 4 ของชั้นที่ 1, 2..... 81
ก.3	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 5 ของชั้นที่ 1, 2..... 82
ก.4	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 6 ของชั้นที่ 1, 2..... 83
ก.5	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 7 ของชั้นที่ 1, 2, 3..... 84
ก.6	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 8 ของชั้นที่ 1, 2, 3..... 86
ก.7	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม OAW ของชั้นที่ 9 ของชั้นที่ 1, 2, 3..... 88
ก.8	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 1, 2, 3 ชั้นที่ 1..... 90
ก.9	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 4 ชั้นที่ 1, 2..... 92
ก.10	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 5 ชั้นที่ 1, 2..... 93
ก.11	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 6 ชั้นที่ 1, 2..... 94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก.12	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 7 ชั้นที่ 1, 2, 3.....95
ก.13	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 8 ชั้นที่ 1, 2, 3.....97
ก.14	แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 9 ชั้นที่ 1, 2, 3.....99



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงการกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส	12
2.2	แสดงตัวอย่างเครื่องทดสอบการสึกหรอ ASTM G65	15
2.3	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 1	16
2.4	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 2	16
2.5	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 3	17
2.6	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 4	18
2.7	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 5	18
2.8	แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 6	19
2.9	แสดงความเจือจางของโลหะ (Dilution)	20
3.1	แผนผังการดำเนินงานเชื่อมในงานวิจัย	26
3.2	เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง	27
3.3	ชุดอุปกรณ์กระบวนการเชื่อมด้วยแก๊สอะเซทิลีน	28
3.4	เครื่องตัด Wire Cut	28
3.5	เครื่องทดสอบการสึกหรอ	29
3.6	เครื่องอัดเรซิน	29
3.7	เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน	30
3.8	เครื่องขัดผงอะลูมินา (Al ₂ O ₃)	30
3.9	กล้องจุลทรรศน์	31
3.10	เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400	31
3.11	ลวดเชื่อมทั้งสแตนคาร์ไบด์	32
3.12	ชุดน้ำยาสารแทรกซึม	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Vicker Hardness Test).....	33
3.14 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test).....	33
3.15 ชั้นงานในการทดสอบ.....	35
3.16 ชั้นงานเชื่อมTIG จำนวน 1 ชั้น.....	36
3.17 ชั้นงานเชื่อมTIG จำนวน 2 ชั้น.....	36
3.18 ชั้นงานเชื่อม TIG จำนวน 3 ชั้น.....	36
3.19 ชั้นงานเชื่อมOAWจำนวน 1 ชั้น.....	37
3.20 ชั้นงานเชื่อมOAWจำนวน 2 ชั้น.....	37
3.21 ชั้นงานเชื่อมOAWจำนวน 3 ชั้น.....	37
3.22 ชั้นงานเชื่อม TIG ที่ผ่านการตัดสำหรับทดสอบการสึกหรอ.....	38
3.23 ชั้นงานเชื่อม OAW ที่ผ่านการตัดสำหรับทดสอบการสึกหรอ.....	38
3.24 ขนาดและตำแหน่งในการตัดชิ้นงานของการเชื่อม OAW.....	39
3.25 ขนาดและตำแหน่งในการตัดชิ้นงานของการเชื่อม TIG.....	40
3.26 ชั้นงานอัดเรซินสำหรับทดสอบ โครงสร้างจุลภาคและความแข็ง.....	40
3.27 ตัวอย่างตำแหน่งและชั้นงานทดสอบความแข็งแบบMicro Vickers Hardness.....	41
3.28 ตัวอย่างตำแหน่งและชั้นงานทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Test.....	41
4.1 ลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม TIG จำนวน 1 ชั้น.....	43
4.2 การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมTIG จำนวน 1 ชั้น.....	43
4.3 ลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม TIG จำนวน 2 ชั้น.....	44
4.4 การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมTIG จำนวน 2 ชั้น.....	44
4.5 ลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น.....	44
4.6 การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมOAW จำนวน 2 ชั้น.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	ลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม TIG จำนวน 3 ชั้น 45
4.8	การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG ของแนวเชื่อม 3 ชั้น 46
4.9	ลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น 46
4.10	การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อม 3 ชั้น 46
4.11	ขนาดเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์กระบวนการเชื่อม TIG และ OAW 47
4.12	กราฟแสดงจำนวนเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อมทิก TIG และ OAW จำนวน 1 ชั้น 48
4.13	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 1 ชั้น 48
4.14	กราฟแสดงจำนวนเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อมทิก TIG และ OAW จำนวน 2 ชั้น 49
4.15	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 2 ชั้น 49
4.16	กราฟแสดงจำนวนเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อมทิก TIG และ OAW จำนวน 3 ชั้น 50
4.17	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 3 ชั้น 50
4.18	โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 2 ชั้น 51
4.19	โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 3 ชั้น 52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	โครงสร้างบริเวณ Weld Metal, Fusion Zone, HAZ, และ Base Zone ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมทิก TIG และ OAW จำนวน 2 ชั้น53
4.21	โครงสร้างบริเวณ Weld Metal, Fusion Zone, HAZ, และ Base Zone ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมทิก TIG และ OAW 3 ชั้น54
4.22	โครงสร้างจุดภาคบริเวณ HAZ ของกระบวนการเชื่อม GTAW และ OAW 2ชั้น55
4.23	โครงสร้างจุดภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการ เชื่อมแบบ TIG และ OAW ของแนวเชื่อม 2 ชั้น56
4.24	โครงสร้างจุดภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมทิก TIG และ OAWของแนวเชื่อม 3 ชั้น56
4.25	กราฟเปรียบเทียบความแข็งของกระบวนการเชื่อม 2 ชั้น ของกระบวนการเชื่อม TIG กับ OAW60
4.26	กราฟเปรียบเทียบความแข็งของกระบวนการเชื่อม 3 ชั้น ของกระบวนการเชื่อม TIG กับ OAW60
4.27	กราฟเปรียบเทียบความแข็งระหว่างกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น62
4.28	กราฟเปรียบเทียบความแข็งของกระบวนการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 3 ชั้น63
4.29	กราฟแสดงเวลาและน้ำหนักที่สูญหายไปของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง จำนวนที่ 1, 2 และ 3 ชั้นของกระบวนการเชื่อม TIG65
4.30	กราฟแสดงเวลาและน้ำหนักที่สูญหายไปของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง จำนวนที่ 1, 2 และ 3 ชั้นของกระบวนการเชื่อม OAW66
4.31	กราฟแสดงเวลาและน้ำหนักที่สูญหายไปของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง จำนวนที่ 1, 2 และ 3 ชั้น ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	กราฟแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลาของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW ของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น 68
4.33	กราฟแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลาของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW ของชิ้นงาน 2 ชั้น 68
4.34	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราน้ำหนักที่หายไปกับเวลาของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 3 ชั้น 69
ก.1	ตารางผลการวิเคราะห์ส่วนผสมของวัสดุ SS400 78
ข.1	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 1 102
ข.2	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 102
ข.3	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 3 103
ข.4	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 1 103
ข.5	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 2 104
ข.6	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3 104
ข.7	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 1 105
ข.8	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 2 105
ข.9	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 3 106
ข.10	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 1 106
ข.11	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 107
ข.12	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 3 107
ข.13	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 1 108
ข.14	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 2 108
ข.15	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3 109
ข.16	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 1 109
ข.17	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 2 110
ข.18	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 3 110
ข.19	แสดงชิ้นงานทดสอบ PT ของการเชื่อม TIG 111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.20	แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Penetrant ของการเชื่อม TIG.....	111
ข.21	แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Developer ของการเชื่อม TIG.....	112
ข.22	แสดงชิ้นงานทดสอบ PT ของการเชื่อม OAW.....	112
ข.23	แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Penetrant ของการเชื่อม OAW.....	113
ข.24	แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Developer ของการเชื่อม OAW.....	113



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานเกษตรกรรมนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในประเทศ เพราะคนไทยส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ซึ่งนับว่าเป็นภาคการผลิตที่มีบทบาทสำคัญต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ เพราะนอกจากจะสร้างรายได้ให้กับครัวเรือนและธุรกิจทุกภาคส่วนในระบบห่วงโซ่ของสินค้าเกษตรแล้ว ยังสร้างรายได้ให้กับประเทศอีกด้วย [1] นอกจากนี้จะเป็นแหล่งรายได้หลักของคนส่วนใหญ่ของประเทศแล้ว ยังเป็นฐานในการสร้างมูลค่าเพิ่มของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งปัจจุบันสถานการณ์มีการเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลกระทบต่อภาคเกษตรกรรมที่มากขึ้น กรมการส่งเสริมการเกษตรในแผนปี 2556 ถึง 2559 ได้มีการมุ่งเน้นในเรื่องของการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุนให้ได้มากที่สุด [2] ในส่วนของการซ่อมบำรุงอุปกรณ์การเกษตรถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ช่วยลดต้นทุนในการสั่งซื้ออุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ ซึ่งอุปกรณ์เครื่องมือในการเกษตรที่ใช้กับงานดิน เช่น ไถ คราด รวมทั้งอุปกรณ์ในการขุดเจาะที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น เมื่อมีการใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่ง อุปกรณ์ดังกล่าวย่อมเกิดการสึกหรอหรือเสียหายขึ้น การซ่อมบำรุงบริเวณที่เกิดการเสียหายดังกล่าวจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ซึ่งในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์เกี่ยวกับงานดิน จะต้องให้ความสำคัญในเรื่องของผิวชิ้นงานที่จะต้องมีความแข็งแรงทนต่อการเสียดสีที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการที่สามารถทำให้วัสดุเกิดความแข็งแรงที่ผิวชิ้นงานได้หลายวิธีได้แก่ กระบวนการชุบผิวแข็ง (Case Hardening) หรือกระบวนการอบชุบเหล็กด้วยความร้อน (Head Treatment) ใดก็ตามกระบวนการดังกล่าวเป็นการทำงานที่ใช้เวลาและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง รวมทั้งจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ในการอบชิ้นงาน ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวอาจหาได้ยากสำหรับเกษตรกรทั่วไป นอกจากนั้นวัสดุที่นำมาใช้จำเป็นจะต้องตอบสนองต่อความต้องการของกระบวนการชุบผิวแข็งด้วย ส่งผลต่อราคาวัสดุที่มีราคาแพงยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงอาจมีความเป็นไปได้ยากที่เกษตรกรทั่วไปจะใช้กระบวนการชุบผิวแข็งในการช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอของอุปกรณ์ดังกล่าว อีกกระบวนการหนึ่งคือ กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการเชื่อมซ่อมผิวหน้าของชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอ ซึ่งปัจจัยในการเชื่อมพอกผิวแข็งเช่น ชนิดของลวดเชื่อมชนิดของวัสดุที่นำมาทำการเชื่อม เป็นต้น [3] การเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) ไม่เพียงแต่นำไปใช้ในการเกษตรเพียงเท่านั้น มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาชิ้นส่วนของเครื่องจักรในการบดย่อยเศษไม้ แกลบ และขานอ้อย เป็นต้น เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการใช้

ชีวมวล เศษดินจากการย่อยไม้ส่งผลทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรเกิดการสึกหรอ ดังนั้นการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) ต้องพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุ และความเหมาะสมของกระบวนการเชื่อมพอกผิว เพราะสามารถที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่ใช้กับงานดินได้นานขึ้น [4] การเชื่อมพอกผิวแข็งนั้นจะต้องศึกษาส่วนประกอบของโลหะพื้น หน้าที่ของชิ้นส่วน ซึ่งชิ้นงานที่พอกผิวแข็งจะต้องดูลักษณะของงาน ขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน และที่สำคัญคือต้นทุนของการทดแทนชิ้นส่วน เป็นต้น [5] ในการเชื่อมพอกผิวแข็งสามารถใช้เทคนิคในการเชื่อมได้หลายเทคนิค เช่น กระบวนการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Oxy Acetylene Gas Welding : OAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุม (Tungsten Inert Gas : TIG) กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะปกคลุม (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 ถึงแม้ว่าลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing Electrode / Filler Metal) จะสูง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายโดยรวมจะต่ำกว่า

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอทางเลือกในการเชื่อมซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่เกิดการสึกหรอในงานดิน ด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) วัสดุที่ใช้ในการเติมพอกผิวแข็งเป็นกลุ่มของทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Fused Tungsten Carbide) ใช้กระบวนการเชื่อม 2 กระบวนการคือ กระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (Oxy Acetylene gas : OAW) และกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุม (Tungsten Inert Gas : TIG) 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 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ได้จากกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (Oxy Acetylene Gas Welding Process) และกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (Tungsten Inert Gas :TIG)

1.3 ขอบเขตในงานวิจัย

1.3.1 วัสดุพื้น ที่ใช้เป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน

1.3.2 กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองมี 2 กระบวนการคือ กระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (Oxy Acetylene Gas Welding Process) และกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (Tungsten Inert Gas :TIG)

1.3.3 วัสดุที่ใช้ทำการพอกผิวแข็งเป็นลวดเชื่อมแบบเติมประเภททังสเตนคาร์ไบด์ (Fused Tungsten Carbide :Fused WC)

1.3.4 ในการเชื่อมพอกผิวแข็งทั้ง 2 กระบวนการจะใช้คนในการเชื่อม

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) ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

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) ทดสอบคุณสมบัติทางกลและทดสอบการสึกหรอ ตามมาตรฐาน 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

ในงานวิจัยนี้ ตั้งใจที่จะค้นคว้าหาความรู้เนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยใช้ลวดเติมชนิดทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งกระบวนการเชื่อมที่จะทำการศึกษาคือ กระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas : TIG) และกระบวนการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีน (Oxy Acetylene Welding : OAW) รวมทั้งค้นคว้าหาข้อมูลและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการที่จะนำมาประกอบการศึกษาจนบรรลุเป้าหมายตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งมีหัวข้อดังนี้

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

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของกระบวนการเชื่อมโลหะ

เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการผสานโลหะให้ติดกันและเป็นเนื้อเดียวกัน ขณะทำการเชื่อมจะเกิดบ่อหลอมละลายและทำการเติมเนื้อโลหะเพิ่มลงไป ในบ่อหลอม เมื่อเกิดการเย็นตัวจะทำให้โลหะเกิดความแข็งแรง มีพลังงานที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมโลหะ เช่น พลังงานจากแก๊ส พลังงานจากกระแสไฟฟ้า พลังงานจากลำแสงเลเซอร์ พลังงานจากการใช้อิเล็กตรอนบีม พลังงานจากการเสียดสี เป็นต้น ในช่วงศตวรรษที่ 20 กระบวนการเชื่อมมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เพื่อเป็นการทดแทนการต่อโลหะด้วยการใช้หมุดย้ำ [8] ปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการเชื่อมให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น การนำไปใช้ในกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง ซึ่งในงานวิจัยเล่มนี้จะใช้กระบวนการเชื่อมแก๊ส และกระบวนการเชื่อม TIG 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) Automatic Hydrogen Arc Welding

2.2 หลักการของกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (Oxy acetylene Welding)

การเชื่อมแก๊ส หมายถึง เป็นกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายชนิดหนึ่งโดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง และออกซิเจน ทำให้โลหะหลอมละลายติดกัน ในการหลอมละลายติดกันของโลหะนั้น จะเติมโลหะหรือให้โลหะหลอมละลายติดกันเองได้ แก๊สที่ใช้ในการเชื่อมประกอบด้วยออกซิเจน (O₂) และแก๊สอะเซทิลีน (C₂H₂) 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 เหมาะสำหรับเชื่อมชิ้นงานที่ต้องการเติมคาร์บอนที่ผิวชิ้นงานหรือเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ซึ่งต้องการใช้อุณหภูมิหลอมละลายไม่สูงนัก เชื่อมอะลูมิเนียม แมกนีเซียม และใช้ในการเล่นประสาน 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 หลักการของกระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas : TIG)

การเชื่อมทิก (TIG) หมายถึง ความร้อนที่ทำให้โลหะหลอมละลายนั้นเกิดจากการอาร์คระหว่างแท่งทังสเตนอิเล็กโทรด (Tungsten Electrode) กับชิ้นงาน ขณะเดียวกันบริเวณที่เกิดการอาร์คจะมีแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) ปกคลุมบริเวณนั้น เพื่อป้องกันออกซิเจน ไนโตรเจน และความชื้นในอากาศเข้ามาพร้อมกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย ซึ่งเรียกว่า เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จนกระทั่งความร้อนจากการอาร์คหลอมละลายโลหะชิ้นงานในบริเวณดังกล่าว จนเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย ดังนั้นเมื่อบ่อหลอมละลายเกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อใด ๆ ก็จะทำให้ชิ้นงานนั้นหลอมติดกัน แต่เนื่องจากแท่งทังสเตนอิเล็กโทรดเป็นวัสดุที่ไม่ละลายหรือไม่สิ้นเปลือง (Non Consumable Electrode) จึงจำเป็นต้องเติมโลหะลวดเชื่อม (Filer Metal) ลงไปในบ่อหลอมละลายนั้นด้วย ในกรณีที่ทำการเชื่อมโลหะบาง อาจไม่จำเป็นต้องเติมโลหะลวดเชื่อม (Filer Metal) การเชื่อม TIG สามารถเชื่อมเหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ 0.79 mm ถึง 4 mm. ได้ กระแสไฟที่นิยมใช้ในกระบวนการเชื่อม TIG นั้นมี 3 แบบด้วยกันคือ

2.3.1 กระแสตรงขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative; DCEN)

กระแสตรงขั้วลบ หมายความว่า หัวเชื่อมหรือแท่งทังสเตนอิเล็กโทรดใช้กระแสไฟเชื่อมเป็นขั้วลบ และกระแสไฟเชื่อมขั้วบวกเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน โดยประจุไฟฟ้าลบไหลจากหัวเชื่อมหรือ อิเล็กโทรดไปสู่ชิ้นงาน ดังนั้นความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิดที่ชิ้นงานประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และเกิดที่แท่งทังสเตนอิเล็กโทรดประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแคบแต่กินลึกมาก

2.3.2 กระแสตรงขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive; DCEP)

กระแสตรงขั้วบวก หมายความว่า หัวเชื่อมหรือแท่งทังสเตนอิเล็กโทรด ใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมเป็นขั้วบวก และกระแสไฟฟ้าเชื่อมขั้วลบเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน ดังนั้นความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิดที่ชิ้นงานประมาณ 30% และเกิดที่แท่งทังสเตนอิเล็กโทรดประมาณ 70% แนวเชื่อมจะมีลักษณะแบนและกว้างการซึมลึกน้อย แท่งทังสเตนอิเล็กโทรดที่ใช้กับกระแสไฟเชื่อมแบบนี้ จะมีขนาดโตกว่าแท่งทังสเตนอิเล็กโทรดที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าแบบ DCEN และ ACHF

2.3.3 กระแสไฟสลับและระบบความถี่สูง (Alternating Current & High Frequency; ACHF)

กระแสไฟสลับเป็นสิ่งจำเป็นในการเชื่อมโลหะที่มีออกไซด์เคลือบอยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน ถ้าพิจารณาคลื่นของกระแสไฟสลับ จะพบว่าในครึ่งไซเคิลแรกที่แท่งทังสเตนอิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก ออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงาน ตรงบริเวณที่ทำการอาร์คจะถูกขจัดออกไปจากบริเวณนั้นในครึ่งไซเคิลต่อมาแท่งทังสเตนอิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ ขณะที่แท่งทังสเตนอิเล็กโทรดจะเย็นลง แต่กลับเกิดความ

ร้อนมากที่ชิ้นงานตรงบริเวณที่เกิดการอาร์ค จึงทำให้เกิดบ่อหลอมละลายบนชิ้นงาน แต่ความเป็นจริงแล้วออกไซด์และความชื้น จะเป็นฉนวนกั้นไม่ให้กระแสผ่านจาก แท่งทั้งสแตน อีเล็กโทรดไปยังชิ้นงานได้สะดวกนั้น เพื่อเป็นการขจัดปัญหาเหล่านี้ จึงนำเอาระบบความถี่สูง (High Frequency) มาช่วยกระตุ้นการอาร์คในช่วงแรกที่มีลักษณะเป็นกระแสบวก (AC) การทำเช่นนี้จะทำให้กระแสไหลออกจากแท่งทั้งสแตนอีเล็กโทรดไปสู่ชิ้นงาน ได้ตลอดเวลาและสม่ำเสมอกระแสกลับและความถี่สูง (ACHF) มีผลดีต่อการเชื่อมอลูมิเนียม เพราะให้การซึมลึกในการเชื่อมและขจัด Aluminum Oxide ที่พื้นผิวในขณะที่ทำการเชื่อม จึงทำให้การซึมลึกในการเชื่อมมีผลดี และกระแสไฟฟ้าเชื่อมทำให้ออกไซด์ที่เคลือบผิวของชิ้นงานแตกออกจากกันก่อนที่ชิ้นงานจะละลาย กระแสไฟสามารถกำจัดสิ่งสกปรกออกได้ด้วย อีกทั้งสามารถเชื่อมอลูมิเนียมที่มีความบางประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยไม่ต้องป้อนลวดเชื่อมและให้ความร้อนก่อนการเชื่อม การใช้ชนิดของกระแสไฟที่แตกต่างกันมีผลกับความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่แตกต่างกันด้วย จึงเป็นผลให้ลักษณะการกินลึกตรงบริเวณที่เกิดการอาร์คนั้นแตกต่างกันตลอดจน การเลือกใช้ทั้งสแตนอีเล็กโทรด ให้เหมาะสมสำหรับกระแสไฟเชื่อมนั้น ๆ ด้วย

2.4 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 เหล็กไร้ซิลิกอนมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการประกอบหรือขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กได้แก่ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลการเกษตร งานท่อเหล็กต่าง ๆ รวมถึงเป็นการผลิตชิ้นส่วนรถบรรทุก มีความต้านแรงดึง 400 ถึง 510 N/mm² ความต้านแรงดึงจุดครากต่ำสุด 245 N/mm² (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

2.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)

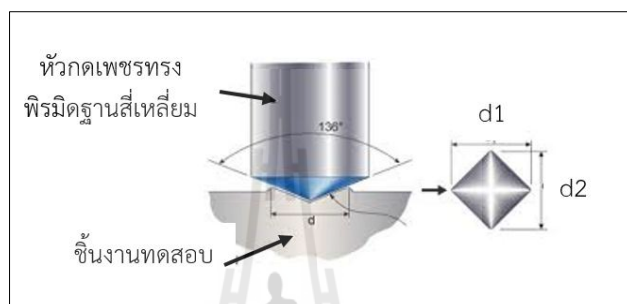
เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญในด้านวิศวกรรม ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับความแข็งแรงของวัสดุ สามารถกำหนดขนาดของชิ้นงานให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing) ในการทดสอบคุณสมบัติทางกลในแต่ละคุณสมบัติล้วนมีวิธีในการทดสอบที่แตกต่างกัน เช่น ต้องการทราบคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ควรใช้วิธีการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) เป็นต้น

2.5.1 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) การทดสอบแบบวิกเกอร์ส์ (Vickers Hardness Test)

การทดสอบวิกเกอร์ส์ (Vickers Hardness Test) จะใช้หลักการเดียวกับการทดสอบแบบบริเนลล์ เปลี่ยนจากหัวกดลูกบอลชุบแข็งเป็นหัวกดที่ทำด้วยเพชรเจียรไนเป็นทรงพีรามิดทำมุม 136 องศา กดด้วยแรง F ตั้งฉากกับชิ้นงานทดสอบ รอยกดที่ได้จะนำไปวัดเส้นทแยงมุม d ทั้งสองด้าน ซึ่งความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมจะนำไปคำนวณหาค่าความแข็งของชิ้นงาน



รูปที่ 2.1 แสดงการกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส์ [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 แรงที่ทำการกดชิ้นงาน (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
มาร์เตนไซต์ (Martensite)	400 - 900

2) การทดสอบแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

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

2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallogical Investigation)[13]

2.6.1 การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา

1) การตรวจสอบในระดับโครงสร้างมหภาค (Macro-scopic examination)

เป็นการตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานโดยใช้กำลังขยายต่ำ เมื่อมีการเตรียมงานโดยการขัดหยาบ ขัดละเอียด ขัดเงา และกัดกรด แล้วสามารถตรวจสอบได้โดยตาเปล่า หรืออาจใช้กำลังขยายได้ไม่เกิน 10 เท่า

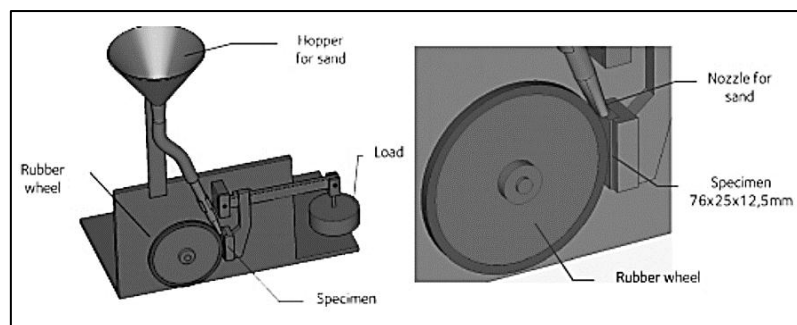
2) การตรวจสอบในระดับโครงสร้างจุลภาค (Micro-Scopic Examination)

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

2.7 การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

เป็นกรรมวิธีการทดสอบที่ครอบคลุมขั้นตอนในห้องปฏิบัติการ โดยมีการกำหนดค่าความต้านทานของรอยขีดข่วนของวัสดุ โดยวิธีการทดสอบด้วยทรายแห้งและล้อยาง กรรมวิธีการทดสอบนี้ เป็นการกระทำซ้ำๆของวัสดุ ผลจากการทดสอบการสึกหรอจะบันทึกเป็นปริมาณการสูญเสียเป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร ซึ่งกระบวนการทดสอบจะระบุวัสดุที่มีความต้านทานสูงกว่า จะมีปริมาณการสูญเสียที่ต่ำกว่า การใช้ทรายแห้งและล้อยางในการทดสอบรอยขีดข่วน มีความเกี่ยวข้องกับมาตรฐานในการทดสอบรอยขีดข่วนของชิ้นงานทดสอบ กับการควบคุมขนาดของเม็ดทราย และส่วนประกอบของรอยขีดข่วนนี้เป็นการแนะนำระหว่าง ชิ้นงานในการทดสอบ และการหมุนของยาง เป็นการทำให้เกิดแรงกดลง พร้อมกับการหมุนของล้อที่มีการระบุแรง โดยวิธีที่มีแกนคันโยก ซึ่งมีการควบคุมกรไพลของทราย [14] การสูญเสียน้ำหนักเป็น การวัดสำหรับการกำหนดหลักเกณฑ์ เวลาการแสดงผลสรุปการสูญเสีย สามารถคำนวณได้ดังนี้ [15]

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



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างเครื่องทดสอบการสึกหรอ ASTM G65 [15]

2.8 การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing : NDT)

เป็นการตรวจสอบหาจุดบกพร่องต่างๆที่อาจเกิดจากการใช้งาน ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานปัจจุบันการทดสอบแบบไม่ทำลายได้ถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายในเรื่องของความปลอดภัย และด้านการประกันคุณภาพ[16]

2.8.1 การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection : VT)

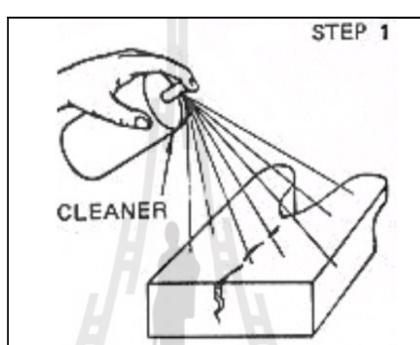
การตรวจสอบด้วยสายตา จัดว่าเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing) เป็นวิธีการตรวจสอบที่จำเป็นและนิยมใช้กันมาก เพราะไม่ยุ่งยากในการปฏิบัติและไม่ต้องมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ยุ่งยากมาก แต่ผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องมีความรู้ในทั้งด้านทฤษฎีและปฏิบัติเกี่ยวกับการผลิต ซึ่งสิ่งบกพร่องที่สามารถตรวจสอบได้นั้น จะต้องเป็นสิ่งสปกรกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นงานได้แก่ รูพรุนหรือการเกิดตามด การเกิดสะเก็ดโลหะที่เกิดจากกระบวนการเชื่อม เช่น สแลคฟุ้งบนผิวเนื้อเชื่อม รอยกัดลึกด้านข้าง (Under Cut) การบิดงอ การแตกร้าวของชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือในการที่จะช่วยในการตรวจสอบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้แก่ แว่นขยาย ไฟฉาย ไม้บรรทัด ตลับเมตร เกจวัดวัดงานเชื่อมและเกจวัดมุม เป็นต้น

2.8.2 การตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึม (Penetrant Testing : PT)

การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะใช้หลักการดูดซับของเหลวโดยที่ของเหลวมีความสามารถดูดซึมเข้าไปในช่องว่างเล็กๆได้ การตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึม สามารถที่จะตรวจหาสิ่งบกพร่องที่ผิวหน้าของชิ้นงาน โดยที่ชิ้นงานจะทำมาจากวัสดุสิ่งใดๆก็ได้ ที่ไม่มีลักษณะเป็นรูพรุน (Nonporous Material) สิ่งที่บกพร่องที่ผิว ได้แก่ รอยแตกร้าวที่ผิวและรูพรุน เป็นต้น การตรวจสอบด้วยวิธีนี้สามารถใช้ได้ผลดีกับชิ้นงานที่เป็นโลหะ เช่น อลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดง เหล็กหล่อ เหล็กกล้าทั่วไป เหล็กกล้าไร้สนิม และ ไททาเนียม เป็นต้น นอกจากนี้ยัง

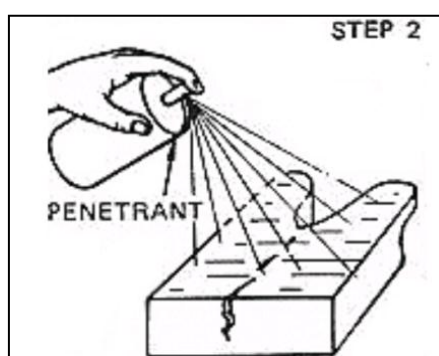
สามารถใช้ตรวจสอบวัสดุอื่นๆ เช่น เซรามิก พลาสติก ยาง และแก้ว เป็นต้น วิธีการตรวจสอบด้วยของเหลวแทรกซึมมีอยู่ 6 ขั้นตอนคือ

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



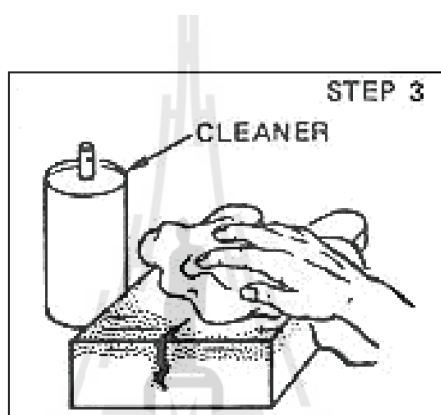
รูปที่ 2.3 แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 1 [17]

ขั้นตอนที่ 2 พ่นเคลือบน้ำยาแทรกซึม (Penetrant) ลงบนผิวงานบริเวณที่จะทำการตรวจสอบ ที่ระยะเวลา (Dwell Time) 5-10 นาที หรือตามคำแนะนำของผู้ผลิต ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เพื่อให้ น้ำยาแทรกซึม มีเวลาแทรกตัวเข้าไปในร่องเปิดของจุดบกพร่องจนทั่ว การใช้ Dwell Time ที่นานเกินไปไม่ส่งผลเสียใดๆยกเว้นนานจนกระทั่งน้ำยาแทรกซึมแข็งตัวก่อน



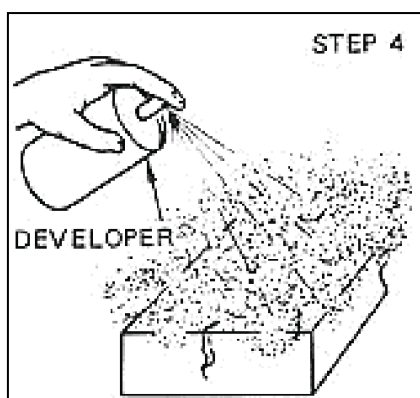
รูปที่ 2.4 แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 2 [17]

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



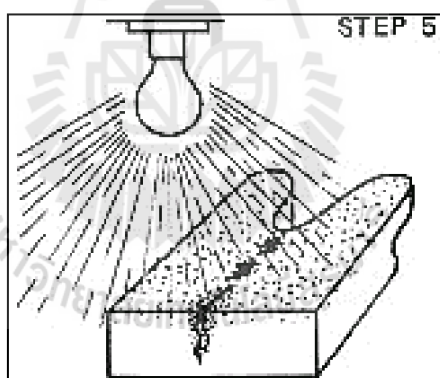
รูปที่ 2.5 แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 3 [17]

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



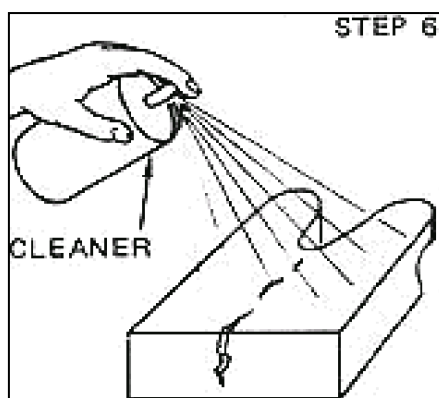
รูปที่ 2.6 แสดงการตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึมขั้นตอนที่ 4 [17]

ขั้นตอนที่ 5 การตรวจสอบผล (Inspection) ในที่มีแสงสว่างเหมาะสมกับชนิดของน้ำยาแทรกซึม (Penetrant) ที่สามารถอ่านค่าด้วยตาเปล่าหรือใช้แสง Back Light เพื่อสามารถค้นหารอยร้าวหรือรูพรุนอื่น ๆ 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]

2.9 ความร้อนในการเชื่อม (Heat input)[18]

ความร้อนในการเชื่อม (Heat input) จะมีผลต่อการหลอมละลายของแนวเชื่อม ความกว้างของแนวเชื่อม และความหนาของแนวเชื่อม รวมถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) ซึ่งค่าความร้อนในการเชื่อมจะมีหน่วยเป็น KJ/mm. เมื่อมีความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้ค่าการหลอมละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นด้วย แต่ความหนาของแนวเชื่อมจะลดลง ดังนั้นค่าความร้อนที่ได้ในการเชื่อมมีความสำคัญต่อแนวและรวมถึงคุณภาพของงานเชื่อม [18] การคำนวณหาค่าความร้อนในการเชื่อมสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

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

$$HeatEfficiency = Amp \times Arc \cdot Voliage \quad (2.8)$$

2.10 ความเจือจางของโลหะ (Dilution)

ในการเชื่อมโลหะชนิดที่แตกต่างกัน คุณสมบัติส่วนผสมทางเคมีของวัสดุจะถูกหลอมละลายผสมรวมกัน หรือเรียกว่า ความเจือจาง ซึ่งความเจือจางของโลหะเชื่อมควบคุมโดยการกำหนดน้ำหนักของวัสดุประเภทต่างๆเพื่อมาผสมกัน โดยใช้การชั่งน้ำหนัก [19]

2.10.1 สาเหตุที่ทำให้เกิดความเงื้องาจือคือ

1) ความเร็วในการเดินสูง (High Travel speed) ความร้อนที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการแทนที่ของลวดเชื่อม

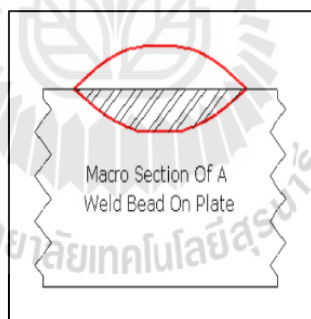
2) กระแสไฟเชื่อมสูง (High Welding Current) กระบวนการเชื่อมที่เกิดกระแสไฟที่สูง เช่น กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW) สามารถที่จะเกิดความเงื้องาจือสูง

3) ความบางของวัสดุ (Thin Material) เช่น กระบวนการเชื่อมทิกแผ่นโลหะบางสามารถที่จะก่อให้เกิดความเงื้องาจือระดับสูง และการเตรียมรอยต่อ (Joint Preparation) ซึ่งความเงื้องาจือมีสมการในการคำนวณดังนี้

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

โดย a คือ พื้นที่แผ่นชิ้นงานที่เกิดหลอมละลาย (Area of Molten Parent Plate)

A คือ พื้นที่ทั้งหมดที่เกิดการหลอมละลาย (Area Enclosed by red line)



รูปที่ 2.9 แสดงความเงื้องาจือของโลหะ (Dilution) [19]

การเงื้องาจือ (Dilution) ระหว่างชิ้นพื้นและลวดเชื่อมที่เดิมจะต้องผสมกัน ควรที่จะมีการควบคุม เนื่องจากสัดส่วนการผสมระหว่างเนื้อโลหะพื้นและลวดเติมนั้นมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ [20] ในการพอกผิวแข็งนั้น ส่วนผสมทางเคมีจะต้องมีความสอดคล้องของอัตราการเงื้องาจือโดยโลหะพื้น เพราะฉะนั้น โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมต่าง ๆ มีผลกระทบต่อค่าความแข็งของโลหะเชื่อม [21]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing) ถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานและช่วยลดต้นทุนในการตั้งซื้ออุปกรณ์ต่างๆได้ มีงานวิจัยที่ให้ความสำคัญในเรื่องของการนำอุปกรณ์ชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เกิดปัญหาต่างๆสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่และมีประสิทธิภาพ เช่น การแตกร้าว การสึกหรอ เป็นต้น ซึ่งเมื่อเกิดการเสียหายจะต้องมีการสั่งซื้อใหม่ และจะต้องใช้งบประมาณในการสั่งซื้อเป็นจำนวนมากดังนั้นในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่าง ๆ

สุรธยา ลิ้มนา ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกโดยใช้เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 โดยใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้า กระบวนการเชื่อมมิก/แมก และกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ซึ่งก่อนการเชื่อมและหลังการเชื่อมจะให้ความร้อนที่ต่างกัน รวมทั้งทำการศึกษาบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) พบว่าค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมที่ได้จากกระบวนการเชื่อมไส้ฟลักซ์จะมีค่าใกล้เคียงกับเนื้อเดิมมากกว่ากระบวนการเชื่อมไฟฟ้า และกระบวนการเชื่อมมิก/แมก ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อนทั้ง 3 กระบวนการ มีค่าใกล้เคียงกับเนื้อเชื่อมและเนื้อโลหะเดิม [22]

ไพบุลย์ หาญมนต์ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมที่มีผลต่อการหลอมลึกลงความกว้างความสูงและบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ด้วยกระบวนการเชื่อมMIG 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) สูงขึ้นจะให้ค่าการหลอมลึกลงเพิ่มมากขึ้นให้ค่าความกว้างของแนวเชื่อมกว้างมากขึ้นให้ค่าความสูงของแนวเชื่อมลดต่ำลงและทำให้บริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีความกว้างและค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น สรุปได้ว่าอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมมีผลต่อการหลอมลึกลงความกว้างความสูงและบริเวณกระทบร้อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้ [18]

นพกร ภูระย้า และอิสริหัตต์ พึ่งอัน ได้ศึกษาคุณสมบัติโลหะเชื่อมโดยการจำลองทางกายภาพโดยใช้โลหะเชื่อมได้แก่ ER309, ER308L, ER316, ER347, ER70S-6, SS304, CS (Carbon Steel) FTC (Fused Tungsten Carbide) และใช้กระบวนการเชื่อมTIGและกระบวนการเชื่อม OAW ในการทดสอบ วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค และวิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์ไรต์ นอกจากนี้ยังให้ความสำคัญในเรื่องของการควบคุมความเจือจาง (Dilution Control) ของโลหะเชื่อม พบว่าส่วนผสมทางเคมีนั้นมีผลต่อการทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ และในส่วนการพิจารณาความเจือจางของโลหะ และพบว่าปริมาณของลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง FTC มีผลต่อความแข็งแรงของโลหะ [19]

สุพร ฤทธิภักดี ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบน เหล็ก 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 ดุลยกุล และคณะ ได้มีการวิจัยศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของการเชื่อมพอกผิวแข็งของวัสดุเหล็ก AS3678 เกรด 350 โดยใช้กระบวนการเชื่อม 3 กระบวนการ คือ กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กระบวนการเชื่อมมิก/แม็ก และกระบวนการเชื่อมไส้ฟลักซ์ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละกระบวนการ ซึ่งจะทำการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65ในการทดลอง ผลการทดลองพบว่า เนื้อเชื่อมในแต่ละกระบวนการมีความแตกต่างกัน โดยกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ให้ค่าความต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด ซึ่งให้ค่าความแข็งเท่ากับ 213.4 HV ส่วนกระบวนการเชื่อมมิก/แม็กจะให้ค่าความต้านทานการสึกหรอน้อยที่สุด ซึ่งให้ค่าความแข็งเท่ากับ 174.8 HV ดังนั้น กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ให้ค่าที่มีความเหมาะสม 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 เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 และใช้วัสดุในเติมพอกผิวแข็งคือ Fused Tungsten Carbide และใช้กระบวนการเชื่อม 2 กระบวนการ คือ กระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ทดสอบคุณสมบัติทางกล

(Mechanical Properties) และทดสอบการสึกหรอความมาตรฐาน ASTM G65 พบว่ากระบวนการเชื่อม OAW ให้ค่าความต้านทานการสึกหรอดีกว่ากระบวนการเชื่อมTIGการกระจายตัวของคาร์ไบด์ของการกระบวนการเชื่อมอยู่ด้านบนของผิวเชื่อม แต่ของกระบวนการเชื่อมทิก จะอยู่บริเวณขอบของแนวเชื่อม [25]

การเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นกระบวนการซ่อมบำรุงวัสดุอุปกรณ์กระบวนการหนึ่งที่ได้รับ ความนิยมเนื่องจากสามารถทำงาน ณ บริเวณของวัสดุอุปกรณ์นั้น ๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีการ เคลื่อนย้ายชิ้นงานไปหาเครื่องมือ โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้ในการป้องกันการสึกหรอของอุปกรณ์ [26-27] เพื่อยืดอายุในการใช้งาน สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น หรือทนอุณหภูมิได้สูงขึ้น ในงานที่ จำเป็นต้องทำงานเกี่ยวกับดินซึ่งมีหิน กรวด ทราย ปนอยู่มาก ทำให้เกิดการสึกหรอของอุปกรณ์ได้ ง่าย จึงมีการใช้การเชื่อมพอกผิวแข็งเข้าร่วมด้วยเพื่อที่จะลดการสึกหรอดังกล่าว [20] นอกจากนี้ การเชื่อมพอกผิวแข็งยังถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมประเภทขุดเจาะ ซึ่งรวมถึงอุตสาหกรรม การผลิตน้ำมัน [28] เพื่อเป็นการป้องกันการสึกหรอจากการทำงานในการขุดทรายน้ำมัน (Sand Oil) โดย การใช้งานลักษณะดังกล่าวจะเป็นการใช้งานที่ใกล้เคียงกับการใช้งานดินที่ใช้ในการเกษตรของ ประเทศไทย การเชื่อมพอกผิวแข็งสามารถเชื่อมลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไปได้เลย โดยอาจมีการ อุ่นชิ้นงานหรือไม่อุ่นชิ้นงานก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานและส่วนผสมทางเคมีของ ชิ้นงานที่ทำร่วมด้วยผิวหน้าของการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing Deposit) สามารถเป็นวัสดุได้ หลากหลาย ขึ้นอยู่กับประเภทของลวดหรือวัสดุที่เติมลงไป เช่น มีอนุภาคของคาร์ไบด์อยู่บนผิวงาน [29] ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นคาร์ไบด์ประเภทต่าง ๆ โดยกระบวนการเชื่อมพอกจะใช้กระบวนการเชื่อมทิก ซึ่งกระบวนการอื่น ๆ สามารถกระทำได้เช่นกัน เช่น การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ หรือการ เชื่อมด้วยการเชื่อมแก๊ส เช่นเดียวกัน นอกจากการได้ความแข็งจากการเกิดคาร์ไบด์แล้ว [30-31] ยังอาจได้ทำแข็งมาจากการเปลี่ยนแปลงเฟส ในที่นี้คือการเกิดมาร์เทนไซต์ (Martensite) การเลือกใช้ ประเภทของความแข็งที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่ต้องการใช้ เช่น กรณีการสึกหรอแบบ เลื่อนไถล (Sliding Wear) การเกิดเฟสที่มีความแข็งอย่างเดียวในลักษณะของมาร์เทนไซต์นั้น เพียงพอต่อการใช้ที่ไม่มีแรงกระแทกเกิดขึ้น แต่หากมีแรงกระแทกเกิดขึ้น การเกิดเฟสลักษณะนี้ จะ ไม่เหมาะสม เนื่องจากเกิดการเปราะและแตกง่าย ทำให้เสี่ยงต่อการหลุดล่อนของชั้นพอกผิวแข็ง ออกมา ดังนั้นการเกิดความแข็งที่มาจากคาร์ไบด์จะเหมาะสมกว่า

สำหรับวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะได้ความแข็งจาก Tungsten Carbide ซึ่งเกิดจากลวดเชื่อม หรือวัสดุพอกผิวแข็งที่เลือกใช้ จะมีอนุภาคต่าง ๆ ของคาร์ไบด์อยู่บน โครงสร้าง (Matrix) พื้นที่ย่อน กว่า เมื่อได้รับการเสียดสี อนุภาคของคาร์ไบด์จะให้ความแข็งและต้านทานการสึกหรอ ในขณะที่ เมื่อได้รับแรงกระแทก โครงสร้างพื้นที่ย่อนกว่าจะมีหน้าที่รับแรงกระแทก ทำให้ชั้นเชื่อมพอกผิว แข็งยึดติดกับโลหะชิ้นงานได้ยิ่งขึ้น

ดังนั้นการวิจัย การเชื่อมพอกผิวแข็งสำหรับงานดินที่ต้องมีทั้งการเสียดสีจากชั้น ดิน ทราย การเลือกวัสดุพอกผิวแข็งในลักษณะที่เกิดคาร์ไบด์บนชั้นที่อ่อนกว่า จึงมีโอกาที่จะได้ชั้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการใช้งาน



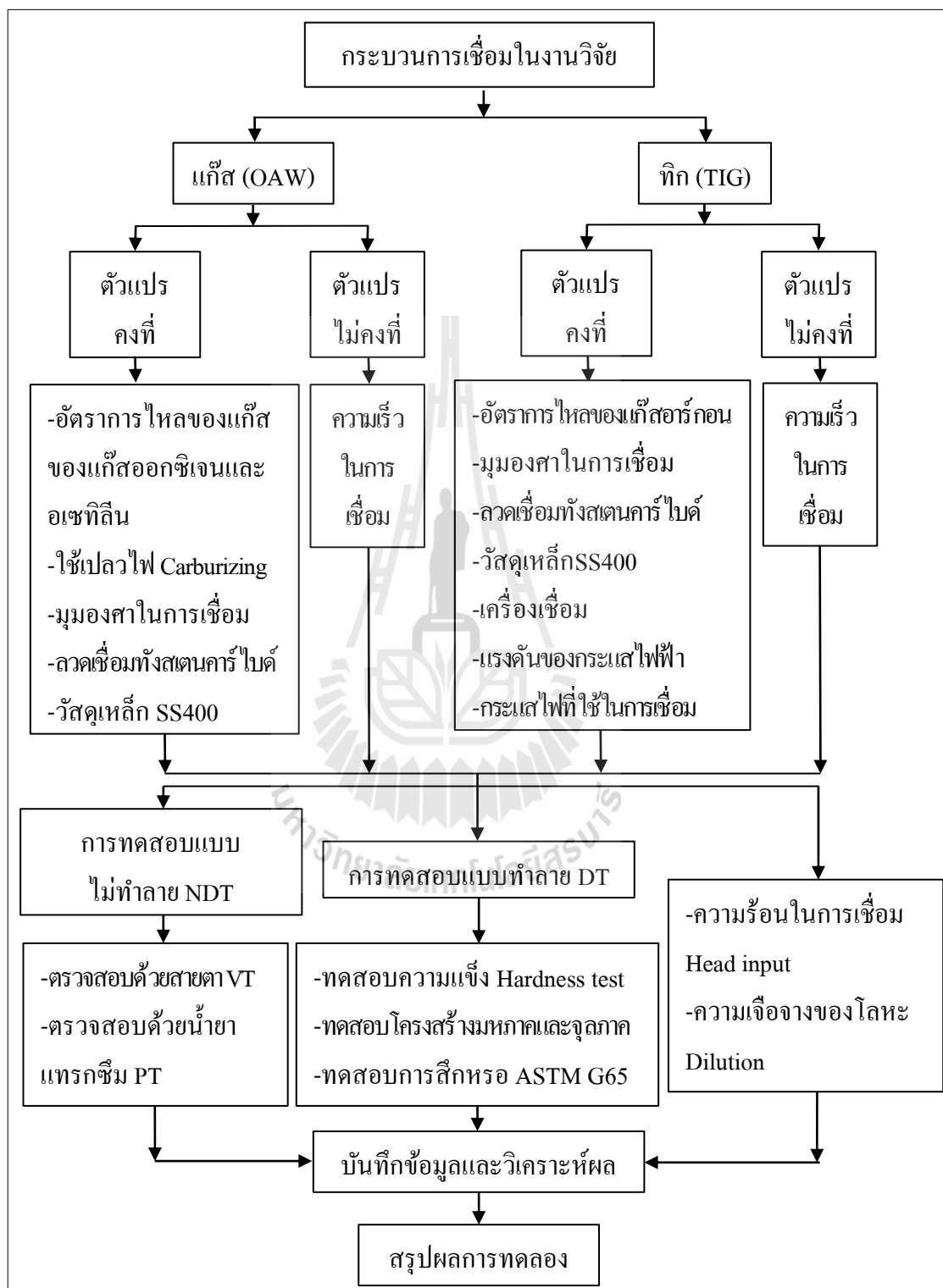
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน (Oxy Acetylene Welding Process : OAW) และกระบวนการเชื่อมทังสเตนแก๊สปกคลุม (Tungsten Inert Gas Welding Process :TIG) โดยใช้ลวดเชื่อมแบบชนิดเติมทังสเตนคาร์ไบด์ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง(Fused Tungsten Carbide : Fused WC) และใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 เป็นชิ้นงานในการทดลอง ซึ่งชิ้นงานของกระบวนการเชื่อมทังสเตนแก๊สปกคลุม (Tungsten Inert Gas Welding Process : TIG) จะใช้กระแสไฟในการเชื่อมที่ 110 แอมแปร์ และชิ้นงานของกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน (Oxy Acetylene Welding Process : OAW) จะใช้อัตราการไหลของแก๊สอะเซทิลีนและออกซิเจนที่เหมาะสมในการเชื่อม จากนั้นทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง จากการทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของกรรมวิธีการเชื่อมทั้ง 2 กระบวนการ ดังนั้น 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

เครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ได้รับการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกจาก อาคารเครื่อง 1 อาคารเครื่องมือ 4 อาคารเครื่องมือ 6 และอาคารเครื่องมือ 10 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมทั้งได้รับการอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบและสถานที่ของ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีศูนย์ เทคโนโลยีซ่อมบำรุงรักษา อาคารเรียนรวม 1 ห้อง CB 1203 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและมีการอบรมความปลอดภัยและการใช้เครื่องมือที่ถูกหลักวิธี โดยรับสิทธินักศึกษาโครงการวิจัยได้ใช้เครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์ ประกอบไปด้วย

3.2.1 เครื่องเชื่อมทั้งสแตนเลสสปีดกลุ่ม (Tungsten Inert Gas Welding Process :TIG)

เครื่องเชื่อมเป็นระบบ Transformer-Rectifier เครื่องหมายการค้า HOBART TIGWAVE 350AC/DC



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 ชุดอุปกรณ์ในการเชื่อมด้วยแก๊สอะเซทิลีน



รูปที่ 3.3 แสดงชุดอุปกรณ์กระบวนการเชื่อมด้วยแก๊สอะเซทิลีน

3.2.3 เครื่องตัด Wire Cut รุ่น CHARMILLES TECHNOLOGIES



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องตัด Wire Cut

3.2.4 เครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ทดสอบแบบ Dry Sand/Rubber Wheel



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องทดสอบการสึกหรอ

3.2.5 เครื่องอัดชิ้นงานด้วยเรซิน (Hot Mounting Presses) คือการทำให้



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องอัดเรซิน

3.2.6 เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน

3.2.7 เครื่องขัดผงอะลูมินา (Al₂O₃)



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องขัดผงอะลูมินา (Al₂O₃)

3.2.8 กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพ

ในการทดสอบจะใช้กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสามารถที่จะให้ระดับกำลังขยายตั้งแต่กำลังขยายต่ำ 100 เท่าไปจนถึงกำลังขยายสูง 1000 เท่า



รูปที่ 3.9 แสดงกล้องจุลทรรศน์

3.2.9 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 เป็นชิ้นงานในการทดลองเชื่อมเป็นเหล็กแผ่นรีดร้อน เป็นเหล็กที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในงาน โครงสร้างทั่วไป มีคุณสมบัติเชื่อมที่ดี สามารถนำไปใช้งานเชื่อมโครงสร้างต่าง ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นเหล็กขนาด 60x100x4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.10 แสดงเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400

3.2.10 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

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



รูปที่ 3.11 แสดงลวดเติมทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์

3.2.11 การทดสอบแบบไม่ทำลาย

1) การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection)

ทำการตรวจสอบสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นงาน ได้แก่ รูพรุนหรือการเกิดตามด การเกิดสะเก็ดโลหะที่เกิดจากกระบวนการเชื่อม เช่น รอยกัดลึกด้านข้าง (Under Cut) การบิดงอ การแตกร้าวของชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือในการที่จะช่วยในการตรวจสอบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้แก่ แวนขยาย ไฟฉาย ไม้บรรทัด ตลับเมตร

2) การตรวจสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึม (Penetrant Testing)

การตรวจสอบด้วยน้ำยาแทรกซึม สามารถที่จะตรวจหาสิ่งบกพร่องที่เปิดปากที่ผิวได้แก่ รอยแตกร้าวที่ผิวและรูพรุน เป็นต้น ซึ่งน้ำยาสารแทรกซึมจะมี 3 กระป๋องใน 1 ชุด คือ น้ำยาทำความสะอาด (Remover) น้ำยาแทรกซึม (Penetrant) และน้ำยาเคลือบ (Developer)



รูปที่ 3.12 แสดงชุดน้ำยาสารแทรกซึม

3.2.12 เครื่องมือในการทดสอบสมบัติทางกล

เครื่องทดสอบความแข็ง เป็นเครื่องทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers) เครื่องหมายการค้า FUTURE-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 3.13 แสดงเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Vicker Hardness Test)



รูปที่ 3.14 แสดงเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

3.3 การกำหนดปัจจัยและออกแบบการทดลอง

จุดประสงค์ของการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาตัวแปรในกระบวนการเชื่อม รวมไปถึงจำนวนของชั้นแนวเชื่อมที่ทำการเชื่อมพอกผิว ศึกษาปัจจัยที่ผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของงานเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีกระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยที่สำคัญที่จะทำการศึกษาดังนี้

3.3.1 ปัจจัยคงที่ในการเชื่อม

- 1) เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์ในการควบคุมการเชื่อม
- 2) เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ของมาตรฐาน JIS
- 3) ลวดเชื่อมแบบเติมประเภททังสเตนคาร์ไบด์
- 4) กระแสไฟในการเชื่อม

3.3.2 ปัจจัยที่กำหนดในการเชื่อม

- 1) การศึกษาคุณสมบัติความแข็งและค่าความต้านการสึกหรอของชิ้นงานของกระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW
- 2) การศึกษาความต้านทานการสึกหรอของชั้นแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW

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

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมทั้ง 2 กระบวนการซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม OAW

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

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม TIG

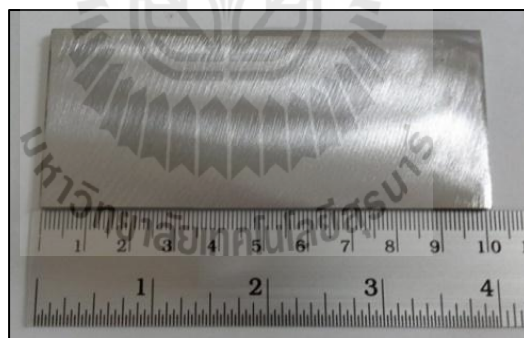
ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อม	ค่า
กระแสเชื่อม (แอมแปร์)	110
แรงดันเชื่อม (โวลต์)	14-16
มุมของหัวเชื่อม (องศา)	15
อัตราความเร็วในการเชื่อม (เซนติเมตรต่อนาที)	6.9-8.4

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองการเชื่อมชิ้นงาน จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เพื่อที่จะนำไปทดสอบความแข็งแรง และทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบการสึกหรอ

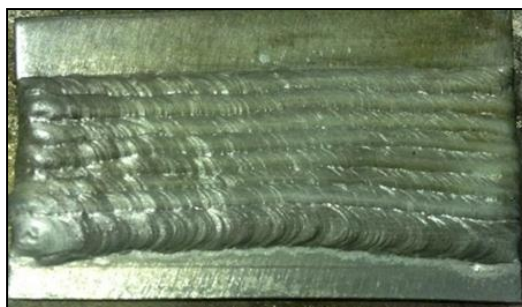
การเตรียมชิ้นงานในการทดลองโดยการตัดชิ้นงานในการทดลองเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 ให้ได้ขนาดความกว้าง 60 ความยาว 100 และความหนา 4 มิลลิเมตร และทำการเจียรระโนปาดผิวหน้าที่เป็นผิวดำจากการขึ้นรูปด้วยความร้อน



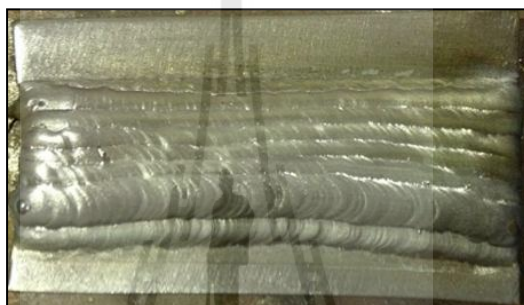
รูปที่ 3.15 แสดงชิ้นงานในการทดลอง

3.4.2 การเชื่อมชิ้นงานในการทดลอง

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



รูปที่ 3.16 แสดงชิ้นงานเชื่อม TIG จำนวน 1 ชั้น



รูปที่ 3.17 แสดงชิ้นงานเชื่อม TIG จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 3.18 แสดงชิ้นงานเชื่อม TIG จำนวน 3 ชั้น



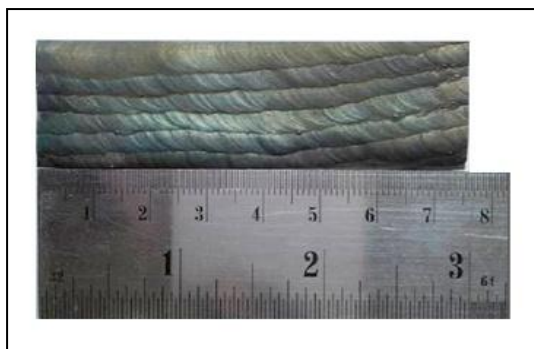
รูปที่ 3.19 แสดงชิ้นงานเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น



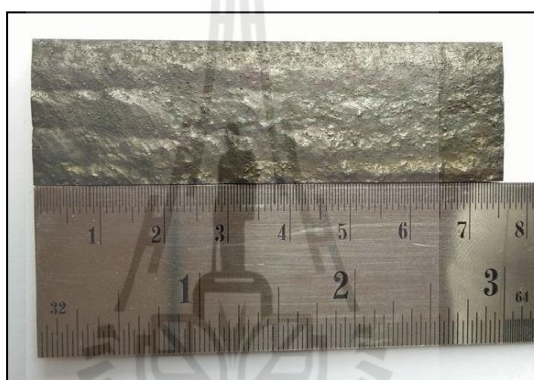
รูปที่ 3.20 แสดงชิ้นงานเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 3.21 แสดงชิ้นงานเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น



รูปที่ 3.22 แสดงชิ้นงานเชื่อม TIG ที่ผ่านการตัดสำหรับทดสอบการสึกหรอ



รูปที่ 3.23 แสดงชิ้นงานเชื่อม OAW ที่ผ่านการตัดสำหรับทดสอบการสึกหรอ

3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasion Test)

- 1) ทำความสะอาดชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมและตัดให้ได้ขนาดด้วย Solvent หรือ Cleaner และทำให้แห้ง
- 2) นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 3-4 ตำแหน่ง
- 3) นำชิ้นงานไปใส่ใน Holder ให้แน่น จากนั้นใส่ตุ้มน้ำหนักที่ Level Arm เพื่อกดให้ชิ้นงานติดกับล้อ
- 4) ปล่อยทรายโดยให้อัตราการไหลของทรายอยู่ในระดับมาตรฐานซึ่งอยู่ในระหว่าง 300 ถึง 400 กรัมต่อนาที

5) ควรมีการเช็คอุณหภูมิของล้อย่างก่อนการทดสอบ ให้อยู่ในอุณหภูมิห้อง เพื่อป้องกันการเกิดความร้อน ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดลอง ซึ่งเลือกทดสอบตาม Specified Procedure A เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งมากต้องใช้เวลา 30 นาที ซึ่งจะแบ่งการบันทึกผล ทุก 10 นาที

6) เริ่มทำการหมุนวงล้อและทำการลด Level Arm ลงเพื่อให้ชิ้นงานสัมผัสกับวงล้อพร้อมทั้งจับเวลา

7) เมื่อทำการทดสอบครบ 30 นาที หยุดการหมุนของล้อและการไหลของทราย และควรวัดอัตราการไหลของทรายก่อนและหลังการทดสอบด้วย หรือยกเว้นถ้าในกรณีที่อัตราการไหลที่สม่ำเสมอแล้ว

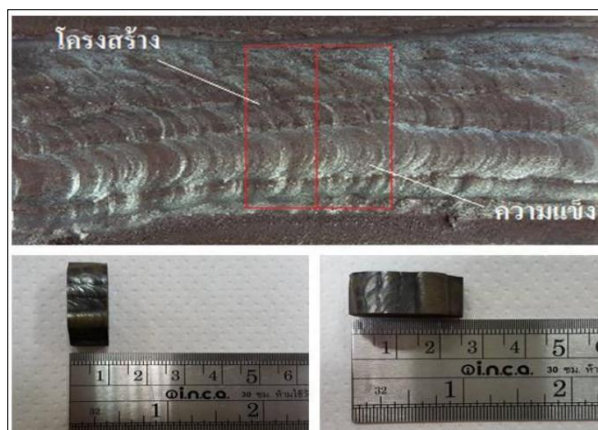
8) นำชิ้นงานออกจากเครื่องเพื่อมาชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบและบันทึกผล

3.4.2 การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็ง

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



รูปที่ 3.24 แสดงขนาดและตำแหน่งในการตัดชิ้นงานของการเชื่อม OAW



รูปที่ 3.25 แสดงขนาดและตำแหน่งในการตัดชิ้นงานของการเชื่อม TIG



รูปที่ 3.26 แสดงชิ้นงานอครเซชันสำหรับทดสอบ โครงสร้างจุลภาคและความแข็ง

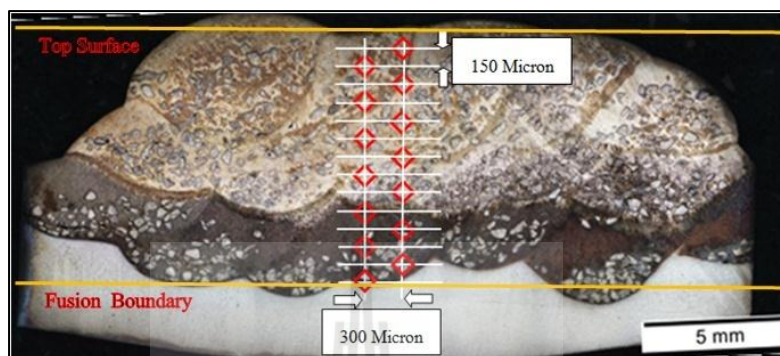
3.4.3 การศึกษาโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์

การศึกษาโครงสร้างมหภาค เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของคาร์ไบด์และการหลอมลึก ส่วนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อดูลักษณะของเกรนของชิ้นงานเชื่อมแบ่งออกเป็น 4 ส่วนได้แก่ บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone) บริเวณการหลอมละลายของสวดเชื่อมกับวัสดุพื้น (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 3.27



รูปที่ 3.27 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. ดังนั้นจะได้ระยะทดสอบ



รูปที่ 3.28 แสดงตัวอย่างตำแหน่งและชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Test

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการศึกษาและดำเนินการวิจัย เพื่อศึกษากระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ด้วยลวดเติม (Filler Metal) ชนิดทังสเตนคาร์ไบด์ โดยการศึกษาจำนวนชั้นของแนวเชื่อม คุณสมบัติทางกลโดยการทดสอบความแข็ง และทำการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 โดยผลของการทดลองของงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

4.1 การศึกษาโครงสร้างมหภาค

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น

แนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG จำนวน 1 ชั้น โดยใช้กระแสเชื่อม 110 A พบว่า ลวดเชื่อมเกิดการหลอมละลายลึกเข้ากับวัสดุพื้น ทำให้มีการกระจายตัวของทังสเตนคาร์ไบด์ เกาะกลุ่มกันเป็นจำนวนมากที่บริเวณขอบด้านล่างของแนวเชื่อม ใกล้กับบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) เนื่องจากกระบวนการเชื่อม TIG ใช้กระแสไฟฟ้าในการอาร์ค ทำให้เกิดความร้อนบริเวณบ่อหลอมละลายสูง ส่งผลให้ทังสเตนคาร์ไบด์เคลื่อนตัวอยู่เป็นอิสระขณะหลอมละลาย และเกิดการตกตะกอนเกาะกลุ่มบริเวณด้านหลังของแนว

ส่วนกระบวนการเชื่อม OAW พบว่า ลวดเติมเกิดการหลอมละลายลึกเข้ากับวัสดุพื้นน้อย เนื่องจากกระบวนการเชื่อม OAW เป็นหลักการที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ทำให้เกิดบ่อหลอมที่ช้า ทำให้ความร้อนมีการกระจายอยู่ทั่วผิวบนของชิ้นงาน ส่งผลทำให้ลวดเติมเกิดการหลอมละลายที่รวดเร็ว ทำให้ทังสเตนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดี ทั่วรอบ ๆ แนวเชื่อม



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม TIG จำนวน 1 ชั้น



รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมทิก TIG และกระบวนการเชื่อมแก๊ส OAW ของแนวเชื่อม 2 ชั้น

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG จำนวน 2 ชั้นพบว่าแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG ให้ความสูงเฉลี่ยของเนื้อเชื่อม 5.57 มิลลิเมตร เกิดการหลอมละลายลงในเนื้อเชื่อมชั้นที่ 1 ทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น เนื่องจากแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น มีการลดลงของการเงาของวัสดุพื้น ส่งผลเมื่อดำเนินการทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดี (รูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.5) ส่วนกระบวนการเชื่อม OAW พบว่าความสูงเฉลี่ยของเนื้อเชื่อมมีขนาด 3.97 มิลลิเมตร การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดี ลักษณะการให้ความร้อนของการเชื่อม OAW เป็นการแพร่กระจายความร้อนบนผิวชิ้นงานมาก ทำให้การหลอมละลายรวมกับแนวเชื่อมจำนวน 1 ชั้นค่อนข้างยาก ส่งผลให้บริเวณบางส่วนของเนื้อเชื่อมเกิดเป็นไม่สมบูรณ์ (รูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6)



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม TIG จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายตัวของทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวของทั้งสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น

4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อม 3 ชั้น

แนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG ของแนวเชื่อม 3 ชั้น พบว่าความสูงเฉลี่ยของเนื้อเชื่อมมีขนาด 8.58 มิลลิเมตร มีการหลอมละลายของเนื้อเชื่อมที่สมบูรณ์ เนื่องจากแนวเชื่อมในชั้นที่ 2 มีการลดลงของปริมาณการเจือจางของวัสดุพื้น ส่งผลให้ทั้งสเตนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดี (รูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8)

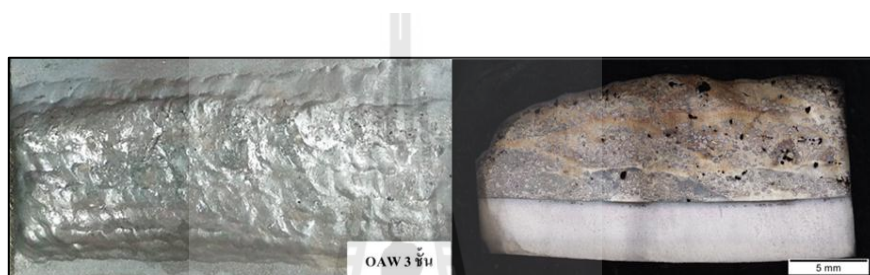
ส่วนกระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อม 3 ชั้นพบว่า การให้ความร้อนและการหลอมละลายมีลักษณะที่เหมือนกันกับแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น ความสูงเฉลี่ยของเนื้อเชื่อมมีขนาด 7.66 มิลลิเมตร การกระจายตัวของทั้งสเตนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดี (รูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม TIG จำนวน 3 ชั้น



รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายตัวของทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG ของแนวเชื่อม 3 ชั้น



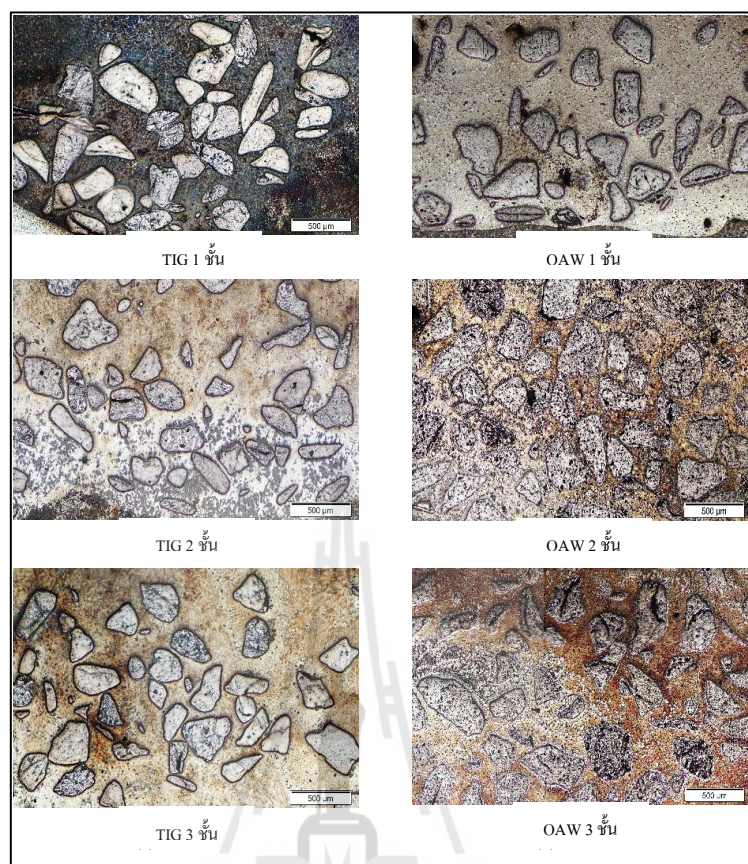
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น



รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวของทังสเตนคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อม 3 ชั้น

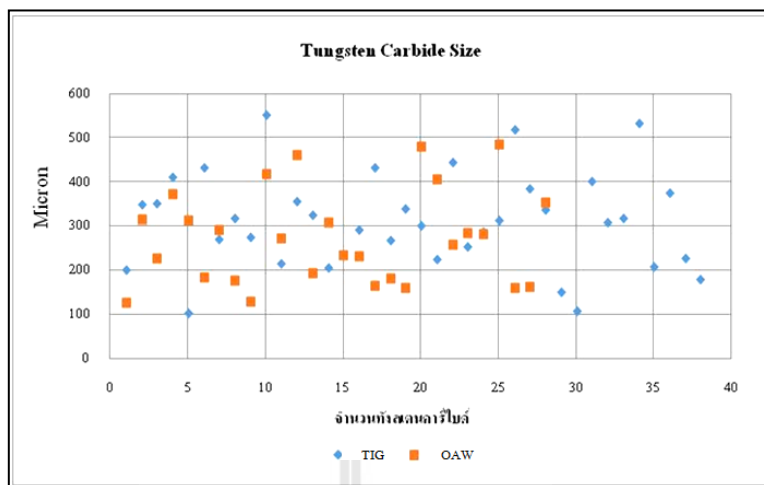
4.2 ผลทดสอบการวัดขนาดของทังสเตนคาร์ไบด์

จากกระบวนการเชื่อมที่ต่างกัน ทำให้เกิดความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการหลอมละลายของเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาขนาดของเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide Size) ที่กระจายอยู่ในบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) (รูปที่ 4.11)

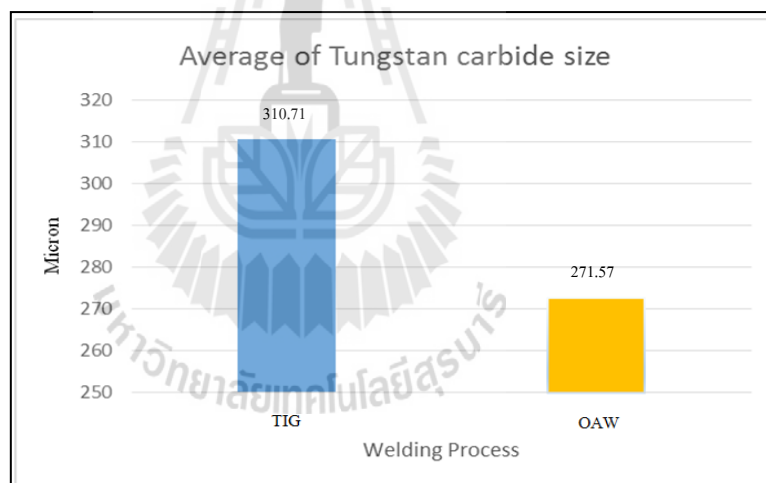


รูปที่ 4.11 แสดงขนาดเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW

กระบวนการเชื่อม TIG ของแนวเชื่อมจำนวน 1 ชั้น พบว่ามีจำนวนเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่วัดได้อยู่ที่ 38 เม็ด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 310.71 ไมครอน เนื่องจากกระบวนการเชื่อม TIG ให้ความร้อนบริเวณบ่อหลอมสูง เกิดการตกตะกอนรวมตัวกันของเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ และกระบวนการเชื่อม OAW ของแนวเชื่อมจำนวน 1 ชั้น มีจำนวนเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์อยู่ที่ 28 เม็ด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 272.57 ไมครอน (รูปที่ 4.12) และค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ของ OAW มีขนาดที่เล็กกว่า TIG (รูปที่ 4.13)



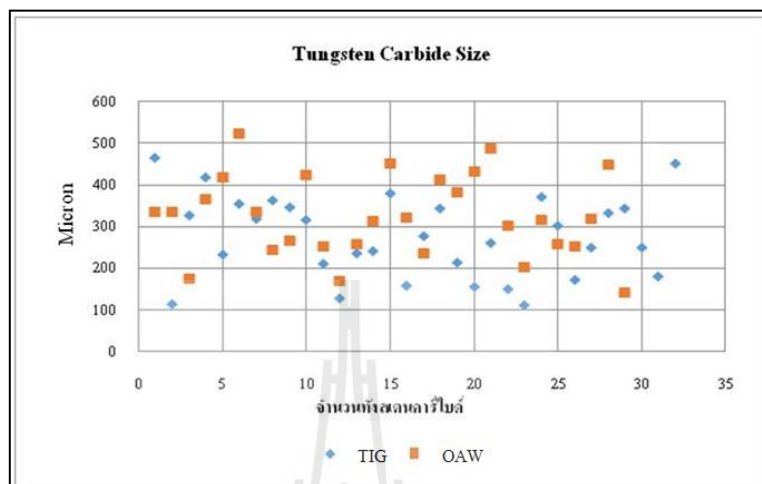
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟแสดงจำนวนเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 1 ชั้น



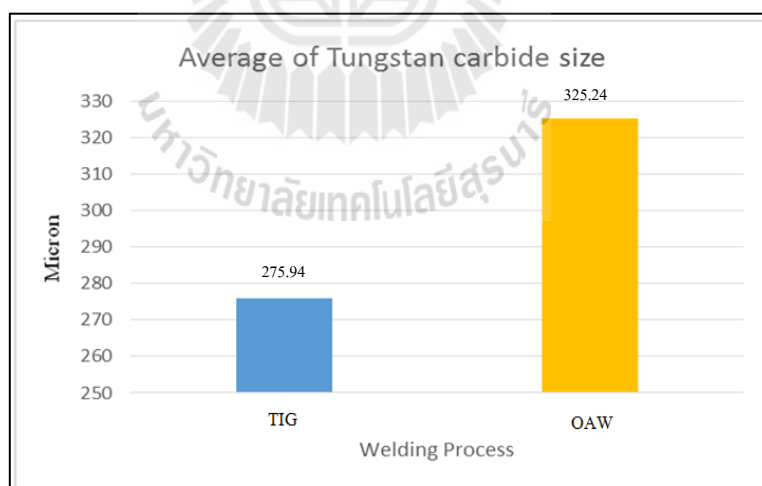
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 1 ชั้น

กระบวนการเชื่อม TIG จำนวน 2 ชั้น พบว่า มีจำนวนเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ที่วัดได้อยู่ที่ 32 เม็ด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 275.94 ไมครอน และกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น มีจำนวนเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์อยู่ 29 เม็ด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 325.24 ไมครอน (รูปที่ 4.14) และค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ของ TIG มีขนาดเล็กกว่า OAW เนื่องจากกระบวนการเชื่อม TIG ให้

ความร้อนบริเวณบ่อหลอมสูง ทำให้เกิดการหลอมละลายของเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์สูงกว่าการเชื่อม OAW (รูปที่ 4.15)

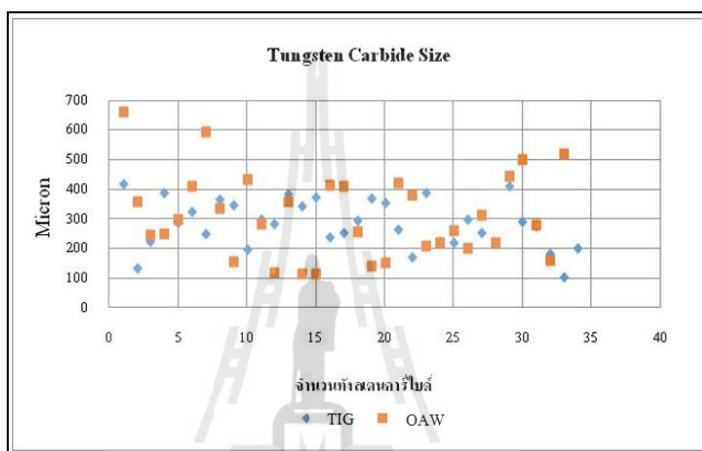


รูปที่ 4.14 แสดงกราฟแสดงจำนวนเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ของ กระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 2 ชั้น

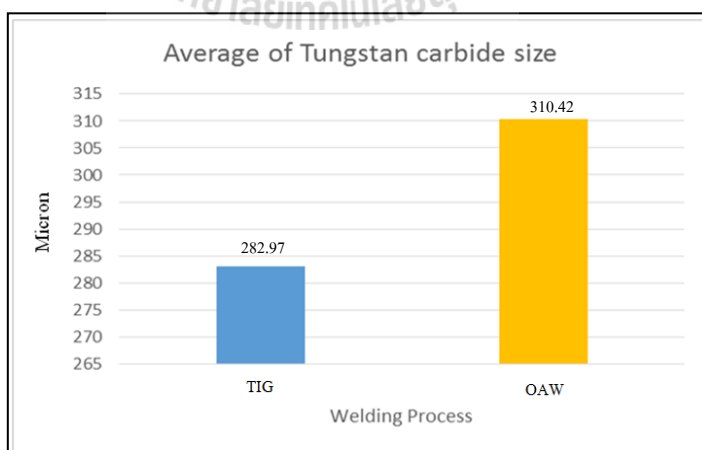


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ของ กระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 2 ชั้น

กระบวนการเชื่อม TIG จำนวน 3 ชั้น พบว่า มีจำนวนเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ที่วัดได้อยู่ที่ 34 เม็ด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 282.97 ไมครอน และกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น มีจำนวนเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์อยู่ที่ 33 เม็ด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 310.42 ไมครอน (รูปที่ 4.16) และค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ของ TIG มีขนาดที่เล็กกว่า OAW ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับแนวเชื่อม 2 ชั้น คือ การเชื่อม TIG จะให้ความร้อนบริเวณบ่อหลอมสูง ทำให้เกิดการหลอมละลายของเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์สูงกว่าการเชื่อม OAW (รูปที่ 4.17)



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟแสดงจำนวนเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อมทิก TIG และ OAW จำนวน 3 ชั้น



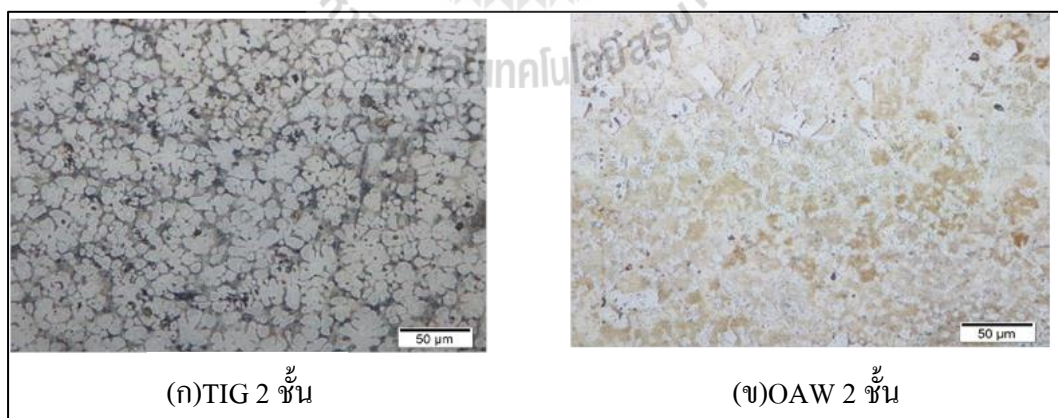
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟแสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 3 ชั้น

4.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

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

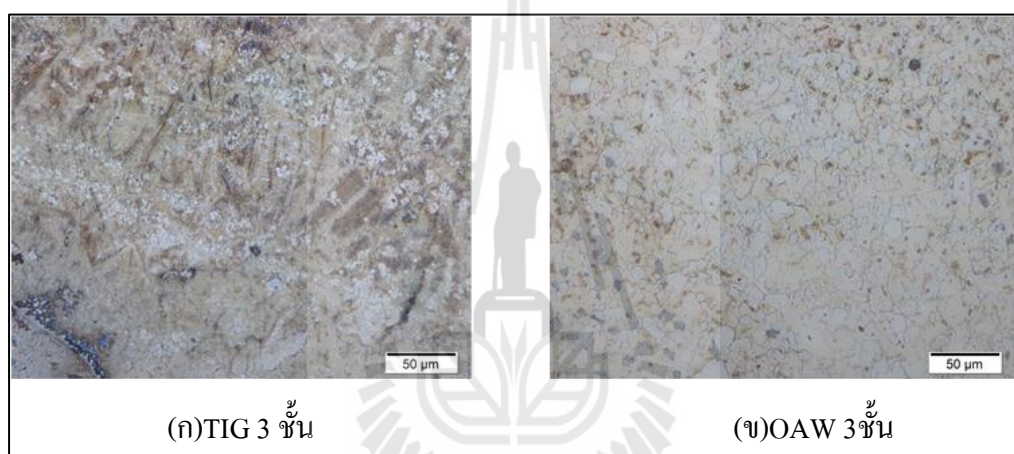
4.3.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม (Weld Zone)

โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อมแบบ OAW ที่กำลังขยาย 50X พบว่า กระบวนการเชื่อม TIG ที่แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้นที่อัตราความเร็วในการเชื่อม 8.45 เซนติเมตรต่ออนาที เกิดโครงสร้างเดนไดท์ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรท์ 67.6% และเพิลไรท์ 32.4% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ $89509.85 \mu\text{m}^2$ ขนาด Grain size เท่ากับ 11.31 แสดงดังรูปที่ 4.18(ก) ส่วนกระบวนการเชื่อม OAW ที่แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้นที่อัตราเร็วในการเชื่อม 3.23 เซนติเมตรต่ออนาที เกิดโครงสร้างเดนไดท์ ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรท์ 44.6% และเพิลไรท์ 55.4% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ $89509.85 \mu\text{m}^2$ ขนาด Grain size เท่ากับ 10.33 ตามแสดงดังรูปที่ 4.18(ข)



รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 2 ชั้น

ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW ที่กำลังขยาย 50X พบว่า กระบวนการเชื่อม TIG ที่แนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้นที่อัตราเร็วในการเชื่อม 8.45 เซนติเมตรต่อนาทีเกิดโครงสร้างเดนไดท์ ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์ 69.1 % และเพิลไรต์ 30.9 % บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ 89509.85 μm^2 ขนาด Grain size เท่ากับ 11.44 แสดงดังรูปที่ 4.19 (ก) ส่วนกระบวนการเชื่อม OAW ที่แนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้นที่อัตราเร็วในการเชื่อม 3.23 เซนติเมตรต่อนาที เกิดโครงสร้างเดนไดท์ ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์ 70.6 % และเพิลไรต์ 29.4 % บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ 89509.85 μm^2 ขนาด Grain size เท่ากับ 11.04 ตามแสดงดังรูปที่ 4.19 (ข)



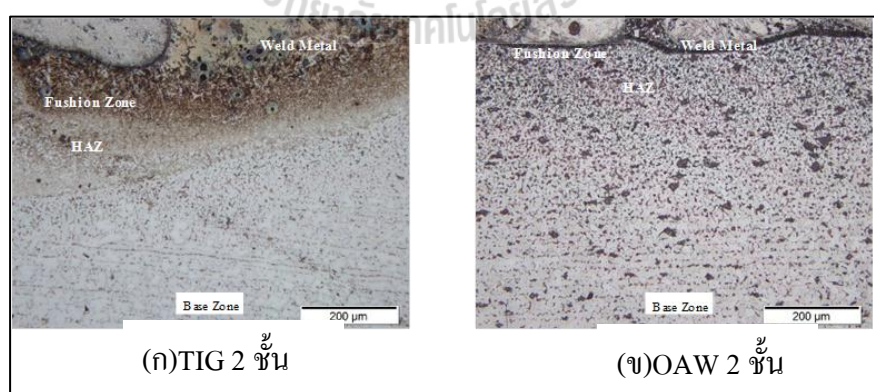
รูปที่ 4.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 3 ชั้น

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW ทั้งจำนวน 2 ชั้นและ 3 ชั้น พบว่า ลักษณะโครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone) มีลักษณะเป็นเดนไดท์ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเพิลไรต์ทุกการเชื่อมทั้งกระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW ทั้งจำนวน 2 ชั้นและ 3 ชั้น ขนาดของเม็ดเกรนมีความละเอียดขึ้นเมื่อจำนวนชั้นของการเชื่อมเพิ่มขึ้น และความละเอียดของเกรนยังขึ้นอยู่กับประเภทกระบวนการเชื่อมและการให้ความร้อนในการเชื่อม ซึ่งในกระบวนการเชื่อม OAW จะให้ความละเอียดของเกรนมากกว่ากระบวนการเชื่อม TIG เนื่องจากการเชื่อม TIG ให้กระแสไฟฟ้าที่คงที่ การกระจายของความร้อนสูงเฉพาะบริเวณแคบที่เกิดการหลอมละลาย และเกิดความร้อนที่สะสมในชิ้นงานน้อยกว่า ส่วนการเชื่อม OAW การสร้างบ่อหลอมละลาย จะต้องใช้เวลานานกว่า ทำให้

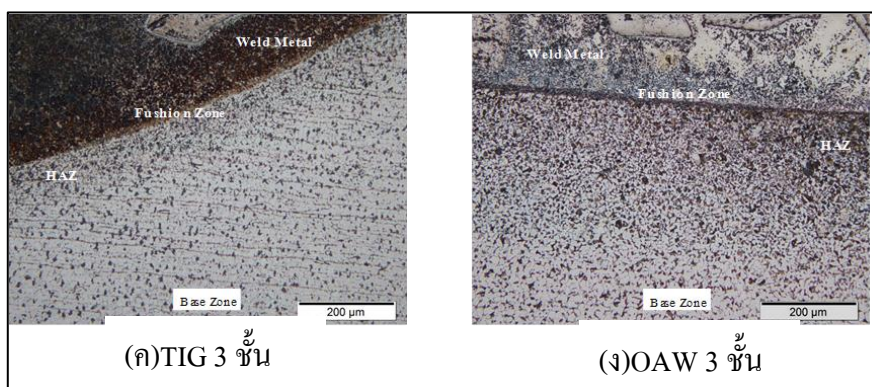
ความร้อนสะสมในชิ้นงานมาก เมื่อเย็นตัวในอากาศ ส่งผลทำให้เม็ดเกรนมีความละเอียดขึ้น (รูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19)

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 TIG แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้นที่อัตราเร็วในการเชื่อม 8.45 เซนติเมตรต่อนาที และกระบวนการเชื่อม OAW แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้นที่อัตราเร็วในการเชื่อม 3.23 เซนติเมตรต่อนาที โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุ (Fusion Zone) และบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบ (Base Zone) มีลักษณะของเกรนที่แตกต่างกัน ซึ่งการเชื่อม OAW ขนาดของเกรนมีความละเอียดมากกว่าการเชื่อม TIG ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากกระบวนการเชื่อมโดยตรงแสดงดังรูปที่ 4.20 (ก)(ข) และกระบวนการเชื่อม TIG แนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้นที่อัตราเร็วในการเชื่อม 8.45 เซนติเมตรต่อนาที และกระบวนการเชื่อม OAW แนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้นที่อัตราเร็วในการเชื่อม 3.23 เซนติเมตรต่อนาที โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal) พื้นที่กระทบร้อน (HAZ) บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุ (Fusion Zone) และบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบ (Base Zone) มีลักษณะของเกรนที่แตกต่าง ซึ่งมีขนาดของเกรนละเอียดกว่าการเชื่อม 2 ชั้น แสดงดังรูปที่ 4.21 (ค) (ง) ซึ่งขนาดเกรนของโครงสร้างโลหะมีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะ ชิ้นงานโลหะที่มีขนาดเกรนเล็กและมีความละเอียด และจำนวนเกรนมาก วัสดุนั้นจะมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานโลหะที่มีขนาดเกรนหยาบและจำนวนเกรนน้อย



รูปที่ 4.20 แสดงโครงสร้างบริเวณ Weld Metal, Fusion Zone, HAZ, และ Base Zone ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 2 ชั้น

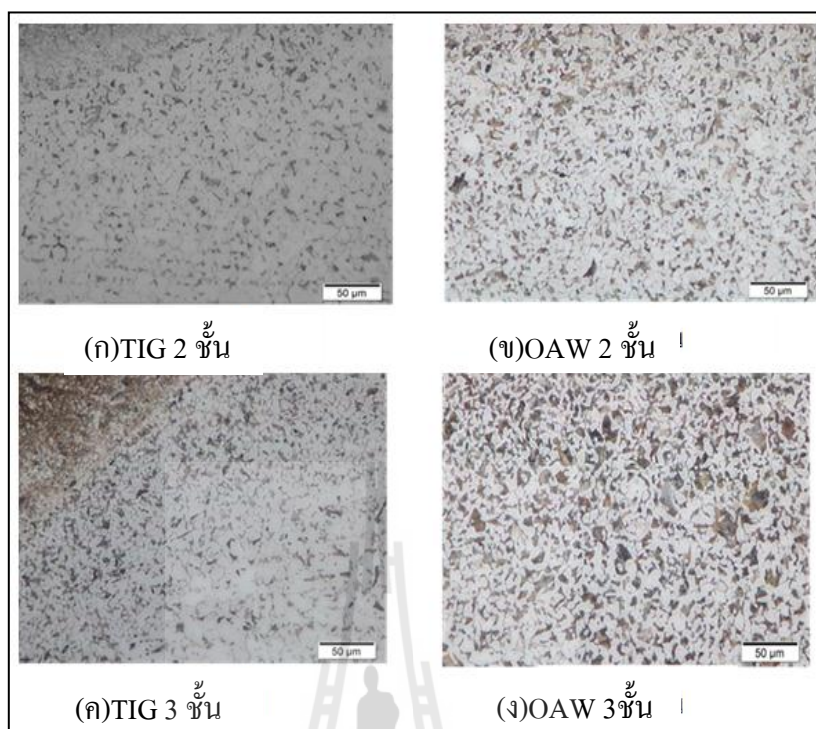


รูปที่ 4.21 แสดงโครงสร้างบริเวณ Weld Metal, Fusion Zone, HAZ, และ Base Zone ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW 3 ชั้น

4.3.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ)

โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) พบว่า ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG จำนวน 2 ชั้น ที่ระดับอัตราเร็ว 8.45 เซนติเมตรต่อนาที มีลักษณะโครงสร้าง เฟอร์ไรท์ 68.3% และเพิลไรท์ 31.7% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ $89509.85 \mu\text{m}^2$ ขนาด Grain Size เท่ากับ 10.16 มีลักษณะเกรนที่ละเอียดเรียงตัวชิดติดกัน แสดงดังในรูปที่ 4.22 (ก) และการเชื่อมแบบ OAW 2 ชั้น ที่ระดับอัตราเร็ว 3.24 เซนติเมตรต่อนาที มีลักษณะโครงสร้าง เฟอร์ไรท์ 68.7% และเพิลไรท์ 31.3% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ $89509.85 \mu\text{m}^2$ ขนาด Grain Size เท่ากับ 11.24 ไมครอน แสดงในรูปที่ 4.22 (ข)

โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) พบว่า กระบวนการเชื่อม TIG จำนวน 3 ชั้น ที่ระดับอัตราเร็ว 8.45 เซนติเมตรต่อนาที มีลักษณะโครงสร้าง เฟอร์ไรท์ 58.1% และเพิลไรท์ 41.9% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ $89509.85 \mu\text{m}^2$ ขนาด Grain Size เท่ากับ 11.29 แสดงดังในรูปที่ 4.22 (ค) และกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้น ที่ระดับอัตราเร็ว 3.23 เซนติเมตรต่อนาที มีลักษณะโครงสร้าง เฟอร์ไรท์ 58.7% และเพิลไรท์ 41.3% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ $89509.85 \mu\text{m}^2$ ขนาด Grain Size เท่ากับ 11.77 ไมครอน แสดงดังในรูปที่ 4.22 (ง)

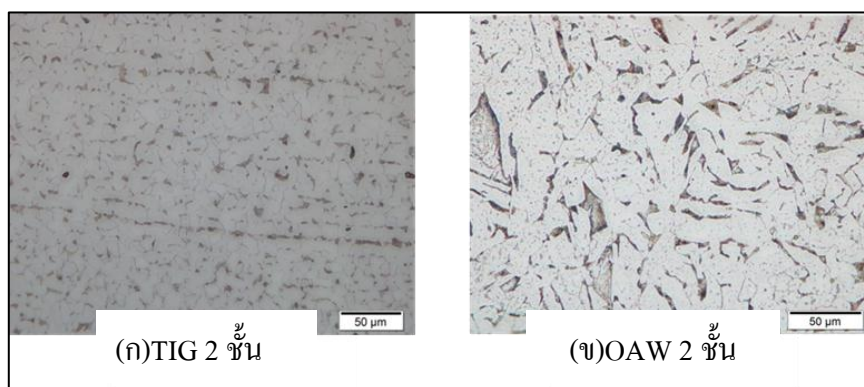


รูปที่ 4.22 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 2 ชั้น

จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW ระหว่างการเชื่อม 2 ชั้นและ 3 ชั้น ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุ (Fusion Zone) เป็นบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) และเกิดเป็นโครงสร้างเฟลไรท์ และเพอร์ไรท์ ที่มองเห็นความแตกต่างกันได้ชัดเจน จะเห็นลักษณะเกรนของกระบวนการเชื่อม TIG ที่มีขนาดใหญ่กว่าเกรนกระบวนการเชื่อม OAW ซึ่งขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่า ส่งผลทำให้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าขนาดเกรนที่มีขนาดใหญ่

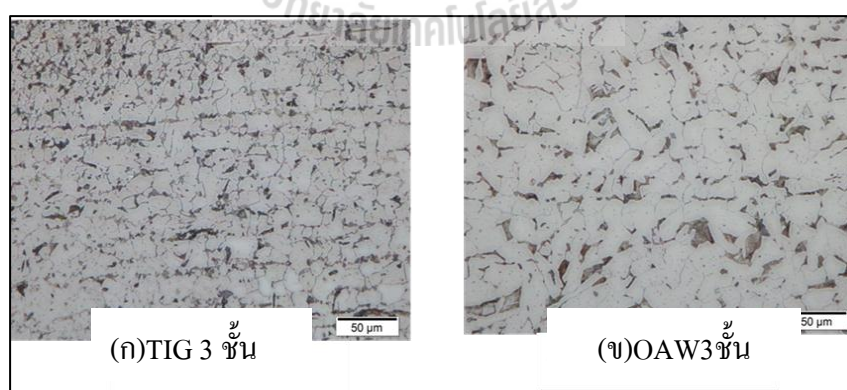
4.3.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพื้น (Base Zone)

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณวัสดุพื้น (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG จำนวน 2 ชั้นที่ระดับอัตราเร็ว 8.45 เซนติเมตรต่อนาที มีลักษณะโครงสร้างเฟอร์ไรท์ 83.8% และเฟลไรท์ 16.2 % บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ 89509.85 μm^2 ขนาด Grain Size เท่ากับ 10.28 แสดงดังในรูปที่ 4.23 (ก) และกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากได้รับอิทธิพลความร้อนจากกระบวนการเชื่อมมีลักษณะโครงสร้าง เฟอร์ไรท์ 72.8 % และเฟลไรท์ 27.2 % บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ 89509.85 μm^2 ขนาด Grain Size เท่ากับ 10.63 ไมครอน แสดงดังในรูปที่ 4.23 (ข)



รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบ TIG และ OAW จำนวน 2 ชั้น

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณวัสดุพื้น (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG จำนวน 3 ชั้น ที่ระดับอัตราเร็ว 8.45 เซนติเมตรต่ออนาที มีลักษณะโครงสร้างเป็น เฟอร์ไรต์ 72.0 % และ เพิลไรต์ 28.0% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่า พื้นที่ 89509.85 μm^2 แสดงดังในรูปที่ 4.24 (ก) และกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 3 ชั้นจะ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากได้รับอิทธิพลความร้อนจากกระบวนการเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างเฟอร์ไรต์ 78.2% และเพิลไรต์ 21.8% บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 50 เท่าพื้นที่ 89509.85 μm^2 ขนาด Grain Size เท่ากับ 11.05 ไมครอน แสดงดังในรูปที่ 4.24 (ข)



รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม.(Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAWจำนวน 3 ชั้น

จะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone) ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลความร้อนน้อยที่สุด ไม่ได้รับโดยตรง เพราะฉะนั้นโครงสร้างจุลภาคของวัสดุบริเวณนี้จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือมีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจุลภาคแต่ไม่ได้แตกต่างไปจากเดิมมาก ส่วนโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW พบว่า ขนาดของเกรนใหญ่กว่ากระบวนการเชื่อม TIG อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผลมาจากการให้ความร้อนของการเชื่อม OAW จะให้ระยะเวลาในการสร้างบ่อหลอมที่นาน เกิดความร้อนสะสมที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดช่วงเวลาการเย็นตัวนานขึ้น และเม็ดเกรนมีช่วงเวลาในการขยายตัวนานขึ้น ส่งผลทำให้เม็ดเกรนของการเชื่อม OAW มีขนาดใหญ่กว่าการเชื่อม TIG

4.4 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

4.4.1 แบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers)

การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานพอกผิวแข็ง เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 ที่กำหนดคือ การทดสอบความแข็ง โดยพิจารณาจากกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันของกระบวนการเชื่อม 2 ชั้นระหว่างการเชื่อม TIG และการเชื่อม OAW กระบวนการเชื่อม 3 ชั้นระหว่างการเชื่อม TIG และการเชื่อม OAW ซึ่งได้ทำการทดสอบ 2 วิธีได้แก่

- 1) การทดสอบความแข็งแบบ Micro Vickers Hardness
- 2) การทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Test

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 2 ชั้น

ระยะ (mm.)	ระยะ (µm.)	ความแข็ง HV		ระยะ (mm.)	ระยะ (µm.)	ความแข็ง HV	
		TIG	OAW			TIG	OAW
0.15	150	583.2	839.4	3.75	3750	610.6	1991.2
0.3	300	480	1071.6	3.9	3900	632.2	629.4
0.45	450	928.3	1695.3	4.05	4050	621.2	929.9
0.6	600	863	1744.1	4.2	4200	578.2	
0.75	750	901.6	1582.5	4.35	4350	2065.9	
0.9	900	975.6	1847.1	4.5	4500	2281.7	
1.05	1050	932.9	735.6	4.65	4650	526.4	
1.2	1200	1004	704.1	4.8	4800	635.6	
1.35	1350	2472.6	714.7	4.95	4950	533.7	

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 2 ชั้น (ต่อ)

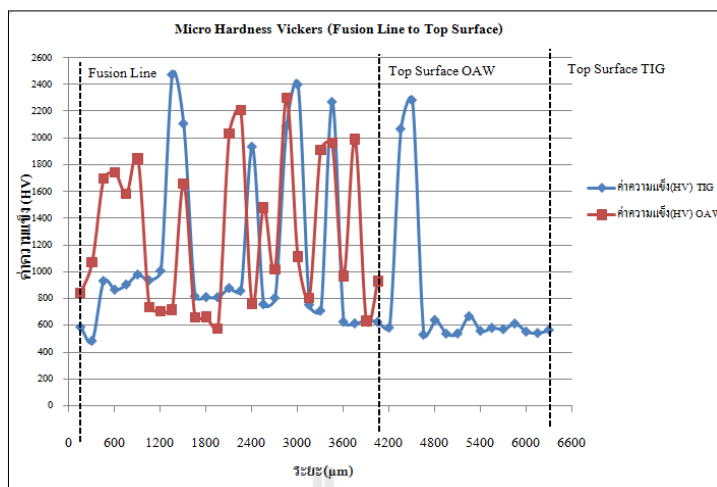
ระยะ (mm.)	ระยะ ($\mu\text{m.}$)	ความแข็ง HV		ระยะ (mm.)	ระยะ ($\mu\text{m.}$)	ความแข็ง HV	
		TIG	OAW			TIG	OAW
1.5	1500	2105.5	1657.6	5.1	5100	535	
1.65	1650	814.2	659.9	5.25	5250	663.8	
1.8	1800	807.7	661.7	5.4	5400	554.3	
1.95	1950	806.5	574.6	5.55	5550	576.7	
2.1	2100	874.7	2033.6	5.7	5700	566.8	
2.25	2250	854.6	2210.3				
2.4	2400	1933	760				
2.55	2550	753.6	1479.7				
2.7	2700	800.3	1018.6				
2.85	2850	2086.2	2299.3				
3	3000	2398.5	1113.2				
3.15	3150	748.9	804.6				
3.3	3300	705.6	1911.5				
3.45	3450	2268.6	1964.1				
3.6	3600	622.2	966.7				

ตารางที่ 4.2 ความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 3 ชั้น

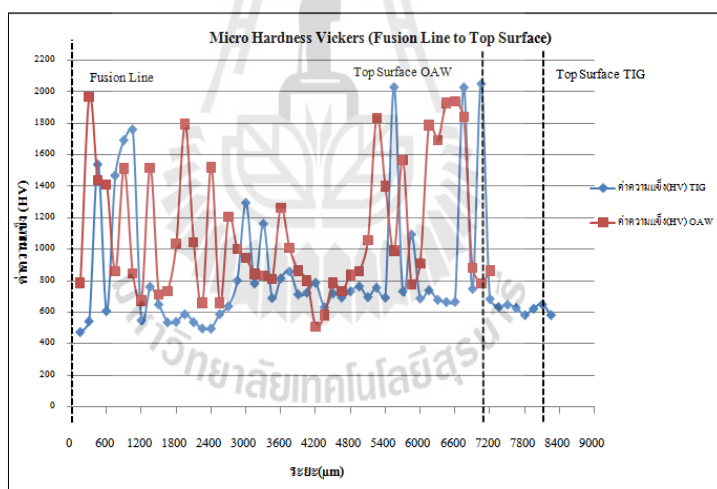
ระยะ ($\mu\text{m.}$)	ความแข็งHV		ระยะ ($\mu\text{m.}$)	ความแข็งHV		ระยะ ($\mu\text{m.}$)	ความแข็งHV	
	TIG	OAW		TIG	OAW		TIG	OAW
150	472.3	783.3	3900	710.9	863	4500	718	783.3
300	540.8	1965.3	4050	722.2	799.1	4650	692	730.9
450	1535.4	1436.4	4200	784.5	507.2	4800	730.6	832.9
600	606.2	1410.5	4350	629.8	579.7	4950	762	856.9
750	1464.6	858.3	4500	718	783.3	5100	694.2	1055.3
900	1688.8	1512.3	4650	692	730.9	5250	753.9	1834.4
1050	1756.9	846.2	4800	730.6	832.9	5400	690.5	1397.8

ตารางที่ 4.2 ความแข็งแบบ Micro Vicker Hardness ของการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 3 ชั้น (ต่อ)

ระยะ ($\mu\text{m.}$)	ความแข็งHV		ระยะ ($\mu\text{m.}$)	ความแข็งHV		ระยะ ($\mu\text{m.}$)	ความแข็งHV	
	TIG	OAW		TIG	OAW		TIG	OAW
1200	546.7	671.9	4950	762	856.9	5550	2025	989.6
1350	759.8	1514.7	5100	694.2	1055.3	5700	731.1	1564.9
1500	647.6	709.9	5250	753.9	1834.4	5850	1091.2	772
1650	534.1	732.2	5400	690.5	1397.8	6000	685.2	906
1800	537.4	1035.4	5550	2025	989.6	6150	737.3	1787.9
1950	585.1	1793	5700	731.1	1564.9	6300	677.1	1692.5
2100	535.4	1043.9	5850	1091.2	772	6450	663.1	1928.4
2250	495.4	657.2	6000	685.2	906	6600	664.7	1939.8
2400	494.8	1519.4	6150	737.3	1787.9	6750	2023.8	1838.6
2550	586.5	657.7	6300	677.1	1692.5	6900	746.5	880.9
2700	635.8	1204.7	6450	663.1	1928.4	7050	2045.9	780.7
2850	799.1	1001	6600	664.7	1939.8	7200	682.3	862.7
3000	1292.1	941.8	3600	812.3	1259.1	7350	631.5	
3150	780.4	842	3750	855.9	1005.3	7500	645.6	
3300	1158.9	831.6	3900	710.9	863	7650	625.4	
3450	688.1	807.4	4050	722.2	799.1	7800	580.2	
3600	812.3	1259.1	4200	784.5	507.2	7950	620.8	
3750	855.9	1005.3	4350	629.8	579.7	8100	647.8	



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแข็งของของแนวเชื่อม 2 ชั้น
ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแข็งของของแนวเชื่อม 3 ชั้น
ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงการกระจายตัวของความแข็งจากขอบรอยเชื่อม (Fusion Boundary) ไปจนถึงผิวด้านบนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (Top Surface) โดยจุดที่มีค่าความแข็งสูงคือ จุดที่มีการกดถูกเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ โดยตรงจะเห็นได้ว่ากระบวนการเชื่อม TIG จะมีตำแหน่งที่พบเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ได้น้อยกว่ากระบวนการเชื่อมแบบ OAW เนื่องจากการเชื่อม TIG ให้ความร้อนในการหลอมละลายสูง ทำให้ทังสเตนคาร์ไบด์บางส่วนถูกหลอมละลาย

จากรูปที่ 4.25 กระบวนการเชื่อม 2 ชั้น ความแข็งของกระบวนการเชื่อม TIG พื้นที่จากขอบรอยเชื่อม (Fusion Boundary) ไปจนถึงผิวด้านบนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (Top Surface) มีระยะประมาณ 6300 μm พบว่า บริเวณที่กดถูกเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ทั่วทั้งแนว สังเกตได้จากกราฟที่สูงสุดและต่ำสุด ซึ่งหมายถึงการกระจายตัวของเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ดี

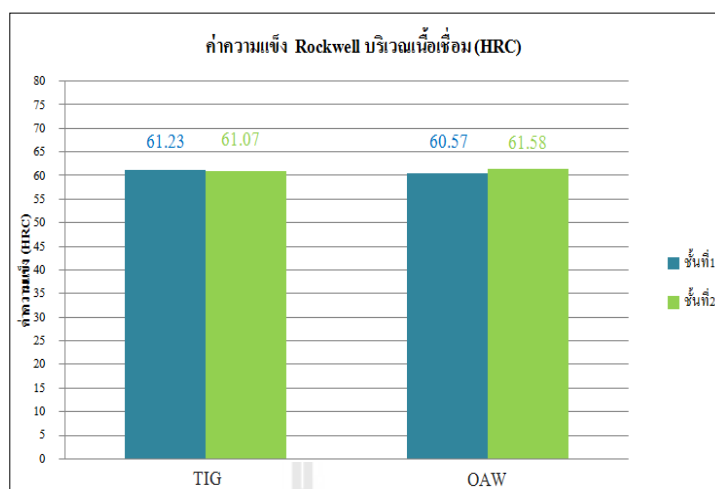
และจากรูปที่ 4.26 กระบวนการเชื่อมจำนวน 3 ชั้นความแข็งของกระบวนการเชื่อม TIG พื้นที่จากขอบรอยเชื่อม (Fusion Boundary) ไปจนถึงผิวด้านบนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (Top Surface) มีระยะกว้างประมาณ 8250 μm และค่าความแข็งมีการจับกลุ่มแบ่งชั้นกันอย่างชัดเจนส่วนกระบวนการเชื่อมแบบ OAW ที่มีระยะแคบกว่าจะประมาณ 7200 μm และค่าความแข็งมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

4.4.2 แบบ Rockwell

โดยพิจารณาจากกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันคือ กระบวนการเชื่อม TIG และการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น และกระบวนการเชื่อม TIG และการเชื่อม OAW จำนวน 3

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลความแข็งแบบ Rockwell Hardness ของการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 2 ชั้น

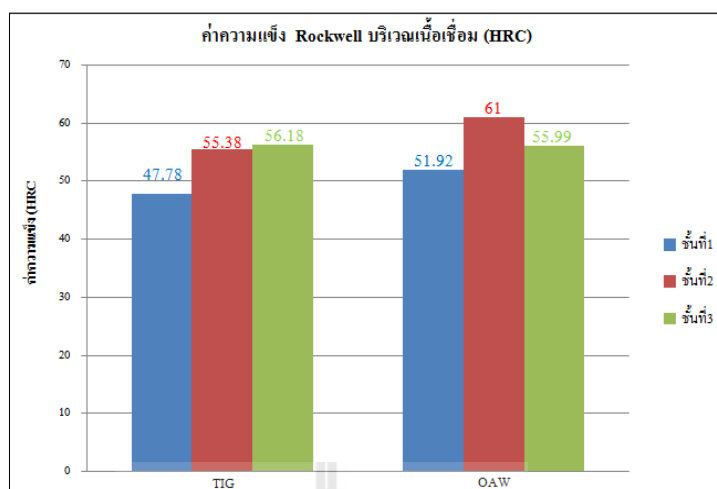
จุดที่	ค่าความแข็ง (HRC)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 1
1	53.2	58.9	59.6	59.6
2	55.2	66.9	58.4	61.4
3	55.9	63.7	60.7	62.8
4	65.9	57.4	61.8	65.4
5	67.6	62.9	64.2	63.3
6	62.7	55.9	58.9	58.7
7	60.4	66.7	62.5	57.5
8	64.6	60.8	55.2	58.4



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแข็งระหว่างกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลความแข็งแบบ Rockwell Hardness ของการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 3 ชั้น

จุดที่	ค่าความแข็ง (HRC)					
	TIG			TIG		
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
1	60.6	61.2	45.6	54.9	59.6	54.6
2	52.4	42.2	54.8	56.6	64.6	59.7
3	51.7	64.8	55.6	53	58.5	59.5
4	50.4	60.1	62.3	49.6	66.6	49.9
5	52.4	59.7	55.3	33.2	60.5	60
6	42.6	51.7	63.3	54.8	66.6	62.9
7	31.6	59.1	58.4	47.5	64.1	56.3
8	42.1	53.1	42.6	58.6	61.5	57.7
9	54.6	56.4	61.8	52.4	50.7	46.4
10	39.4	45.5	62.1	58.6	57.3	52.9



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแข็งของกระบวนการเชื่อม TIG กับ OAW จำนวน 3 ชั้น

จากรูปที่ 4.27 การทดสอบความแข็งด้วยการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบชิ้นงานเชื่อมจำนวน 2 ชั้น พบว่า ทั้ง 2 กระบวนการเชื่อมมีค่าความแข็งที่สูงใกล้เคียงกัน ซึ่งกระบวนการเชื่อม TIG จำนวน 1 ชั้น ให้ค่าความแข็ง 61.23 HRC และจำนวน 2 ชั้น ให้ค่าความแข็ง 61.07 HRC ส่วนกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 1 ชั้น ให้ค่าความแข็ง 60.57 HRC และจำนวน 2 ชั้น ให้ค่าความแข็ง 61.58 HRC ส่วนรูปที่ 4.28 เป็นการเปรียบเทียบชิ้นงานเชื่อมทั้ง 2 ชั้น พบว่า กระบวนการเชื่อม TIG ให้ค่าความแข็งที่สูงขึ้นเรื่อยๆเป็นลำดับคือ จำนวน 1 ชั้น ให้ค่าความแข็ง 47.78 HRC จำนวน 2 ชั้น ให้ค่าความแข็ง 55.38 HRC และจำนวน 3 ชั้น ให้ค่าความแข็ง 56.18 HRC เนื่องจากผลของการกระจายตัวของเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ที่ดีขึ้นของแต่ละชั้น ส่วนกระบวนการเชื่อม OAW พบว่า แนวเชื่อมจำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้นมีค่าความแข็งที่ดีขึ้นคือ 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 เกิดเป็นโพรงอากาศ ทำให้ค่าความแข็งลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งของแนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้น ก็ยังให้ความแข็งที่สูง

4.5 ผลทดสอบการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ Abrasive Resistance

ตามมาตรฐาน ASTM G65

จากการทดสอบเพื่อศึกษาความต้านทานการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ (Abrasion Test) ตามมาตรฐาน ASTM G65 ของชิ้นงานที่เชื่อมพอกผิวแข็งด้วยวิธีการเชื่อม TIG และ OAW โดยพิจารณาความต้านทานจากน้ำหนักของชิ้นงานที่สูญเสียไป

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลทดสอบการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ Abrasive Resistance ตามมาตรฐาน ASTM G65 ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW

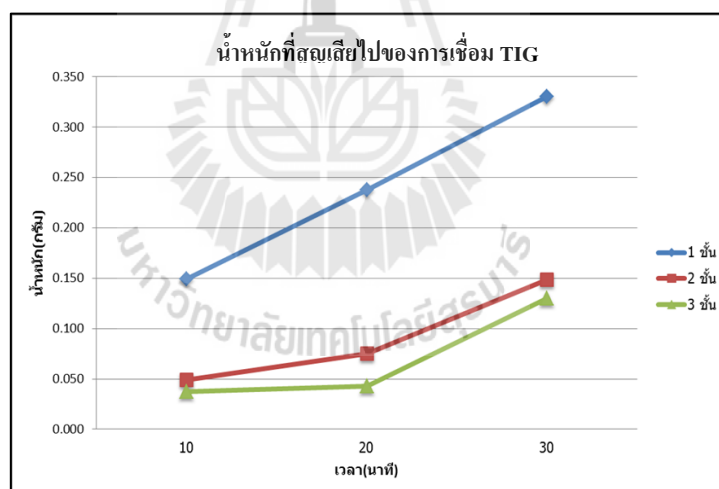
ประเภท	จำนวนชิ้น	ชั้นที่	น้ำหนักก่อนทดสอบ	น้ำหนักหลังการทดสอบ			น้ำหนักที่หายไป		
				10 นาที (g)	20 นาที (g)	30 นาที (g)	10 นาที (g)	20 นาที (g)	30 นาที (g)
GTAW	1	1	91.183	90.976	90.855	90.791	0.207	0.328	0.392
		2	83.863	83.764	83.708	83.578	0.099	0.155	0.285
		3	91.028	90.886	90.799	90.715	0.142	0.229	0.313
		Avg.	88.691	88.542	88.454	88.361	0.149	0.237	0.330
	2	1	144.241	144.194	144.173	144.087	0.047	0.068	0.154
		2	155.865	155.829	155.829	155.705	0.036	0.054	0.160
		3	151.152	151.089	151.089	151.021	0.063	0.103	0.131
		Avg.	150.419	150.371	150.371	150.271	0.049	0.075	0.148
	3	1	211.803	211.770	211.762	211.702	0.033	0.041	0.101
		2	235.969	235.935	235.931	235.811	0.034	0.038	0.158
		3	226.145	226.101	226.095	226.015	0.044	0.050	0.130
		Avg.	224.639	224.602	224.596	224.509	0.037	0.043	0.130
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

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลทดสอบการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ Abrasive Resistance ตามมาตรฐาน ASTM G65 ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW (ต่อ)

ประเภท	จำนวนชั้น	ชั้นที่	น้ำหนักก่อนทดสอบ	น้ำหนักหลังการทดสอบ			น้ำหนักที่หายไป		
				10 นาที (g)	20 นาที (g)	30 นาที (g)	10 นาที (g)	20 นาที (g)	30 นาที (g)
OWA	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 TIG ของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1, 2 และ 3

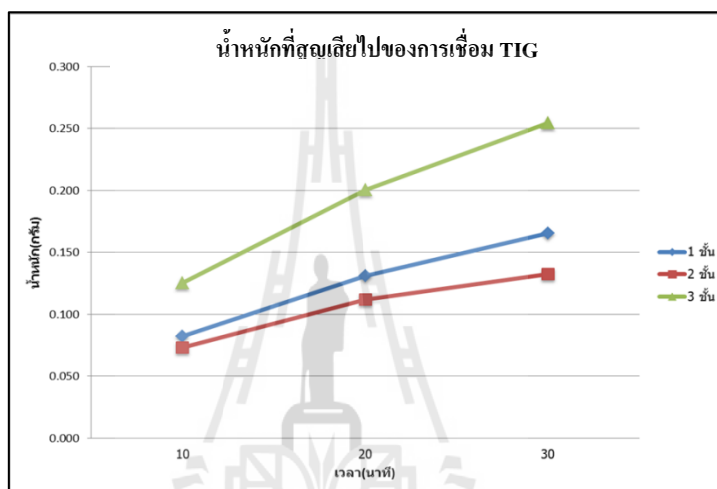


รูปที่ 4.29 แสดงกราฟแสดงเวลาและน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งจำนวนที่ 1, 2 และ 3 ชั้นของกระบวนการเชื่อม TIG

จากรูปที่ 4.29 พบว่า การทดสอบความต้านทานการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ (Abrasion Test) ตามมาตรฐาน ASTM G65 อัตราน้ำหนักที่สูญเสียไปของกระบวนการเชื่อม TIG ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็งจำนวน 3 ชั้น ให้ค่าความต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด รองลงมาคือ 2 ชั้น และ 1 ชั้น ตามลำดับ ซึ่งในช่วง 10 นาที และ 20 นาที ชิ้นงานให้ค่าความต้านทาน

ที่ต่ำมาก และในช่วง 30 นาที ค่าความต้านทานการสึกหรอมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากเป็นบริเวณบางส่วนที่มีการกระจายตัวของเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์น้อย ซึ่งเมื่อทำการทดสอบพบบริเวณที่มีการกระจายตัวของทังสเตนคาร์ไบด์ ค่าความต้านทานการสึกหรอจะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ซึ่งในการทดสอบ พบว่ามีค่าความต้านทานการสึกหรอมีความสอดคล้องกับการทดสอบค่าแข็ง

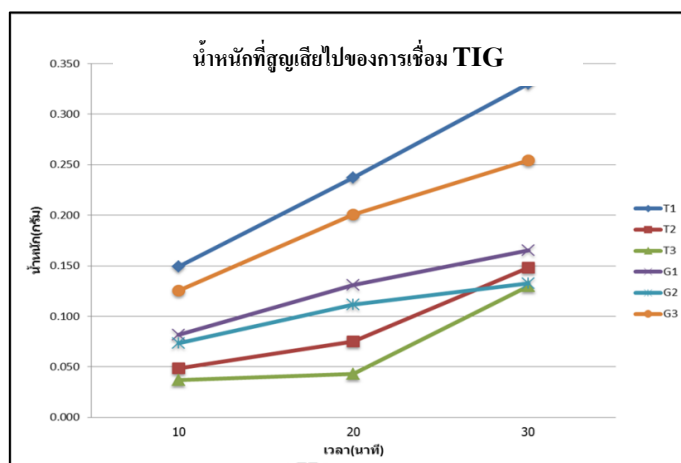
2) อัตราน้ำหนัที่สูญเสียบของชิ้นงานของกระบวนการเชื่อม OAW ของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 1, 2 และ 3 ชั้น



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟแสดงเวลาและน้ำหนักที่สูญเสียบของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งจำนวนที่ 1, 2 และ 3 ชั้น ของกระบวนการเชื่อม OAW

จากรูปที่ 4.30 พบว่า อัตราน้ำหนักที่สูญเสียบของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้น มีอัตราการต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด รองลงมาคือ 1 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นซึ่งมีความสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งคือ เนื่องจากบริเวณผิวบนของแนวเชื่อม 3 ชั้นเกิดจากอิทธิพลของความร้อน ทำให้เกิดบ่อหลอมละลายที่ชำรุดส่งผลให้การหลอมละลายของลวดเติม (Filler Metal) แนวไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็นโพรงอากาศ ทำให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานการสึกหรอลดลง

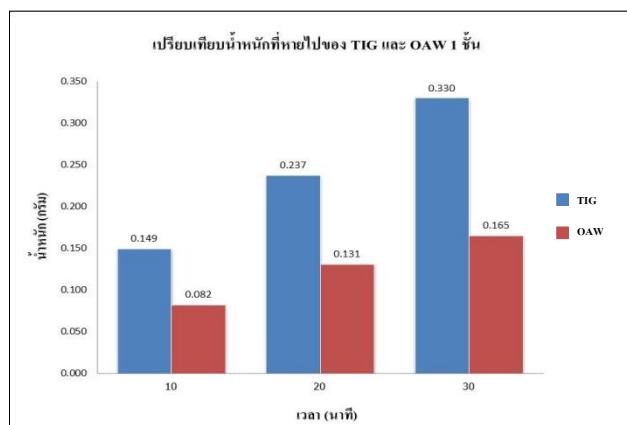
3) อัตราน้ำหนักที่หายไปของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW ของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งของชั้นที่ 1, 2 และ 3 จำนวน 6 ชั้น



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟแสดงเวลาและน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง จำนวนที่ 1, 2 และ 3 ชั้น ของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW

จากรูปที่ 4.31 พบว่า การทดสอบความต้านทานการสึกหรอจากการเสียดสีด้วย กระบวนการ (Abrasion Test) ตามมาตรฐาน ASTM G65 อัตราน้ำหนักที่สูญเสียไปของกระบวนการ เชื่อม TIG ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกผิวแข็ง T3 มีอัตราการต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด รองลงมาคือ T2 , G2, G1, G3 และ T1 ชั้น ตามลำดับ ในส่วนของการเชื่อม OAW จำนวน 2 ชั้นใน ช่วย 30 นาที มีแนวโน้มที่ค่าความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น เกิดจากการกระจายตัวของเม็ด ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ดี ส่วนการเชื่อม T1, T2, T3, G1 และ G3 มีแนวโน้มในการสึกหรอไปในทิศทาง เดียวกัน โดยที่ T1 มีแนวโน้มของค่าความต้านทานการสึกหรอลดลง

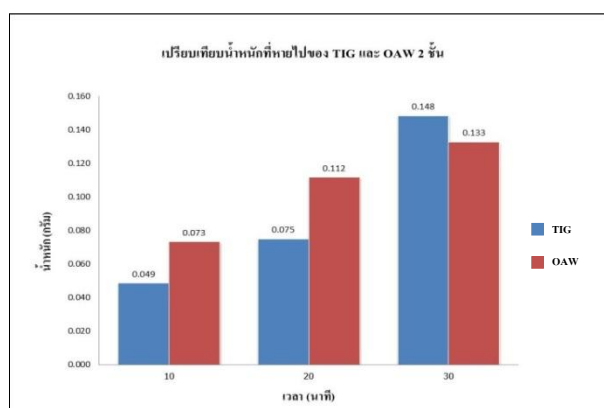
4) การเปรียบเทียบอัตราน้ำหนักที่หายไปของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW ของชิ้นงาน 1 ชั้น



รูปที่ 4.32 แสดงกราฟแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลาของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW ของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น

จากรูปที่ 4.32 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอจากการเสียดสีด้วยกระบวนการ (Abrasion Test) เมื่อทำการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW พอกผิวแข็ง 1 ชั้น พบว่า ในแต่ละช่วงเวลามีระดับของน้ำหนักที่สูญเสียไปเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความแข็ง ซึ่งแสดงว่า บริเวณของผิวบนของแนวเชื่อมให้ค่าความต้านทานการสึกหรอและค่าความแข็งสูงสุด

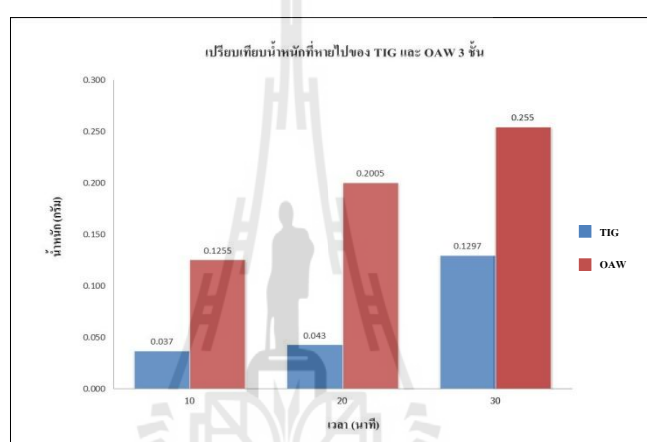
5) การเปรียบเทียบอัตราน้ำหนักที่หายไปของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW ของชิ้นงาน 2 ชั้น



รูปที่ 4.33 แสดงกราฟแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลาของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW ของชิ้นงาน 2 ชั้น

จากรูปที่ 4.33 พบว่า กระบวนการเชื่อม OAW และกระบวนการเชื่อม TIG ของแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น มีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งในช่วง 30 นาที ของการเชื่อม TIG มีการสูญเสียของน้ำหนักสูงที่สุด แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมจำนวน 1 ชั้น พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักน้อยลง เนื่องจากทั้งสเตนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ทำให้การทดสอบพบเม็ดทั้งสเตนคาร์ไบด์จำนวนมากขึ้น และทนต่อการสึกหรอมากขึ้นด้วย

4.2.4 การเปรียบเทียบอัตราน้ำหนักที่หายไปของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW ของชิ้นงาน 3 ชั้น



รูปที่ 4.34 แสดงกราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราน้ำหนักที่หายไปกับเวลาของกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW จำนวน 3 ชั้น

จากรูปที่ 4.34 พบว่า กระบวนการเชื่อม OAW ในแต่ละช่วงเวลาในการทดสอบมีการสูญเสียของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ดังที่กล่าวมาแล้วคือ บริเวณผิวบนของแนวเชื่อม 3 ชั้นเกิดจากอิทธิพลของความร้อน ทำให้เกิดบ่อหลอมละลายที่ชำรุด ผลทำให้การหลอมละลายของลวดเติม (Filler Metal) แนวไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็นโพรงอากาศ ทำให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานการสึกหรอลดลง ส่วนกระบวนการเชื่อม TIG ของแนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้น ในช่วงเวลา 10 นาที และ 20 นาที มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการเชื่อม TIG ของแนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้น มีค่าความต้านทานการสึกหรอได้ดีที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็งของชิ้นงาน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปผลการวิจัยได้เป็น 4 หัวข้อคือ

5.1.1 โครงสร้างมหภาค

5.1.2 โครงสร้างจุลภาค

5.1.3 สมบัติทางกล

5.1.4 การทดสอบการต้านทานการลัดหรือตามมาตรฐาน ASTM G65

5.1.1 โครงสร้างมหภาค

1) ความสูงของเนื้อเชื่อมและการหลอมลึก

จากการตรวจสอบโครงสร้างแบบมหภาคของแนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และกระบวนการเชื่อม OAW ระหว่าง 2 ชั้นและ 3 ชั้น พบว่า กระบวนการเชื่อม TIG มีผลต่อลักษณะแนวเชื่อม ทั้งขนาด ความสูงของเนื้อเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ตามจำนวนชั้นที่เชื่อม และมีการหลอมลึกของเนื้อเชื่อม แต่กระบวนการเชื่อม OAW ไม่ส่งผลต่อการหลอมลึกของเนื้อเชื่อมและวัสดุพื้น เนื่องจากการให้ความร้อนกับชิ้นงานเชื่อมที่ต่างกัน กระบวนการเชื่อม TIG จะใช้กระแสไฟฟ้าในการอาร์คชิ้นงาน บริเวณบ่อหลอมละลายมีความร้อนที่สูงและหลอมละลายได้รวดเร็ว ทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมลึก ส่วนกระบวนการเชื่อม OAW ไม่มีการใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ต้องใช้ระยะเวลาของความร้อนในการสร้างบ่อหลอมละลาย ทำให้ลวดเติม (Filler Metal) เกิดการหลอมละลายได้รวดเร็วกว่า และเกิดการหลอมลึกได้น้อย

2) การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ในแนวเชื่อม

การกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และการเชื่อม OAW พบว่า มีความแตกต่างกัน ซึ่งการเชื่อม TIG ของแนวเชื่อมจำนวน 1 ชั้น ทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการหลอมละลายรวมกันอยู่ที่บริเวณด้านล่างของแนวเชื่อม เนื่องจากเกิดความร้อนในการหลอมเหลวสูง ทำให้เม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์เคลื่อนตัวอย่างเป็นอิสระส่งผลให้เกิดการตกตะกอน ส่วนแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น และ 3 ชั้น มีการกระจายตัวของทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ดี เนื่องจากเป็นชั้นที่มีการเชื่อมกับวัสดุพื้นน้อยลง ทำให้เกิดการหลอมละลายที่ต่างกัน มีความแข็งที่เพิ่มขึ้น ทำให้ไม่เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ และมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ส่วนการเชื่อม OAW แนวเชื่อมทั้ง 3 ชั้นกับวัสดุพื้น ส่งผลทำให้การเคลื่อนตัวของเม็ดคาร์ไบด์น้อยไม่เกิดการตกตะกอน การกระจายอย่างอิสระทั่วทั้งบริเวณของชั้นแนวเชื่อม

3) ปริมาณเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์

ในการวัดปริมาณจะเลือกส่วนที่มีการกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอ พบว่า เม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ในการเชื่อม TIG ทั้งจำนวน 1, 2 และ 3 ชั้น มีจำนวนที่มากกว่าการเชื่อมแบบ OAW และขนาดโดยเฉลี่ยของขนาดเม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการเชื่อมทิก TIG มีขนาดเล็กกว่า OAW เนื่องจากที่มีความเข้มข้นของความร้อนที่สูงกว่า OAW ทำให้เม็ดทั้งสแตนคาร์ไบด์บางส่วนในลวดเชื่อมหลอมละลายผสมกับเนื้อเชื่อม ส่วนของกระบวนการเชื่อม OAW จะให้ขนาดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใหญ่กว่าการเชื่อม TIG เนื่องจากความเข้มข้นของบ่อหลอมละลายน้อย การละลายตัวของเม็ดคาร์ไบด์น้อย ทำให้เกิดเม็ดที่มีขนาดใหญ่กว่า

5.1.2 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Zone) ที่ผ่านการเชื่อม TIG และการเชื่อม OAW ทั้ง 2 และ 3 ชั้น เป็นโครงสร้างแบบเดนไดรต์ประกอบด้วย เฟอไรต์และเฟิร์ลไลต์ ให้เปอร์เซ็นต์ที่ต่างกัน ซึ่งการเชื่อม OAW ในแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น จะให้ปริมาณของเฟิร์ลไลต์ที่สูงที่สุด และเม็ดเกรนมีความละเอียด เนื่องจากการเชื่อม TIG ให้กระแสไฟที่คงที่ การกระจายของความร้อนสูงเฉพาะบริเวณแคบที่เกิดการหลอมละลาย และเกิดความร้อนที่สะสมในชิ้นงานน้อยกว่า ส่วนการเชื่อม OAW การสร้างบ่อหลอมละลาย จะต้องใช้ระยะเวลา ทำให้ความร้อนสะสมในชิ้นงานมาก เมื่อเย็นตัวในอากาศ ส่งผลทำให้เม็ดเกรนมีความละเอียดขึ้น

โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) เกิดเป็นโครงสร้างเฟอไรต์และเฟิร์ลไลต์ ที่มองเห็นความแตกต่างกันได้ชัดเจน ลักษณะเกรนของการเชื่อม TIG จะให้ขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าเกรนของการเชื่อม OAW ซึ่งขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่า มีความแข็งแรงที่มากกว่าขนาดเกรนที่มีขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากการได้รับอิทธิพลจากความร้อนที่ต่างกัน และระยะเวลาในการเย็นตัวที่รวดเร็ว ส่งผลทำให้เม็ดเกรนมีความละเอียดขึ้น และให้ค่าความแข็งที่สูงขึ้นด้วย

โครงสร้างจุลภาคบริเวณวัสดุพื้นที่ใช้ทดสอบการเชื่อม (Base Zone) เกิดเป็นโครงสร้าง เฟอไรต์และเฟิร์ลไลต์ ที่ความแตกต่าง ซึ่งโครงสร้างเฟอไรต์จะมีปริมาณที่สูง ในการเชื่อม TIG จะมีขนาดเกรนที่ละเอียดกว่าการเชื่อม OAW มองเห็นได้ชัด เนื่องจากระบวนการเชื่อม TIG จะใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม จะให้ความร้อนที่เข้มข้นเฉพาะจุดบริเวณเนื้อเชื่อม และเกิดการกระจายความร้อนที่รวดเร็ว ส่งผลทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย

ส่วนการเชื่อม OAW เป็นกระบวนการที่ใช้แก๊สอะเซทิลีนในการให้ความร้อน ทำให้เกิดการหลอมละลายได้ช้ากว่า ส่งผลทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนสะสมมาก เม็ดเกรนเกิดการขยายตัว ทำให้เม็ดเกรนมีขนาดใหญ่

5.1.3 สมบัติทางกล

จากการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness) ชิ้นงานจะให้ค่าความแข็งที่สูง ทำการกดชิ้นงานในแนวตั้ง วัดจากขอบรอยเชื่อม (Fusion Boundary) ไปจนถึงผิวด้านบนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (Top Surface) การเชื่อม TIG แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้นจะให้ค่าความแข็งเฉลี่ย 984.80 HV การเชื่อม OAW จะให้ค่าเฉลี่ย 1281.49 HV ส่วนการเชื่อม TIG แนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้น จะให้ความแข็งเฉลี่ย 832.80 HV การเชื่อม OAW จะให้ค่าเฉลี่ย 1108.85 HV ซึ่งบริเวณที่มีความแข็งสูงจะเป็นการกดสัมผัสกับเม็ดทังสเตนคาร์ไบด์ มีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแบบ Rockwell ที่ทำการกดชิ้นงานในแนวนอน ของการเชื่อม OAW แนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้นจะให้ความแข็งเฉลี่ย 61 HRC ซึ่งเป็นค่าความแข็งที่สูงที่สุด

5.1.4 การทดสอบการต้านทานการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

การทดสอบการต้านทานการสึกหรอของการเชื่อม TIG โดยใช้ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 และใช้ลวดเชื่อมแบบเติมประเภททังสเตนคาร์ไบด์ที่กระแสไฟ 110 แอมป์แปรโดยใช้ความเร็วเฉลี่ยที่ 6.9 เซนติเมตรต่อนาที พบว่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นมีการต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด รองลงมาคือการเชื่อมพอกผิวแข็ง 2 ชั้นและ 1 ชั้นตามลำดับ ส่วนการเชื่อม OAW โดยใช้ความเร็วเฉลี่ยที่ 3.1 เซนติเมตรต่อนาที พบว่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งจำนวน 2 ชั้นมีการต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด รองลงมาคือการเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้นและ 3 ชั้นตามลำดับ

การเปรียบเทียบชิ้นงานในการทดสอบ กระบวนการเชื่อม TIG เมื่อมีการเชื่อมพอกผิวเพิ่มขึ้นจำนวน 3 ชั้น เกิดการกระจายตัวของทังสเตนคาร์ไบด์ที่ดีเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าความต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด ส่วนของการเชื่อม OAW เกิดการกระจายตัวของทังสเตนคาร์ไบด์ที่ดีในทุกระดับชั้นของแนวเชื่อม ในแนวเชื่อมจำนวน 2 ชั้น จะให้ค่าความแข็งสูงสุด และค่าความต้านทานการสึกหรอสูงสุด แต่เมื่อทำการทดสอบแนวเชื่อม 3 ชั้น ค่าความแข็งเกิดการลดต่ำลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความต้านทานการสึกหรอที่มีการลดต่ำลงเช่นเดียวกัน ส่งผลมาจากการให้ความร้อนบริเวณผิวบนของแนวเชื่อม 3 ชั้น อิทธิพลของความร้อนทำให้เกิดบ่อหลอมละลายที่ช้า ส่งผลทำให้การความร้อนในการหลอมละลายของลวดเติม (Filler Metal) ไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็นโพรงอากาศในบางส่วน ทำให้ค่าความแข็งลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งของแนวเชื่อมจำนวน 3 ชั้น ก็ยังให้ความแข็งที่สูงขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานที่เหมาะสม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการเชื่อมงานด้วยคน จะต้องมีความชำนาญในด้วยงานเชื่อมสูง อาจทำให้เกิดการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานได้

5.2.2 ในการทดสอบการสึกหรอควรมีการทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานมีความเรียบบริเวณผิวทดสอบ เพราะจะทำให้ค่าในการทดสอบการสึกหรอมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น

5.2.3 ควรมีการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมในส่วนของ การควบคุมอุณหภูมิ และการยื่นตัวของงานเชื่อมเพื่อไม่ให้เกิดการบิดของชิ้นงานและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค



รายการอ้างอิง

- D. Kesavan, and M. Kamaraj.(2010). **The Microstructure and high temperature were performance of a nickel base hardfaced coating.** Surface and coatings Technology 204 (24): 4034-4043
- 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.
[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]
- [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]
- <https://sites.google.com/site/karcheuxmkas/home/hlak-kar-cheuxm-loha-dwy-kaes-xxk-si-xasethilin> [วันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ 2559]
- Kita shinagawa, Shinagawa ku, Tokyo. **Arc welding of specific steel and cast irons.** Published by Kobe steel, LTD. Japan (2015).
- L. Zong, Z.J. Liu. (2011). **Microstructure and Wear Protities of Fe-Based Alloy Hardfacing Layers.** Advanced Material Research 291-294 : 201-204
- N. Phuraya, and I. Phung-on, **A Study of the Properties of Weld Wetal on Hardfacing Weld Metal,** Proceedings of RSU Research Conference 2008, 3 April 2008, Bangkok, Thailand.
- R. C. Shivamurthy, M. Kamaraj, R.Nagarajan, S. M. Shariff and G. Padmanabham.
(2010). **Slurry Erosion Characteristics and Erosive Wear Machanisms of Co-Based and Ni-Based Coatings Fofmed by Laser Surface Alloying.** Metallurgical and Materials Transaction A (2) : 470-486
- R. Llewellyn, and C. Tuite, (1995). **Hardfacing Fights Wear in oil Sand Operation.** Welding Journal 74 (Mar) : 55-60

S. Yamamoto in. **Arc welding of specific steel and cast irons**. Edited by Thechnointer Publication/Shinko welding service Publishing. Japan (2008).

Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the DrySand/Rubber Wheel Apparatus. “Sliding abrasion test (ASTMG65)” Online http://www.creusabro.com/concept/laboratry_wear_tests/sliding.aspx

X.Wang, L. Cheng, M. Zhang, and Z.Zou. (2009). **Fabrication of Multiple Carbide Particles Reinforced Fe-based Surface hardfacing layer Produced by Gas Tungsten arc Welding Process**. Surface and coating and Technology 203 (8) : 976-980

กรมการส่งเสริมการเกษตร (2556-2559). **แผนยุทธศาสตร์กรมส่งเสริมการเกษตร**

นพกร ภู่อรัมย์, อิศรทัต พึ่งอ้น. **การศึกษาคุณสมบัติโลหะเชื่อมโดยการจำลองทางกายภาพ**. ศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุง สำนักงานวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สาขาวิศวกรรม การเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ไพบุณย์ หาญมนต์. **การศึกษาอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมที่มีผลต่อการหลอมลึกความกว้างความสูงและบริเวณกระทบร้อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโคกระบวนกรเชื่อมมิก**. สาขา วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เขต สาทร.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. **คู่มือแนวทางปฏิบัติที่เป็นเลิศในการตรวจสอบ อุปกรณ์รับแรงดัน**. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย โครงการเพิ่ม ประสิทธิภาพการผลิต โดยการศึกษาพัฒนาวิธีการปฏิบัติเพื่อการตรวจสอบอุปกรณ์รับ แรงดันสำหรับอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล.

ขงยุทธ ดุลยกุล และคณะ (2555). **ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของการเชื่อมพอกผิววัสดุเหล็ก AS3678 เกรด 350**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา.

วิวัฒน์ โดนิล. (2558) **โลหะวิทยา**. สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ : 313-321.

วิชิต เลื่อมใส, สุรชัย ขจรเดชะศักดิ์, อุคม สมไชยา. (2554) **การศึกษาและพัฒนารูปแบบการทำงานที่มีผล ต่อการโค้งงอของบานประตูเตาอบอ่อนจากการเชื่อมมิกซ์**. กลุ่มวิชาเทคโนโลยีการจัดการ อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2556). **สถิติการเกษตรของประเทศไทย** พิมพ์ที่ ชุมชนอุตสาหกรรม การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. นนทบุรี

- สุขอังคณา ติ และคณะ (2555). **การเปรียบเทียบความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางระหว่าง การอบชุบและการพอกผิวสำหรับงานด้านทันตกรรมการเสียดสี**. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สุพร ฤทธิภักดี . **พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็ก AISI 1020**. วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- สุรัชยา ถิ่นนา (2553). **การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกของ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340**. สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สมนึก วัฒนศรีกุล.(2549) **การทดสอบวัสดุ**. ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- เหล็กรูปพรรณ มาตรฐาน JIS SS400 http://www.sb-trademark.co.th/product-metal-steel_JIS.php
- วิจิต เลื่อมใส, สุรัชย์ ขจรเดชะศักดิ์, อุดม สมไชยา. (2554) **การศึกษาและพัฒนาวิธีการทำงานที่มีผล ต่อการโค้งงอของบานประตูเตาอบอ่อนจากการเชื่อมมิกซ์**. กลุ่มวิชาเทคโนโลยีการจัดการ อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- อริวิชญ์ อามิตร. (2557). **เปรียบเทียบอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันในการเชื่อมพอก ผิวแข็ง**. (ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- อภิชาติ พานิชกุล, อุษณีย์ กิตกำธร. **การวัดความแข็ง**. การอบชุบด้วยความร้อน หน่วยวิจัยการ ประยุกต์ใช้ความรู้ทางโลหะวิทยาสำหรับการขึ้นรูปโลหะ(IMIARU)สาขาวิชาวิศวกรรมโลหะ การสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html

รายการอ้างอิง

- D. Kesavan, and M. Kamaraj.(2010). **The Microstructure and high temperature were performance of a nickel base hardfaced coating.** Surface and coatings Technology 204 (24): 4034-4043
- 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.
[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]
- [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]
- <https://sites.google.com/site/karcheuxmkas/home/hlak-kar-cheuxm-loha-dwy-kaes-xxk-si-xasethilin> [วันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ 2559]
- Kita shinagawa, Shinagawa ku, Tokyo. **Arc welding of specific steel and cast irons.** Published by Kobe steel, LTD. Japan (2015).
- L. Zong, Z.J. Liu. (2011). **Microstructure and Wear Proties of Fe-Based Alloy Hardfacing Layers.** Advanced Material Research 291-294 : 201-204
- N. Phuraya, and I. Phung-on, **A Study of the Properties of Weld Wetal on Hardfacing Weld Metal,** Proceedings of RSU Research Conference 2008, 3 April 2008, Bangkok, Thailand.
- R. C. Shivamurthy, M. Kamaraj, R.Nagarajan, S. M. Shariff and G. Padmanabham. (2010). **Slurry Erosion Characteristics and Erosive Wear Machanisms of Co-Based and Ni-Based Coatings Fofmed by Laser Surface Alloying.** Metallurgical and Materials Transaction A (2) : 470-486
- R. Llewellyn, and C. Tuite, (1995). **Hardfacing Fights Wear in oil Sand Operation.** Welding Journal 74 (Mar) : 55-60

S. Yamamoto in. **Arc welding of specific steel and cast irons**. Edited by Thechnointer Publication/Shinko welding service Publishing. Japan (2008).

Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the DrySand/Rubber Wheel Apparatus. “Sliding abrasion test (ASTMG65)” Online http://www.creusabro.com/concept/laboratry_wear_tests/sliding.aspx

X.Wang, L. Cheng, M. Zhang, and Z.Zou. (2009). **Fabrication of Multiple Carbide Particles Reinforced Fe-based Surface hardfacing layer Produced by Gas Tungsten arc Welding Process**. Surface and coating and Technology 203 (8) : 976-980

กรมการส่งเสริมการเกษตร (2556-2559). **แผนยุทธศาสตร์กรมส่งเสริมการเกษตร**

นพกร ภู่อรัมย์, อิศรทัต พึ่งอ้น. **การศึกษาคุณสมบัติโลหะเชื่อมโดยการจำลองทางกายภาพ**. ศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุง สำนักงานวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สาขาวิศวกรรม การเชื่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ไพบุณย์ หาญมนต์. **การศึกษาอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมที่มีผลต่อการหลอมลึกความกว้างความสูงและบริเวณกระทบร้อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโคกระบวนกรเชื่อมมิก**. สาขา วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เขต สาทร.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. **คู่มือแนวทางปฏิบัติที่เป็นเลิศในการตรวจสอบ อุปกรณ์รับแรงดัน**. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย โครงการเพิ่ม ประสิทธิภาพการผลิต โดยการศึกษาพัฒนาวิธีการปฏิบัติเพื่อการตรวจสอบอุปกรณ์รับ แรงดันสำหรับอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล.

ขงยุทธ ดุลยกุล และคณะ (2555). **ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของการเชื่อมพอกผิววัสดุเหล็ก AS3678 เกรด 350**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา.

วิวัฒน์ โดนิล. (2558) **โลหะวิทยา**. สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ : 313-321.


วิชิต เลื่อมใส, สุรชัย ขจรเดชะศักดิ์, อุคม สมไชยา. (2554) **การศึกษาและพัฒนารูปแบบการทำงานที่มีผล ต่อการโค้งงอของบานประตูเตาอบอ่อนจากการเชื่อมมิกซ์**. กลุ่มวิชาเทคโนโลยีการจัดการ อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2556). **สถิติการเกษตรของประเทศไทย** พิมพ์ที่ ชุมชนอุตสาหกรรม การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. นนทบุรี

- สุขอังคณา ติ และคณะ (2555). **การเปรียบเทียบความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางระหว่าง การอบชุบและการพอกผิวสำหรับงานด้านทันตกรรมการเสียดสี**. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สุพร ฤทธิภักดี . **พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็ก AISI 1020**. วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- สุรัชยา ถิ่นนา (2553). **การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกของ เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340**. สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สมนึก วัฒนศรีกุล.(2549) **การทดสอบวัสดุ**. ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- เหล็กรูปพรรณ มาตรฐาน JIS SS400 http://www.sb-trademark.co.th/product-metal-steel_JIS.php
- วิจิต เลื่อมใส, สุรัชย์ ขจรเดชะศักดิ์, อุดม สมไชยา. (2554) **การศึกษาและพัฒนาวิธีการทำงานที่มีผล ต่อการโค้งงอของบานประตูเตาอบอ่อนจากการเชื่อมมิกซ์**. กลุ่มวิชาเทคโนโลยีการจัดการ อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- อริวิชญ์ อามิตร. (2557). **เปรียบเทียบอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันในการเชื่อมพอก ผิวแข็ง**. (ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- อภิชาติ พานิชกุล, อุษณีย์ กิตกำธร. **การวัดความแข็ง**. การอบชุบด้วยความร้อน หน่วยวิจัยการ ประยุกต์ใช้ความรู้ทางโลหะวิทยาสำหรับการขึ้นรูปโลหะ(IMIARU)สาขาวิชาวิศวกรรมโลหะ การสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html

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							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
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)	0.152	0.0343	0.788	0.0280	0.0093	0.0322	0.0024	0.0152
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
	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
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)	0.0493	0.0050	0.0194	< 0.00020	0.0035	0.0012	0.0042	0.00092
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
	Sn	Zr	Bi	Ca	Ce	Sb	Se	Te
	%	%	%	%	%	%	%	%
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)	0.0024	0.00040	0.0019	0.00077	0.0010	0.0048	0.0176	< 0.0010
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
	Ta	B	Ag	N	Fe			
	%	%	%	%	%			
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)	0.0058	< 0.00010	0.00007	0.0153	98.7			
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	กระบวน การเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		อุณหภูมิ			ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ก่อน เชื่อม	ขณะ เชื่อม	หลัง เชื่อม		
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	
		7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	241	727	661	2.44	
	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	7	GAS	SS400	40x100x4	FTC	3.5	243	639	648	2.19	
		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	กระบวน การเชื่อม	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	ชิ้นงาน		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	ชิ้นงาน		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	



ตารางที่ ก.8 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 1, 2, 3 ชั้นที่ 1

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ขั้วเชื่อม	แอมป์แปร	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
1	1	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	37	211	399	14-16	1.18
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	241	342	424	14-16	1.14
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	240	546	568	14-16	1.16
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	238	482	504	14-16	1.21
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	236	529	498	14-16	1.11
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	242	566	542	14-16	1.20
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	233	591	532	14-16	1.15
2	1	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	42	230	297	14-16	1.27
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	233	433	422	14-16	1.11
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	240	520	570	14-16	1.18
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	249	442	407	14-16	1.21
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	236	467	503	14-16	1.14
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	241	569	525	14-16	1.17
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	243	592	498	14-16	1.15
3	1	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	39	207	398	14-16	1.20
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	220	450	393	14-16	1.26
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	208	581	472	14-16	1.39
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	234	519	434	14-16	1.35

ตารางที่ ก.8 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 1, 2, 3 ชั้นที่ 1 (ต่อ)

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ขั้วเชื่อม	แอมป์แปร์	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
3	1	5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	249	515	442	14-16	1.48
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	232	513	414	14-16	1.41
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	229	649	460	14-16	1.42



ตารางที่ ก.9 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 4 ชั้นที่ 1, 2

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ขั้วเชื่อม	แอมป์แปร์	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม			
4	1	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	43	207	398	14-16	1.20	4/23/2559
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	243	332	422	14-16	1.15	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	238	518	599	14-16	1.14	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	239	392	507	14-16	1.11	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	226	419	509	14-16	1.14	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	242	564	524	14-16	1.20	
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	213	594	520	14-16	1.16	
		8	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	241	606	585	14-16	1.18	
	2	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	245	515	540	14-16	1.21	
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	233	507	564	14-16	1.10	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	241	490	415	14-16	1.10	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	248	523	408	14-16	1.09	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	226	569	532	14-16	1.10	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	233	446	559	14-16	1.24	
7		TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	249	568	573	14-16	1.14		

ตารางที่ ก.10 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชิ้นที่ 5 ชั้นที่ 1, 2

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	หัวเชื่อม	แอมป์แปร	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม			
5	1	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	48	342	363	14-16	1.25	4/23/2559
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	239	580	512	14-16	1.26	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	223	602	503	14-16	1.16	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	210	589	442	14-16	1.29	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	239	657	498	14-16	1.32	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	213	517	511	14-16	1.32	
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	174	552	507	14-16	1.24	
		8	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	235	450	580	14-16	1.13	
	2	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	196	558	490	14-16	1.19	
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	248	533	485	14-16	1.14	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	218	548	448	14-16	1.16	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	210	564	452	14-16	1.28	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	234	538	516	14-16	1.34	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	242	448	552	14-16	1.13	
7		TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	228	558	567	14-16	1.11		

ตารางที่ ก.11 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 6 ชั้นที่ 1, 2

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ขั้วเชื่อม	แอมป์แปร	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม			
6	1	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	36	230	398	14-16	1.24	4/23/2559
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	194	408	405	14-16	1.25	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	213	502	500	14-16	1.23	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	217	491	398	14-16	1.27	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	220	450	393	14-16	1.26	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	208	581	472	14-16	1.39	
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	212	600	425	14-16	1.29	
		8	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	240	617	445	14-16	1.26	
	2	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	193	509	424	14-16	1.09	
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	225	571	494	14-16	1.18	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	180	554	505	14-16	1.32	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	225	596	511	14-16	1.27	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	239	559	539	14-16	1.34	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	220	558	516	14-16	1.44	
7		TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	227	598	556	14-16	1.38		

ตารางที่ ก.12 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 7 ชั้นที่ 1, 2, 3

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ขั้วเชื่อม	แอมป์แปร	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม			
7	1	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	42	363	289	14-16	1.38	4/23/2559
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	205	499	485	14-16	1.35	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	225	589	428	14-16	1.33	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	212	533	469	14-16	1.35	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	234	519	434	14-16	1.35	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	249	515	442	14-16	1.48	
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	224	569	540	14-16	1.36	
		8	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	238	575	528	14-16	1.39	
	2	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	223	397	462	14-16	1.17	
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	250	496	483	14-16	1.16	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	248	591	516	14-16	1.28	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	226	551	506	14-16	1.28	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	234	601	534	14-16	1.33	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	239	629	492	14-16	1.43	
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	229	527	466	14-16	1.48	
	8*	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	172	416	378	14-16	1.17		
3	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	247	445	409	14-16	1.07		
	2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	217	454	435	14-16	1.16		

ตารางที่ ก.12 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 7 ชั้นที่ 1, 2, 3 (ต่อ)

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ขั้วเชื่อม	แอมป์แปร	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม			
7	3	3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	242	426	411	14-16	1.17	4/23/2559
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	226	501	408	14-16	1.40	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	241	594	518	14-16	2.03	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	245	554	449	14-16	1.44	



ตารางที่ ก.13 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 8 ชั้นที่ 1, 2, 3

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชั้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ขั้วเชื่อม	แอมป์แปร์	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม			
8	1	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	29	442	425	14-16	1.57	5/2/2559
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	237	669	489	14-16	1.32	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	232	513	414	14-16	1.41	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	229	649	460	14-16	1.42	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	220	496	405	14-16	1.46	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	146	610	536	14-16	1.41	
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	174	490	466	14-16	1.42	
		8	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	231	575	559	14-16	1.40	
		9*	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	245	651	577	14-16	1.37	



ตารางที่ ก.13 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 8 ชั้นที่ 1, 2, 3 (ต่อ)

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชั้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ขั้วเชื่อม	แอมป์แปร	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม		
8	2	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	220	541	540	14-16	1.29
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	244	620	547	14-16	1.27
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	234	521	470	14-16	1.27
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	245	548	522	14-16	1.41
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	249	607	515	14-16	1.36
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	248	568	515	14-16	1.43
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	245	580	539	14-16	1.31
		8*	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	220	540	530	14-16	1.44
	3	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	248	418	397	14-16	1.14
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	243	481	407	14-16	1.20
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	211	501	444	14-16	1.24
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	201	494	431	14-16	1.29
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	223	512	471	14-16	1.30
6		TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	219	535	456	14-16	1.46	

ตารางที่ ก.14 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 9 ชั้นที่ 1, 2, 3

ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชิ้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ขั้วเชื่อม	แอมป์แปร์	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม			
9	1	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	36	424	390	14-16	1.41	5/2/2559
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	190	675	402	14-16	1.38	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	196	477	445	14-16	1.36	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	185	547	441	14-16	1.33	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	223	572	488	14-16	1.43	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	197	494	440	14-16	1.49	
		7	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	232	517	513	14-16	1.39	
		8	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	224	602	550	14-16	1.43	
	9*									234	562	515	14-16	1.21	
	2	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	217	427	402	14-16	1.20	
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	244	526	513	14-16	1.29	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	201	516	502	14-16	1.25	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	205	478	453	14-16	1.35	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	201	521	456	14-16	1.44	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	201	556	491	14-16	1.37	
7		TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	226	546	477	14-16	1.55		
8*									207	530	477	14-16	1.42		

ตารางที่ ก.14 แสดงการบันทึกผลการทดลองในการเชื่อม TIG ของชั้นที่ 9 ชั้นที่ 1, 2, 3 (ต่อ)

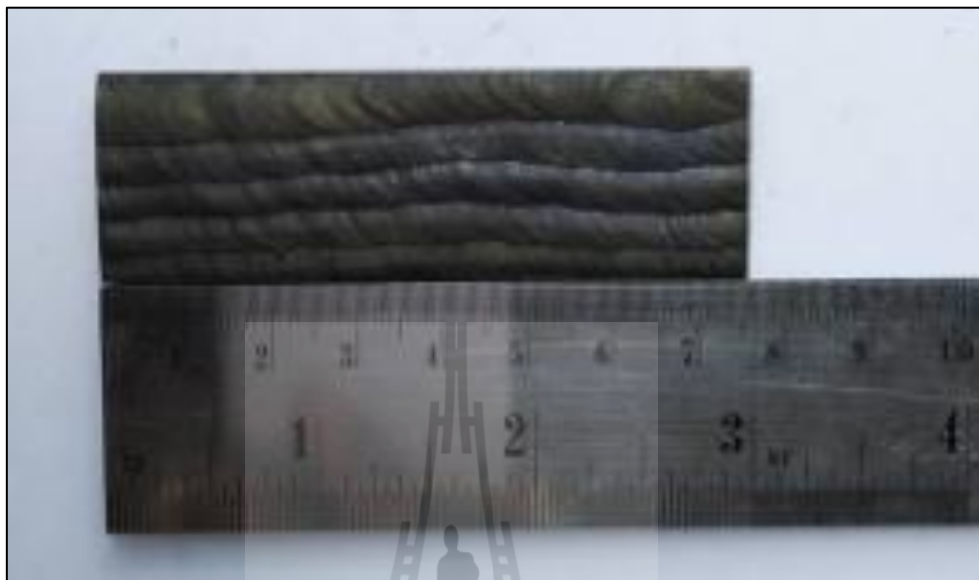
ชั้น	จำนวนชั้นที่	แนวที่	กระบวนการเชื่อม	ชั้นงาน		โลหะ		กระแสไฟเชื่อม		อุณหภูมิ			โวลท์	ความเร็ว	หมายเหตุ
				เกรด	ขนาด	ชนิด	ขนาด	ขั้วเชื่อม	แอมป์แปร	ก่อนเชื่อม	ขณะเชื่อม	หลังเชื่อม			
9	3	1	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	218	394	381	14-16	1.05	5/2/2559
		2	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	212	531	407	14-16	1.16	
		3	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	209	576	433	14-16	1.20	
		4	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	201	546	436	14-16	1.27	
		5	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	225	522	402	14-16	1.33	
		6	TIG	SS400	40x100x4	FTC	3.5	DCEN	110	250	526	430	14-16	1.34	
	7									216	568	449	14-16	1.40	
	8									235	533	468	14-16	1.57	



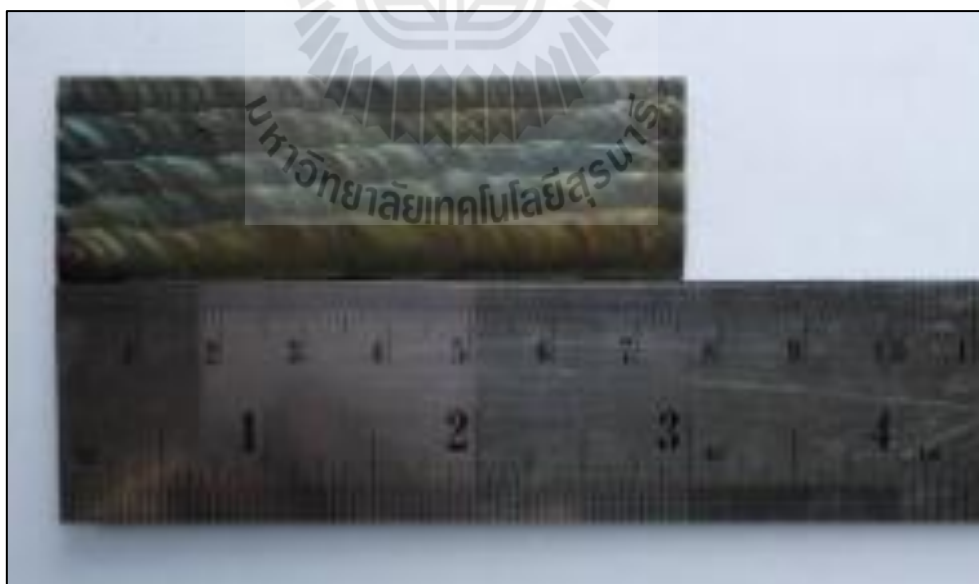
ภาคผนวก ข
ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG และ OAW



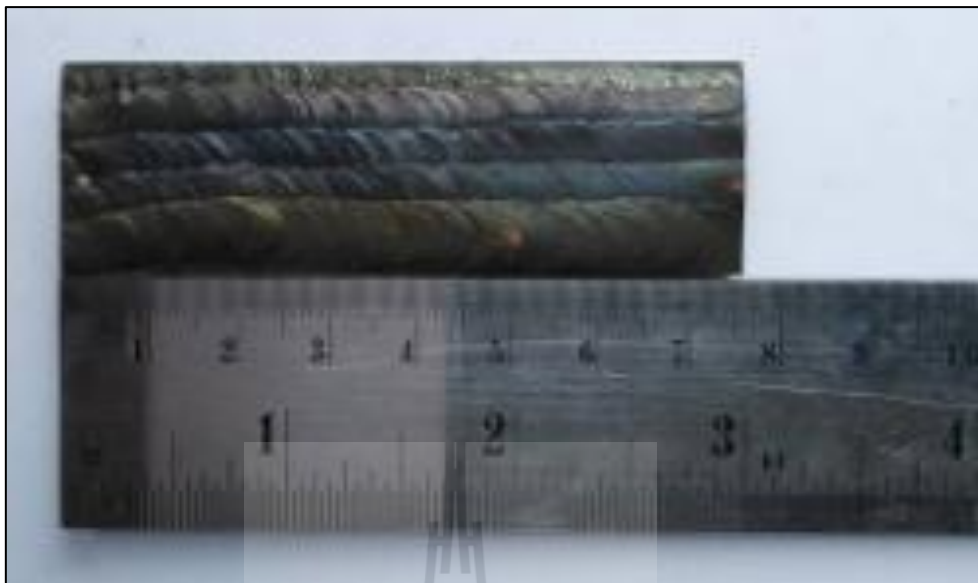
ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Arc Welding : TIG)



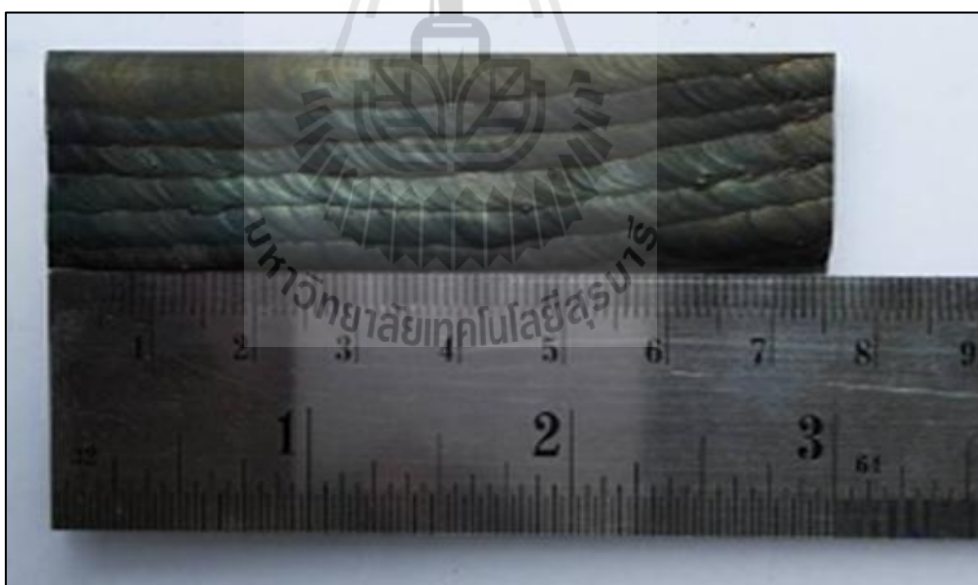
รูปที่ ข.1 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 1



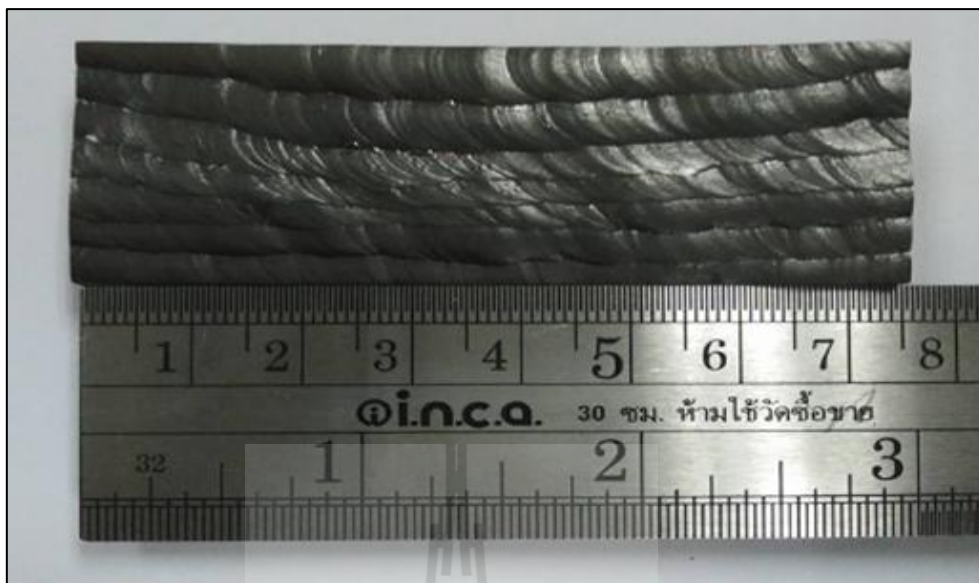
รูปที่ ข.2 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2



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



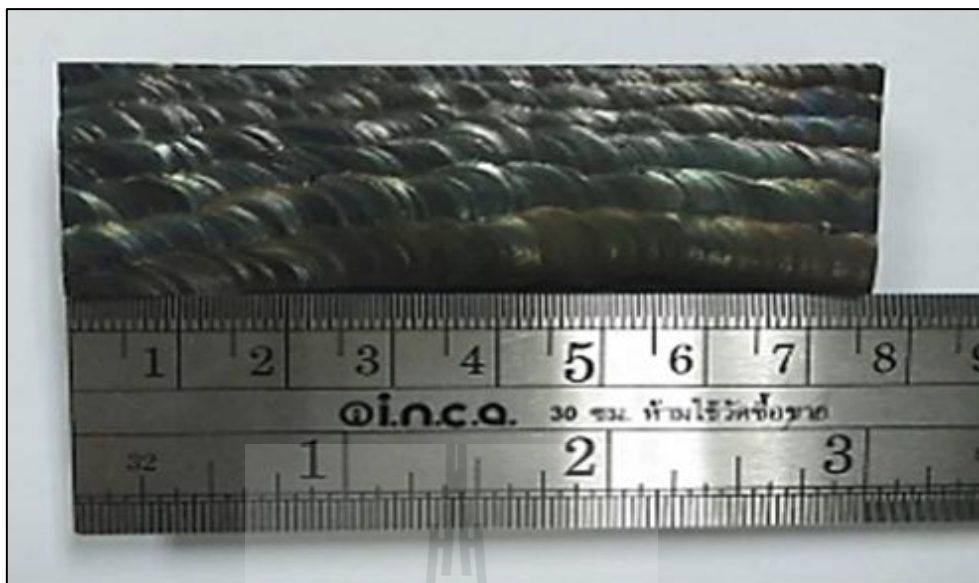
รูปที่ ข.6 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3



รูปที่ ข.7 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 1

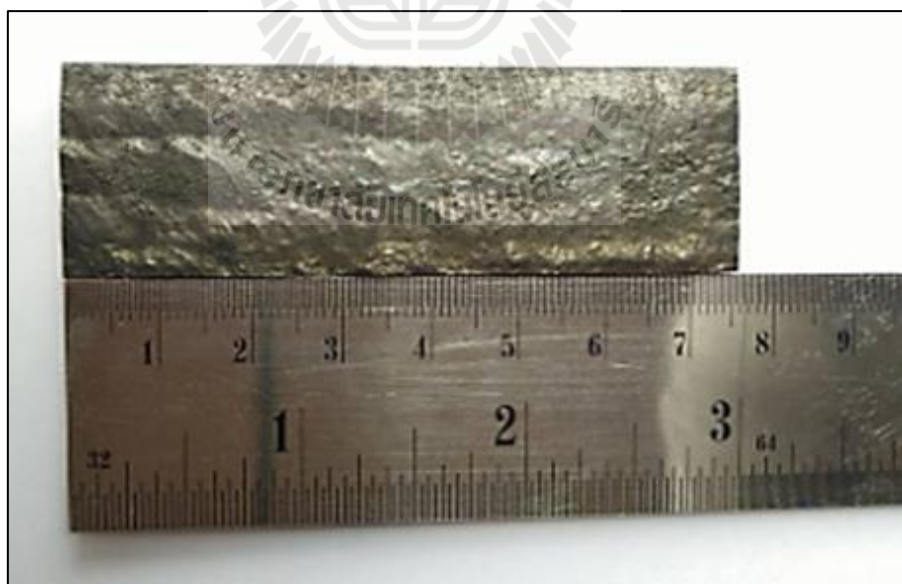


รูปที่ ข.8 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 2

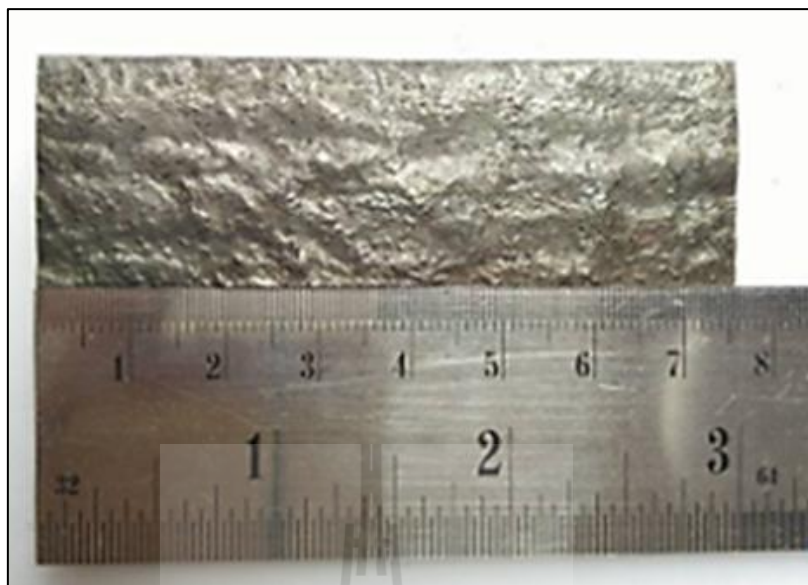


รูปที่ ข.9 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 3

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมทิก (Oxy Acetylene gas Welding : OAW)



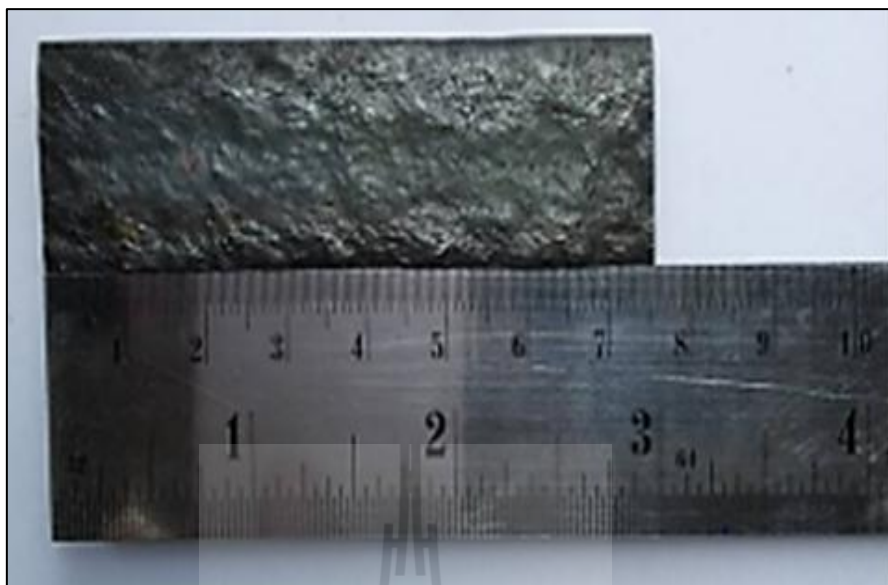
รูปที่ ข.10 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 1



รูปที่ ข.11 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2



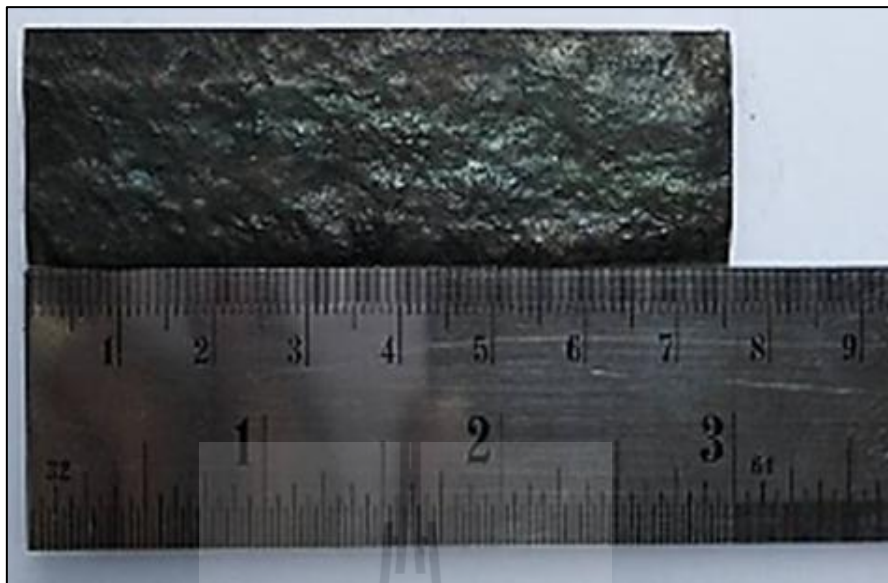
รูปที่ ข.12 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 1 ชั้นที่ 3



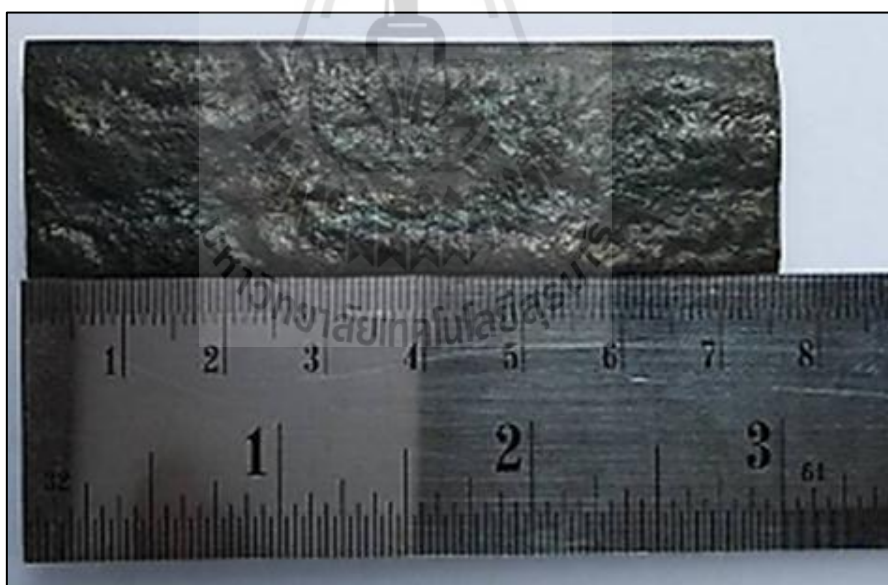
รูปที่ ข.13 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 1



รูปที่ ข.14 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 2



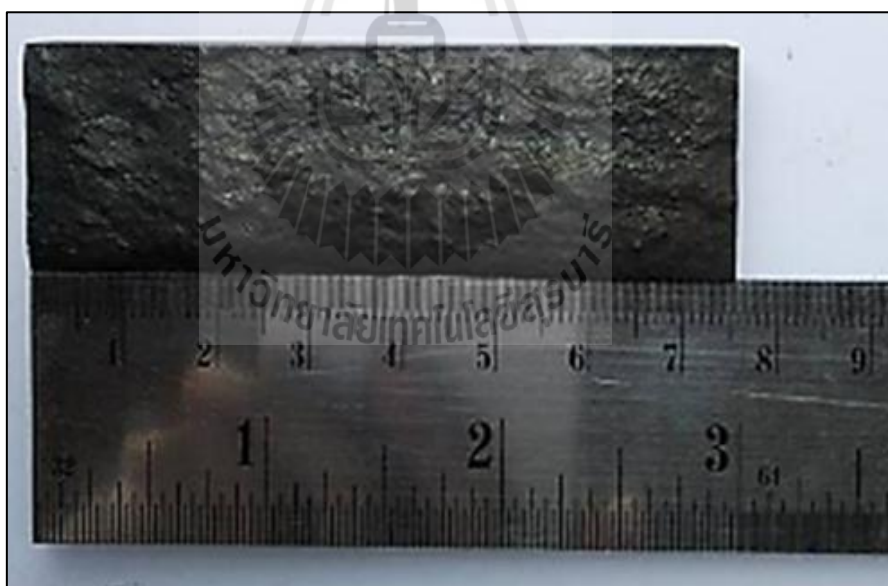
รูปที่ ข.15 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3



รูปที่ ข.16 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 1



รูปที่ ข.17 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 2



รูปที่ ข.18 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการตัด Wire Cut ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 3

ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบด้วยน้ำยาสารแทรกซึม (PT)



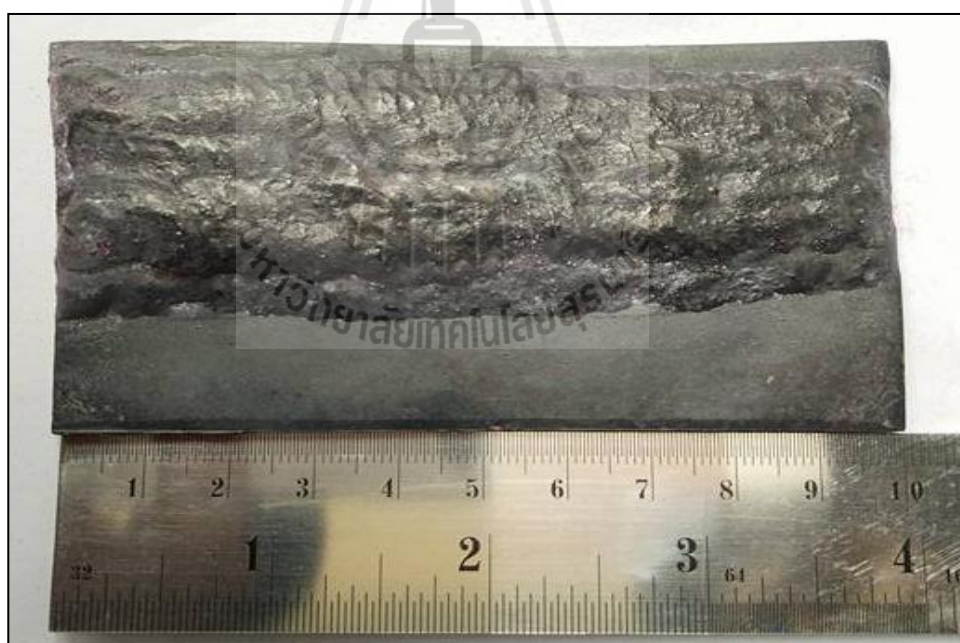
รูปที่ ข.19 แสดงชิ้นงานทดสอบ PT ของการเชื่อม TIG



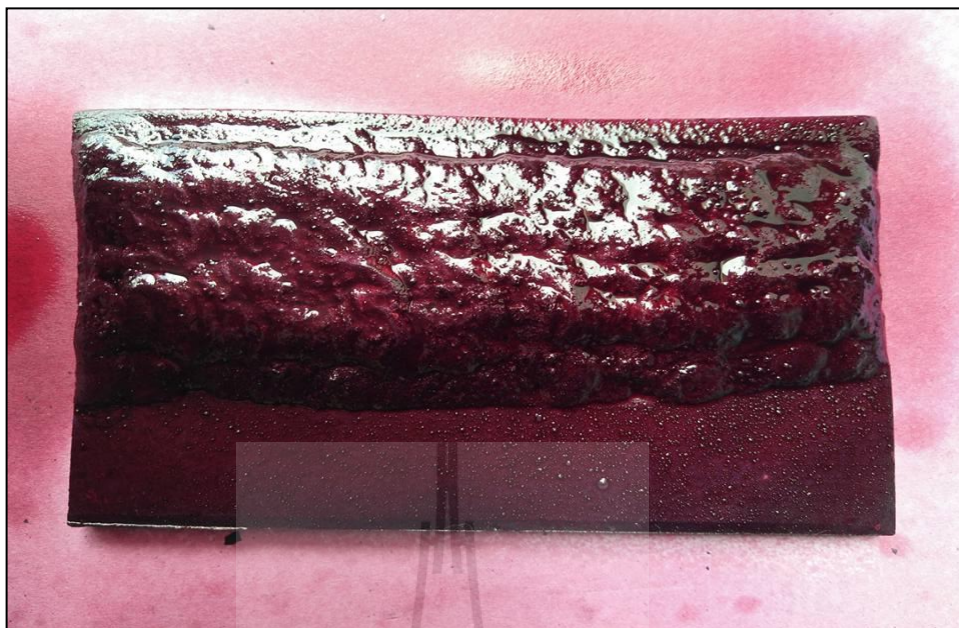
รูปที่ ข.20 แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Penetrant ของการเชื่อม TIG



รูปที่ ข.21 แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Developer ของการเชื่อม TIG



รูปที่ ข.22 แสดงชิ้นงานทดสอบ PT ของการเชื่อม OAW



รูปที่ ข.23 แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Penetrant ของการเชื่อม OAW



รูปที่ ข.24 แสดงชิ้นงานทดสอบสาร Developer ของการเชื่อม OAW



ภาคผนวก ค.

ใบผลการทดสอบของกล้องจุลทรรศน์

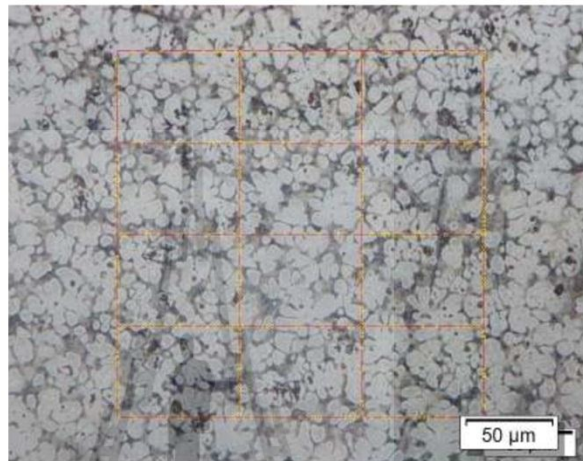
Weld zone GTAW 2 ชั้น
 Grain Size according to Intercept Method ASTM E112
 (Summary)

Analysis summary:

Reference	Weld zone		
Group			
Sample Comment	This sample is produced by dilatometers.		
Date	9/6/2559 12:01:20		
Standard	ASTM E112		
ASTM Grain Size Number G	11.31		+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		6.34	
Elongation		1.21	
Average Number of Intercepts		301.00	
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		157.68	

Reference	Weld zone		
Group			
ASTM Grain Size Number G	11.31 +/- 0.00		
Mean Intercept Length [μm]		6.34	
Elongation		1.21	
Average Number of Intercepts		301.00	
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0.16	
Sample Comment	This sample is produced by dilatometers. We want		

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



Sample Information:

Reference : Sample 01
Group :

Image Results:

Image Name	เนื้อเชื่อม2.tif	301
Number of Intercepts		1908.95
Pattern Length		
Image Comment	point 1	



Stream Report

Cast Iron analysis (Summary)

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2

Sample Results:

aa	Sample 01
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 12:02:45
Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	67.6% / 32.4%
Total Particles per mm^2	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

HAZ zone GTAW 2 ชั้น



Stream Report

Grain Size according to Intercept Method ASTM E112 (Summary)

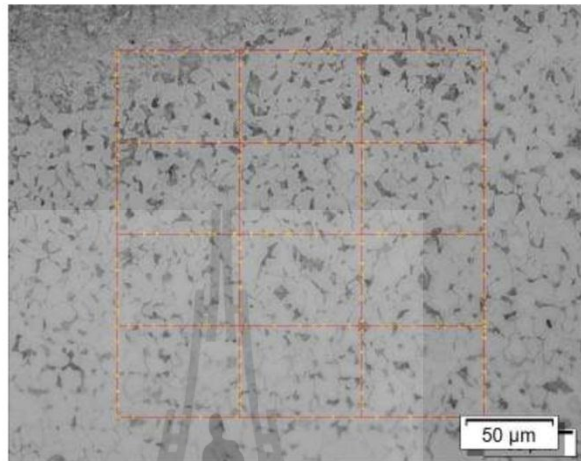
Analysis summary:

Reference Group	Sample 01	
Sample Comment	This sample is produced by dilato	
Date	9/6/2559 11:55:00	
Standard	ASTM E112	
ASTM Grain Size Number G	10.16	+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		9.45
Elongation		1.11
Average Number of Intercepts		202.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		105.82

Sample Results:

Reference Group	Sample 01	
ASTM Grain Size Number G	10.16 +/- 0.00	
Mean Intercept Length [μm]		9.45
Elongation		1.11
Average Number of Intercepts		202.00
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)

**Sample Information:**

Reference : Sample 01
Group :

Image Results:

Image Name	HAZ.tif	
Number of Intercepts		202
Pattern Length		1908.95
Image Comment	point 1	

Cast Iron analysis
(Summary)



Stream Report

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 μm^2

Sample Results:

aa	Sample 01
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 11:57:55
Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	68.3% / 31.7%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000



Base zone GTAW 2 ชั้น
 Grain Size according to Intercept Method ASTM E112
 (Summary)



Stream Report

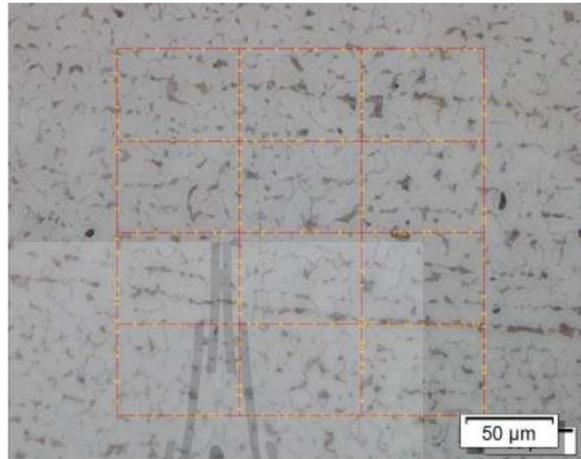
Analysis summary:

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment	This sample is produced by dilato	
Date	9/6/2559 11:47:24	
Standard	ASTM E112	
ASTM Grain Size Number G	10.28	+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		9.09
Elongation		0.96
Average Number of Intercepts		210.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		110.01

Sample Results:

Reference	Sample 01	
Group		
ASTM Grain Size Number G	10.28 +/- 0.00	
Mean Intercept Length [μm]		9.09
Elongation		0.96
Average Number of Intercepts		210.00
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)

**Sample Information:**

Reference : Sample 01
Group :

Image Results:

Image Name	BASE.tif	210
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 μm^2

Sample Results:

aa	Sample 01
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 11:49:28
Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	83.8% / 16.2%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000

Weld zone GTAW 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 12:29:57	
Standard	ASTM E112	
ASTM Grain Size Number G	11.44	+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		6.08
Elongation		1.20
Average Number of Intercepts		314.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		164.49

Sample Results:

Reference	Sample 01	
Group		
ASTM Grain Size Number G	11.44 +/- 0.00	
Mean Intercept Length [μm]		6.08
Elongation		1.20
Average Number of Intercepts		314.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0.16
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	เน็ลเช็อน 2.tif	
Number of Intercepts		314
Pattern Length		1908.95
Image Comment	point 1	



Cast Iron analysis
(Summary)



Stream Report

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2

Sample Results:

aa	Sample 01
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 12:31:12
Standard	ASTM A 247

Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	69.1% / 30.9%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000



HAZ zone GTAW 3 ชั้น
 Grain Size according to Intercept Method ASTM E112
 (Summary)



Stream Report

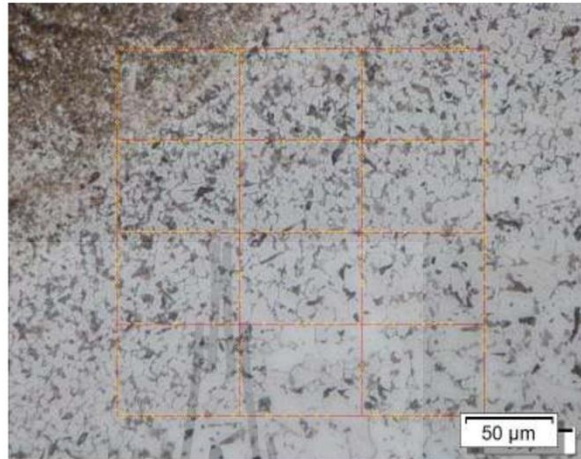
Analysis summary:

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment	This sample is produced by dilato	
Date	9/6/2559 12:27:42	
Standard	ASTM E112	
ASTM Grain Size Number G	11.29	+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		6.38
Elongation		1.00
Average Number of Intercepts		299.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		156.63

Sample Results:

Reference	Sample 01	
Group		
ASTM Grain Size Number G	11.29 +/- 0.00	
Mean Intercept Length [μm]		6.38
Elongation		1.00
Average Number of Intercepts		299.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0.16
Sample Comment	This sample is produced by dilatometers. We want	

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

**Sample Information:**

Reference : Sample 01
Group :

Image Results:

Image Name	haz.tif	299
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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2

Sample Results:

aa	Sample 01
Group	
Sample Comment	
Date	9/6/2559 12:28:31
Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	89509.85 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	58.1% / 41.9%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000

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



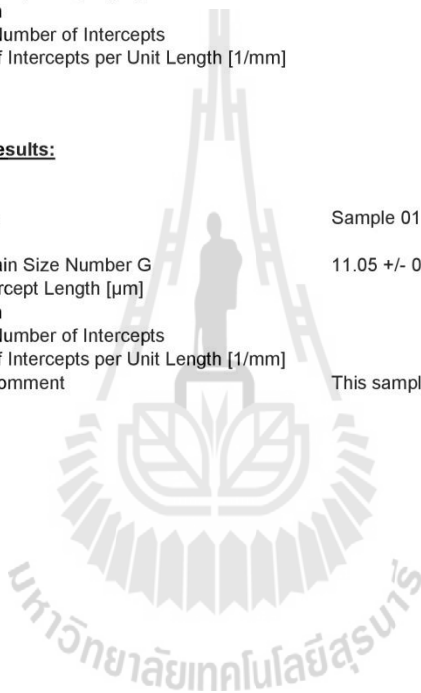
Stream Report

Analysis summary:

Reference Group	Sample 01	
Sample Comment	This sample is produced by dilato	
Date	9/6/2559 12:24:07	
Standard	ASTM E112	
ASTM Grain Size Number G	11.05	+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		6.94
Elongation		1.07
Average Number of Intercepts		275.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		144.06

Sample Results:

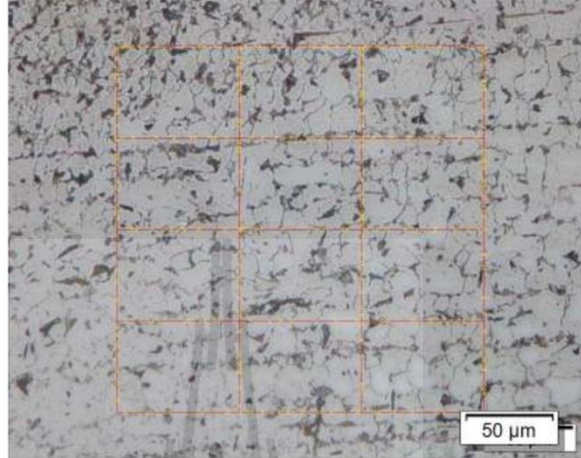
Reference Group	Sample 01	
ASTM Grain Size Number G	11.05 +/- 0.00	
Mean Intercept Length [μm]		6.94
Elongation		1.07
Average Number of Intercepts		275.00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0.14
Sample Comment	This sample is produced by dilatometers. We war	



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

OLYMPUS
Your Vision. Our Future

Stream Report



Sample Information:

Reference : Sample 01
Group :

Image Results:

Image Name	base.tif	275
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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	72.0% / 28.0%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000

Weld 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 11:06:47	
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	Sample 01	
Group		
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)

**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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	44.6% / 55.4%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000

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



Stream Report

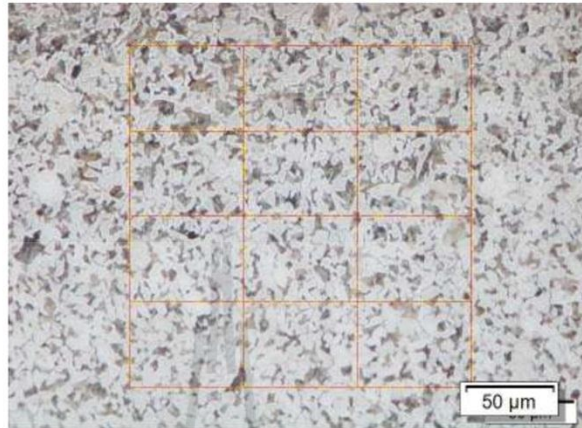
Analysis summary:

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)

**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 μm^2
Etched Sample Area	82255.45 μm^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 μm^2
Etched Sample Area	82255.45 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	68.7% / 31.3%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Base zone OAW 2 ^{ชิ้น}
 Grain Size according to Intercept Method ASTM E112
 (Summary)



Stream Report

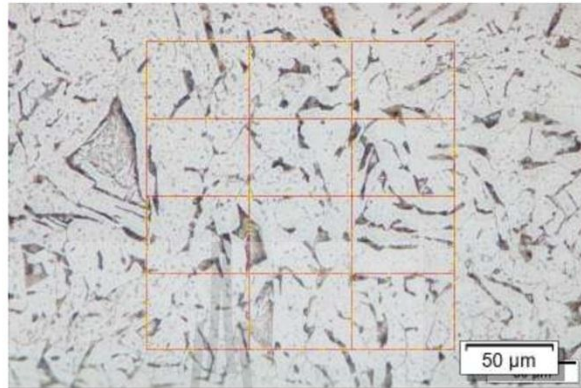
Analysis summary:

Reference	Sample 01		
Group			
Sample Comment	This sample is produced by dilato		
Date	9/6/2559 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	Sample 01		
Group			
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)

**Sample Information:**

Reference : Sample 01
Group :

Image Results:

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



Cast Iron analysis
(Summary)



Stream Report

Standard	ASTM A 247
Total Number of Images	1
Total Sample Area	74703.65 μm^2
Etched Sample Area	74703.65 μm^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 μm^2
Etched Sample Area	74703.65 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	72.8% / 27.2%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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



Stream Report

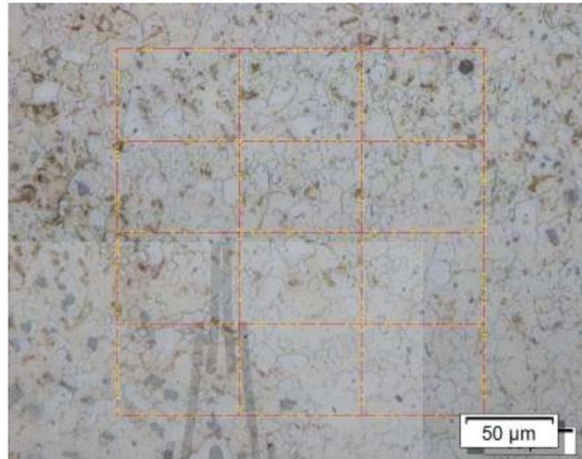
Analysis summary:

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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	70.6% / 29.4%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000

HAZ zone OAW 3 ชั้น

Grain Size according to Intercept Method ASTM E112
(Summary)



Stream Report

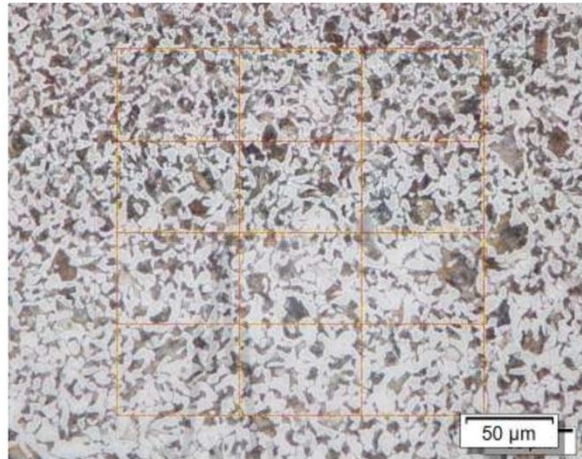
Analysis summary:

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 [μm]		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 [μm]		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	

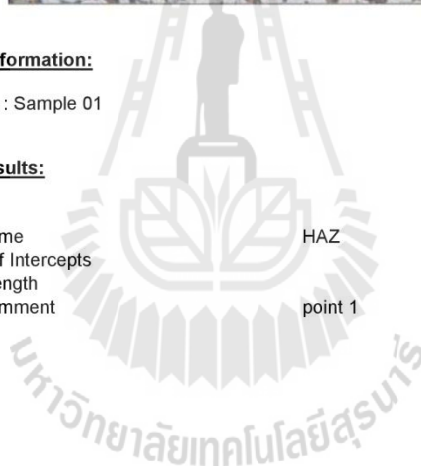
Grain Size according to Intercept Method ASTM E112
(Image Results)

**Sample Information:**

Reference : Sample 01
Group :

Image Results:

Image Name	HAZ	352
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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	58.7% / 41.3%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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



Stream Report

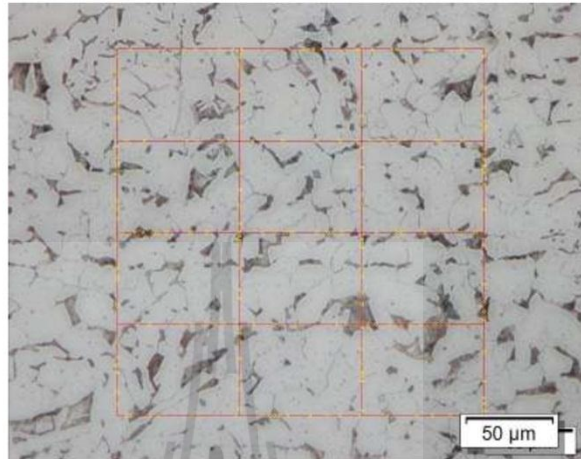
Analysis summary:

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 [μm]		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 [μm]		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)

**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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^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 μm^2
Etched Sample Area	89509.85 μm^2
Ferrite / Pearlite Ratio	78.2% / 21.8%
Total Particles per mm^2	0.000
Total nodular particles per mm^2	0.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายคำพูน พรหมสุภะ เกิดเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดศรีสะเกษ จบการศึกษา ระดับประถมศึกษาและระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนบ้านขนุน (วันธรรมศาสตร์ศรีสะเกษ 2515) จากนั้น เริ่มศึกษาต่อในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) ในสาขาวิชาช่างเชื่อมและโลหะแผ่น วิทยาลัยการอาชีพศรีสะเกษและสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2546 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับ ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2551 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อใน ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2554 และเมื่อ สำเร็จการศึกษาได้มีโอกาสเข้าทำงานที่ บริษัท ฮอรัส เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่จังหวัดชลบุรี เป็นเวลา 2 ปี ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2557 ขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็น ผู้ช่วยสอนและวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งทำให้ผู้วิจัย ได้นำประสบการณ์ และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็น อย่างดี และมีบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา