

อิทธิพลของการเชื่อมอาร์กโลหะหุ้มฟลักซ์พอกแข็งซ้ำแนว
ต่อสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11

EFFECT OF MULTI-PASSES HARD-FACED METAL
PRODUCED BY SHIELDED METAL ARC WELDING
ON JIS-SKD11 TOOL STEEL PROPERTIES

คณิต ติทธิพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

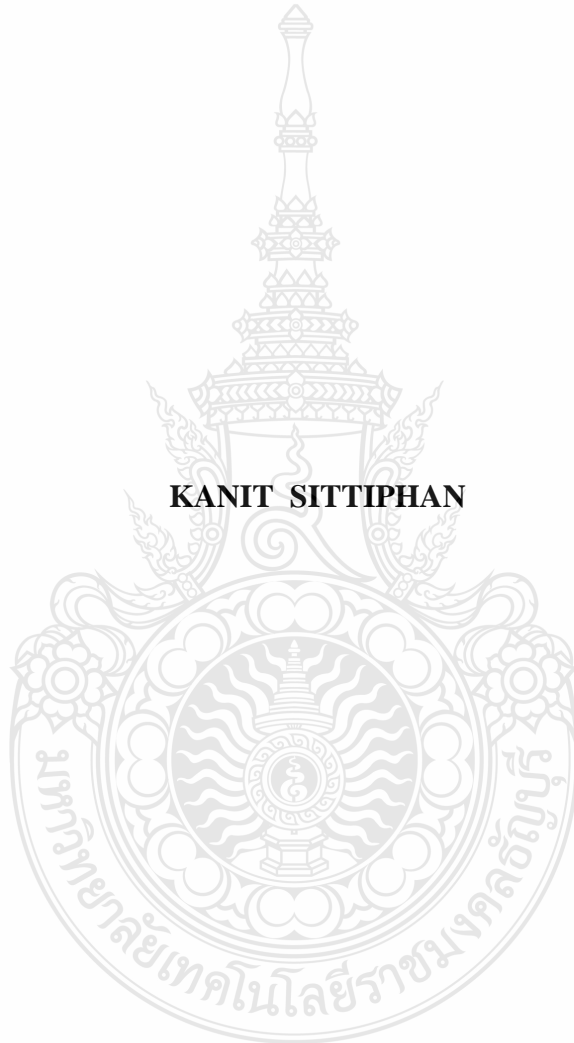
อิทธิพลของการเชื่อมอาร์กกดหุ้มฟลักซ์พอกแข็งชำแนว
ต่อสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11

คณิต สิทธิพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**EFFECT OF MULTI-PASSES HARD-FACED METAL PRODUCED BY
SHIELDED METAL ARC WELDING ON JIS-SKD11
TOOL STEEL PROPERTIES**

KANIT SITTIPHAN



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
PROGRAM IN MANUFACTURING ENGINEERING FACULTY OF
ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
THANYABURI ACADEMIC YEAR 2014
COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY THANYABURI**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของการเชื่อมอาร์กโลหะหุ้มฟลักซ์พอกแข็งซ้ำแนวต่อสมบัติของ
เหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11
Effect of Multi-passes Hard-faced Metal Produced by Shielded Metal Arc
Welding on JIS-SKD11 Tool Steel Properties

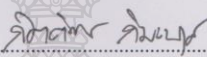
ชื่อ - นามสกุล นายคณิต สิทธิพันธ์


สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

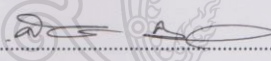
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.

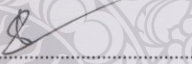
ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัย ชันทรธรมณี, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.)


..... กรรมการ
(อาจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 23 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของการเชื่อมอาร์กวดหุ้มฟลักซ์พอกแข็งซ้ำแนวต่อสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11
ชื่อ - นามสกุล	นายคณิต สิทธิพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ชัยยะ ปรานิตพลกรัง, D.Eng.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นการเชื่อมซ่อมที่ใช้ในการเพิ่มเนื้อโลหะที่ผิวชิ้นส่วนอุปกรณ์และเครื่องจักรที่สูญเสียไปเนื่องจากการขัดสีระหว่างผิวโลหะ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มความแข็งพื้นผิวอื่นๆ กระบวนการเชื่อมเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการปฏิบัติงานและราคาการปฏิบัติการต่ำ ที่ผ่านมามีชิ้นส่วนที่ผ่านการเชื่อมซ่อม เช่น เครื่องมือ หรือลูกกรีดต่างๆ สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล เป็นต้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลการเชื่อมอาร์กวดหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งที่มีผลต่อความแข็ง โครงสร้างจุลภาค และอัตราการสึกกร่อนของผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11

ในการทดลองจะใช้วัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11 ที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (กว้าง 100 mm, ยาว 150 mm, และหนา 20 mm.) ซึ่งในการเตรียมพื้นผิวของชิ้นทดสอบจะใช้ 2 วิธีคือ ผิวคืบและพื้นผิวที่มีการสร้างชั้นรองพื้น และในการเชื่อมอาร์กด้วยลวดหุ้มฟลักซ์เพื่อสร้างชั้นพอกแข็งนั้นจะใช้จำนวนชั้นพอกแข็ง 1-3 ชั้น โดยใช้กระแสเชื่อมต่างกัน 3 ระดับ ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมถูกนำไปทดสอบสมบัติ เช่น การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความต้านทานการสึกกร่อน

จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่ากระแสเชื่อมที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของชิ้นโลหะพอกแข็ง ตัวแปรในการเชื่อมที่ทำให้ค่าการสึกกร่อนต่ำที่สุด คือกระแสเชื่อมที่ 100 แอมป์ การเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่มีการเชื่อมรองพื้น เฟอร์เร็นต์น้ำหนักสูญหายไปประมาณ 0.455 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความแข็งสูงสุดที่ 870 HV การเพิ่มจำนวนชั้นพอกแข็งส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณของธาตุซิลิกอน โครเมียม และแมงกานีส และส่งผลต่อการเพิ่มค่าความแข็งและลดอัตราการสึกกร่อนของชั้นพอกผิวแข็ง

คำสำคัญ: เหล็กกล้าเครื่องมือ การเชื่อมพอกผิวแข็ง

Thesis Title Effect of Multi-passes Hard-faced Metal produced by Shielded Metal Arc Welding on JIS-SKD11 Tool Steel Properties

Name - Surname Mr.Kanit Sittiphan

Program Manufacturing Engineering

Thesis Advisor Mr.Chaiya Praneetpong, D.Eng.

Academic Year 2014

ABSTRACT

Hard-faced welding was the repair welding which could be applied to produce a metal amount on machine part surfaces that were failed and caused by the contact between metal surfaces., This welding process is simple to operate and low operation cost when compares to another process. Recently, the repaired parts such as tools or mill parts that were repaired by the welding process had been successfully applied in various industries such as sugar production industry. This research aims to study the influence of shielded metal arc welding (SMAW) parameters on the hardness, microstructure and wear resistance of the JIS-SKD11 hard-faced metal.

The experiment was carried out by using the JIS-SKD11 tool steel that was mechanically prepared to be a rectangular shape (100 mm. wide, 150 mm. long, and 20 mm. thick). The workpiece surfaces were prepared by two difference methods i.e. non-buffering and buffering surface. The SMAW was applied to produce the hard-faced layer using 3 welding current levels and using 1-3 layers of the hard-faced metal. The welded workpiece were prepared and investigated for the influence on their microstructure, hardness and wear resistance.

The experimental results showed that the welding current affected the microstructure and mechanical properties of the hard-faced metal. The optimized welding parameters were the welding current of 100 A, non-buffering layer and 3 layers of hard-faced metal. These welding parameters could produce the surface harness of 870 HV and minimized weight loss to about 0.455%. The increasing of hard-faced metal was affected by the increase amount of silicon, chromium and manganese and resulted in the increasing of wear resistance.

Keyword: tool steel, hard-faced welding

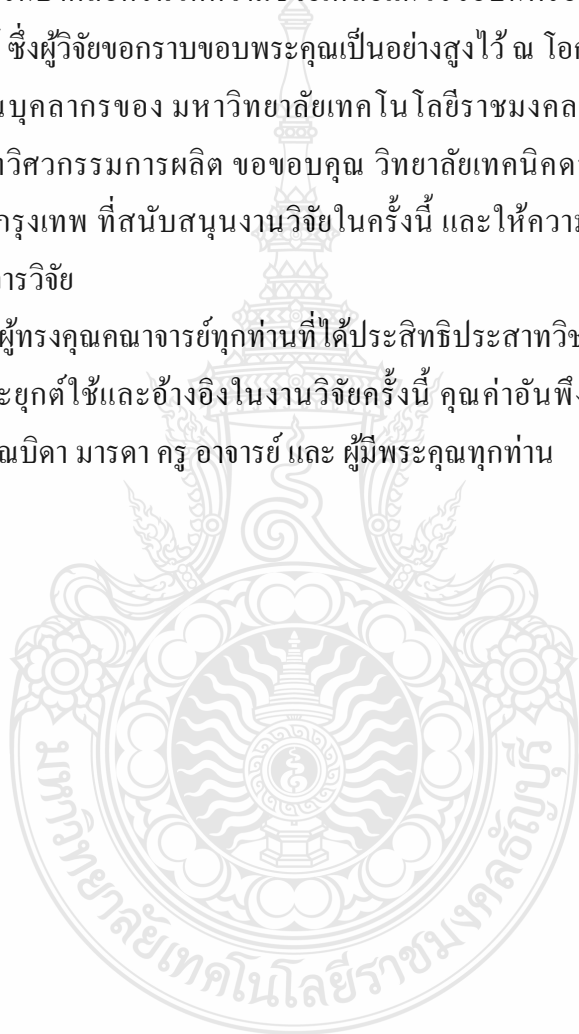
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล คณะกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรัมย์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณบุคลากรของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ขอขอบคุณ วิทยาลัยเทคนิคดอนเมือง และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และให้ความช่วยเหลือ ตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณิต ลิทธิพันธ์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่	
1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	15
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 เหล็กกล้าเครื่องมือ.....	16
2.2 ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง.....	18
2.3 การเตรียมผิวชิ้นงาน.....	18
2.4 การให้ความร้อนก่อนการเชื่อม.....	19
2.5 การเชื่อมโลหะ.....	20
2.6 การทดสอบหาสมบัติทางกล (Mechanical Test).....	22
2.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	24
2.8 การตรวจสอบการสึกกร่อน.....	27
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	33
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	36
3.3 การตรวจสอบโครงสร้างกายภาพทางโลหะวิทยา.....	40

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4 การทดสอบความแข็ง	43
3.5 การทดสอบการสึกกร่อน (Wear Test)	44
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	45
4.1 เปรียบเทียบการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น และไม่มีชั้นเชื่อมรองพื้น.....	45
4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค แบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A.....	45
4.1.2 การตรวจสอบความแข็ง แบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A.....	46
4.1.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค แบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A.....	48
4.1.4 การตรวจสอบอัตราการสึกกร่อน แบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A.....	50
4.1.5 การตรวจสอบการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ และการกระจายตัว แบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A	50
4.1.6 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค แบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A	52
4.1.7 การตรวจสอบความแข็ง แบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90A.....	53
4.1.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A	55
4.1.9 การตรวจสอบอัตราการสึกกร่อน แบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 90 A	56
4.1.10 การตรวจสอบการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ และการกระจายตัว แบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A	57
4.2 เปรียบเทียบกระแสเชื่อม ที่มีผลต่อการเชื่อมพอกผิวแข็ง แบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น และไม่มีชั้นเชื่อมรองพื้น	59
4.2.1 การตรวจสอบผิวหน้าแนวเชื่อม.....	59
4.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	60
4.2.3 การตรวจสอบความแข็ง.....	61
4.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แบบไม่รองพื้น.....	63
4.2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แบบมีชั้นรองพื้น.....	66
4.2.6 การตรวจสอบการสึกกร่อนของชิ้นงานเชื่อม แบบรองพื้น และไม่รองพื้น	68
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก ใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11.....	75
ภาคผนวก ข ใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็ง	77
ภาคผนวก ค ใบรับรองมาตรฐานการทดสอบการเชื่อมไฟฟ้า	80
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	83
ประวัติผู้เขียน.....	94



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงอุณหภูมิในการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat).....	19
3.1	ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 (ร้อยละโดยน้ำหนัก %).....	33
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมอาร์กหุ้มฟลักซ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก %).....	34



สารบัญรูป

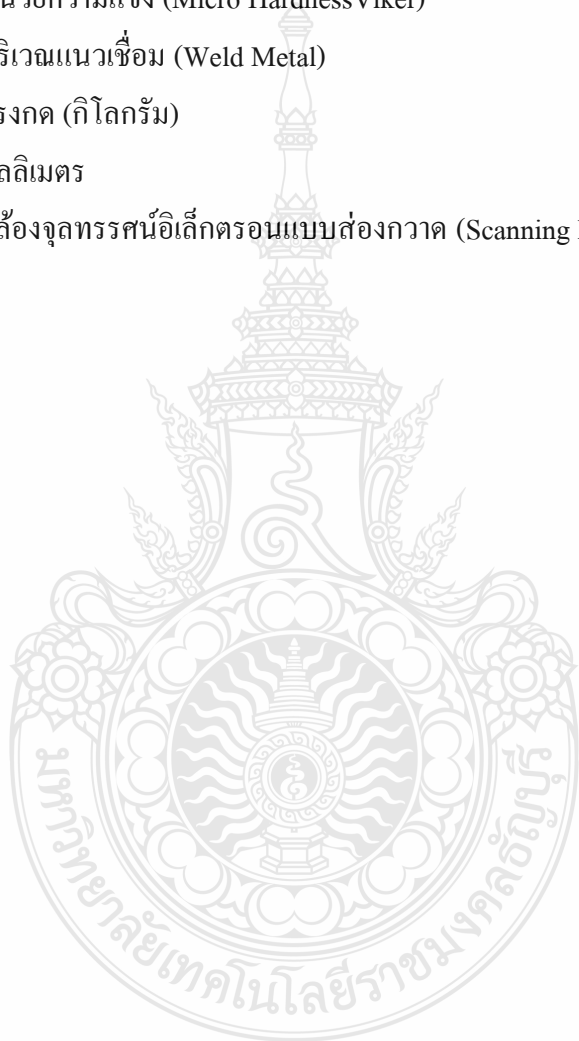
รูปที่		หน้า
2.1	การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมมีสารหุ้ม.....	21
2.2	วงจรการเชื่อมไฟฟ้า.....	21
2.3	การทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์.....	24
2.4	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	26
2.5	หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์สำหรับงานโลหะวิทยา.....	26
2.6	การทดสอบการสึกหรอแบบจานหมุน.....	28
2.7	การทดสอบการสึกหรอแบบล้อยาง.....	28
2.8	การทดสอบการสึกหรอแบบบอล 4 ลูก.....	28
3.1	ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลอง.....	34
3.2	เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.3	คู่มือชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย.....	35
3.4	การเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้นและแบบไม่มีชั้นรองพื้น.....	36
3.5	การเจาะระนาบผิวดิบของเหล็กกล้าเครื่องมือ.....	37
3.6	ขอบเขตในการเชื่อมพอกผิวแข็ง.....	37
3.7	การเชื่อมทำราบ.....	38
3.8	การออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบ.....	39
3.9	เครื่อง Wire-cut Electrical Discharge Machines.....	40
3.10	ขั้นตอนการกัดชิ้นรอย.....	41
3.11	อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค.....	41
3.12	อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจโครงสร้างจุลภาค.....	42
3.13	อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบความแข็ง.....	43
3.14	เครื่องทดสอบการสึกกร่อน.....	44
3.15	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล.....	44
4.1	โครงสร้างมหภาคแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A.....	46
4.2	ค่าความแข็งของชิ้นงานกัดทิศทางแนวตั้งแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A.....	47
4.3	ค่าความแข็งของชิ้นงานกัดทิศทางแนวนอนแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A.....	47
4.4	โครงสร้างจุลภาคแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A.....	49

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	อัตราการใช้กร่อนแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A..... 50
4.6	การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีของชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่รองพื้น ที่ กระแส 90 A 51
4.7	การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยการกระจายตัวแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A 52
4.8	โครงสร้างมหภาคแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 90 A..... 53
4.9	ค่าความแข็งของชิ้นงานกดทิศทางแนวตั้งแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 90 A..... 54
4.10	ค่าความแข็งของชิ้นงานกดทิศทางแนวนอนแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 90 A 54
4.11	โครงสร้างจุลภาคแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 90 A..... 56
4.12	อัตราการใช้กร่อนแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 90 A 57
4.13	การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีของชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบมีชั้นรองพื้น ที่ กระแส 90 A 58
4.14	การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยการกระจายตัวแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่ กระแส 90 A 59
4.15	ผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบรองพื้นและไม่รองพื้น ที่กระแส 80 และ 100 แอมป์ 60
4.16	โครงสร้างมหภาค ที่กระแส 80 และ 100 แอมป์ 61
4.17	ค่าความแข็งของชิ้นงานแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 80 และ 100 แอมป์ 62
4.18	ค่าความแข็งของชิ้นงานแบบรองพื้น ที่กระแส 80 และ 100 แอมป์ 63
4.19	โครงสร้างจุลภาคแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 80 และ 100 แอมป์ 65
4.20	โครงสร้างจุลภาคแบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 80 และ 100 แอมป์ 67
4.21	อัตราการใช้กร่อนของชิ้นงานเชื่อมแบบรองพื้น และไม่รองพื้น 68

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	กระแสเชื่อม
BM	โลหะเดิม (Base Metal)
HAZ	บริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone)
HV	หน่วยความแข็ง (Micro Hardness Viker)
WM	บริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal)
kgf	แรงกด (กิโลกรัม)
mm	มิลลิเมตร
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสูญเสียเนื้อโลหะบนผิวของชิ้นส่วนเครื่องจักรในภาคการผลิตเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตในงานอุตสาหกรรม [1] โดยมีสาเหตุมาจากการเกิดการขัดสีของชิ้นส่วนโลหะสองชิ้น การกัดกร่อนของโลหะและความชื้น และการกระแทกของชิ้นส่วนต่างๆ เป็นต้น [2] เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนและการนำเอาชิ้นส่วนเครื่องจักรที่เกิดการสูญเสียเนื้อโลหะกลับมาใช้ใหม่ กรรมวิธีการเพิ่มความแข็งแรงและการเพิ่มเนื้อโลหะบนพื้นผิวของชิ้นส่วนเครื่องจักรจึงถูกนำมาทำการปรับปรุงและแก้ไขให้สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะที่น่าสนใจในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ได้มีการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการสึกกร่อน (Wear) ของรอยเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งในงานอุตสาหกรรม โดยทำการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสม Fe-Cr-C ที่มีโครงสร้างไฮโปและไฮเปอยูเทคติก และทำการเชื่อมพอกผิวแข็งลงบนเหล็กหล่อสีเทา ผลการทดลองพบว่า ลวดเชื่อมไฮเปอยูเทคติกให้ความต้านทานการสึกกร่อนได้ดีกว่าลวดเชื่อมไฮโปยูเทคติก [3] และการเชื่อมพอกผิวแข็ง Fe-40 wt % Cr-xC ที่มีปริมาณคาร์บอนส่วนผสม 1.0-4.0 wt% โดยการเชื่อมทิกโดยกลุ่มลวดเชื่อมพอกผิวแข็งก่อให้เกิดรูปแบบการเติมกราไฟต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างประกอบด้วย โครงสร้างไฮโปยูเทคติก ยูเทคติก และไฮเปอยูเทคติก เฟส Fe-Cr เฟส $(Cr, Fe)_{23}C_6$ ผลการทดสอบพบว่า โครงสร้างที่มีการแข็งตัวแบบเอพิแทกเซียลที่เกิดการเติบโตแบบระนาบจากขอบผิวพอกแข็ง [4] และการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โดยใช้ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีส่วนผสมหลัก คือ นิกเกิล เชื่อมบนผิวเหล็กหล่อเหนียว โดยทำการเชื่อมแนวเดียว (Single pass) และรองแนว (2 Pass) ผลการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยออสเทนติก (Fe, C) เฟสแกมม่า (Fe, Ni) และคาร์ไบด์ส่วนเล็กๆ (Cr_7C_3) ค่าความแข็งแรงของผิวพอกแข็งมีค่าสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียว [5]

ด้วยผลการทดลองการเชื่อมพอกผิวแข็งดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งบนแผ่นเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11 ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร และเครื่องมือในการผลิตต่างๆ เช่น แม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะต่างๆ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งที่มีผลต่อความแข็งแรง โครงสร้างจุลภาค และอัตราการสึกกร่อนของผิว

พอกแข็ง ผลการทดลองที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาผิวพอกแข็งชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กสวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติของชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาตัวแปรการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยสวดเชื่อมอาร์กหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) ในการเชื่อมทดลอง

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 มีขนาดความกว้าง 150 mm ยาว 100 mm ความหนา 20 mm ตามมาตรฐาน JIS

1.3.2 ใช้สวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ประเภทพอกผิวแข็ง ตามมาตรฐาน JIS Z 3251:DF2B-600-B และสวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่ใช้ในการเชื่อมชั้นรองพื้น (Buffering) ตามมาตรฐาน JIS Z 3212:D5016

1.3.3 กำหนดใช้กระแสเชื่อมในชั้นรองพื้นที่ 90 แอมป์ และอุณหภูมิในการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมที่ 250 องศาเซลเซียส

1.3.4 ศึกษาตัวแปรการเชื่อม

1) กระแสเชื่อมในชั้นพอกผิวแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 80-100 แอมป์
2) การเชื่อมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท แบบมีการสร้างชั้นรองพื้น , แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น

3) จำนวนชั้นในการเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น

1.3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและมหภาค

1.3.6 ศึกษาสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน , ความแข็งไมโครวิกเกอร์ส

1.3.7 ศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning electron microscope;SEM) และวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง Energy dispersive X-ray spectrometer (EDS)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 เพื่อให้เป็นทางเลือกใช้ในการเชื่อมต่อบำรุงเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กหลวงพุ่มพริกซ์

1.4.2 เพื่อทราบถึงตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กหลวงพุ่มพริกซ์

1.4.3 เพื่อเป็นแนวทางที่จะพัฒนาองค์ความรู้ ในงานวิจัยการเชื่อมพอกผิวแข็งในงานอุตสาหกรรม และการเชื่อมซ่อมชิ้นส่วนเครื่องจักรกลซึ่งจะให้เป็นข้อมูลในการวิจัยต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าเครื่องมือ [6]

เหล็กกล้าเครื่องมือ คือ เหล็กกล้าที่ใช้สำหรับทำเครื่องมือขึ้นรูปโลหะเป็นส่วนใหญ่ เช่น แบบหล่อโลหะในขบวนการอัดฉีดโลหะร้อน (Die casting) แม่พิมพ์สำหรับตีขึ้นรูป หรือตัดวัสดุต่างๆ ซึ่งรวมถึงเหล็ก โลหะนอกกลุ่มเหล็ก และพลาสติก เหล็กกล้าเครื่องมือจัดเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆ ในปริมาณสูง เพื่อให้มีความสามารถในการชุบแข็งสูง และเพื่อสร้างคาร์ไบด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติต้านทานการสึกกร่อนอย่าง ไรก็ตาม หากแบ่งเหล็กกล้าเครื่องมือตามลักษณะการใช้งานจะสามารถแบ่งได้ 6 ประเภทดังนี้

2.1.1 เหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำ เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon) ที่ผสมคาร์บอน ตั้งแต่ 0.60-1.40% ดังนั้นสมบัติด้านการชุบแข็ง หรือความลึกของผิวชุบแข็งจึงต่ำ และจำเป็นต้องชุบแข็งด้วยน้ำ ในบางกรณีอาจมีการผสมโครเมียมหรือวานาเดียมลงไปเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง และทนต่อการเสียดสี เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีราคาถูกกว่ากลุ่มอื่น และมีจุดเด่น คือ สามารถกลึงไสเพื่อตกแต่งชิ้นงานได้ง่าย สูญเสียคาร์บอนที่ผิวยาก จุดด้อยของเหล็กกลุ่มนี้คือ การชุบแข็งด้วยน้ำอาจมีผลทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยวได้ง่าย และไม่สามารถทนต่อความร้อนได้ จึงไม่สามารถใช้สำหรับงานตัดที่รุนแรงหรือใช้งานซ้ำๆ กันจนเกิดความร้อนได้ดังนั้นโดยทั่วไปจึงไม่นิยมใช้งานกัน อาจมีการใช้งานบ้างสำหรับทำเครื่องมือตัดที่ใช้ความเร็วต่ำและตัดด้วยแรงเบาๆ เช่น ไม้อะลูมิเนียม แม่พิมพ์สำหรับทุบหัวขึ้นรูปเย็น (Cold Heading) เป็นต้นตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกลุ่มนี้ เช่น W1 W2 และ W5

2.1.2 เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steels) เป็นกลุ่มที่ใช้ผลิตเครื่องมือสำหรับนำไปใช้ในงานแปรรูปโลหะที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการแปรรูป เช่น แม่พิมพ์ตัดแผ่นโลหะเย็น ใบมีดตัดกระดาษ เพืองกัดไม้ กัดเตอร์ เป็นต้น สมบัติสำคัญที่ต้องการสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการกลึงไสดี เปลี่ยนแปลงขนาดน้อยหลังการชุบแข็ง (เนื่องจากการชุบแข็งจะทำโดยการชุบน้ำมันหรือให้เย็นตัวในอากาศ) ต้านทานการสึกกร่อนสูง และมีความเหนียวทนแรงอัดกระแทกได้ดี เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น

2.1.3 เหล็กกล้าเครื่องมือทนต่อแรงกระแทก (Shock Resisting Tool Steels) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่พัฒนาให้มีความเหนียว ความแข็งแรง และความต้านทานการสึกกร่อนสูง เพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องรับแรงกระแทกซ้ำๆ กัน เช่น สิว (Chisel) หัวกด (Punch) และแม่พิมพ์ (Die) เป็นต้น

โดยความเหนียวสูงเป็นผลจากปริมาณคาร์บอนในระดับปานกลาง และทำให้ภายหลังการอบความร้อนที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และมีคาร์ไบด์ละเอียดที่กระจาย นอกจากนี้อัตราการชุบแข็งโครเมียม โมลิบดีนัม จะช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัว (Tempering) ซิลิกอนจะเพิ่มความแข็งให้กับเฟอไรต์ และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัวด้วย แต่ข้อเสียของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้เป็นผลจากปริมาณซิลิกอน ซึ่งจะเร่งให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่าย ทำให้ความต้านทานต่อการสึกกร่อน และความต้านทานต่อความล้าต่ำลง ดังนั้นในการอบชุบความร้อนจะต้องระวังเรื่องนี้ให้มาก เกรดที่นิยมใช้งาน เช่น S1 S2 S5 และ S7 โดย S1 เป็นเกรดที่นิยมใช้งานมาก เพราะจะมีส่วนผสมของทั้งสแตนดีย์ ซึ่งจะเพิ่มสมบัติต้านทานการสึกกร่อน เพิ่มความเหนียว และเพิ่มความสามารถในการรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงให้ดีกว่าเกรด S อื่นๆ จึงสามารถใช้ในงานที่ต้องทนต่อความร้อนได้ การใช้งาน เช่น สว่าน ใบมีดตัด (Shear Blades) แม่พิมพ์ขึ้นรูป เครื่องเจาะหิน เป็นต้น

2.1.4 เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot work tool steels) ในงานบางประเภทที่ต้องใช้อาศัยอุณหภูมิสูงในการแปรรูป เช่น งานทุบขึ้นรูปร้อน (Hot forging) งานหล่อแบบฉีด (Die casting) งานอัดขึ้นรูปร้อน (Hot extrusion) งานตัดร้อน (Hot shear blade) งานอัดร้อน (Hot press) สิ่งสำคัญคือ เหล็กกล้าเครื่องมือจะต้องรักษาสมบัติความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้ดี (Red hardness) ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock) ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง และมีความเหนียวที่ดี วัสดุผสมที่จะทำให้ได้สมบัติเหล่านี้ ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม และทั้งสแตน ซึ่งผลรวมของธาตุเหล่านี้จะต้องมีปริมาณอย่างน้อย 5%

2.1.5 เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High speed tool steels) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีจุดมุ่งหมายหลัก เพื่อใช้เป็นวัสดุในการตัดโลหะด้วยความเร็วสูง เช่น ใบเลื่อย (Saws) ใบตัด (Milling cutters) เป็นต้น สมบัติสำคัญของเหล็กกล้ากลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการรักษาความแข็งของคมตัดที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติไว้ได้ (ความแข็งของคมตัดยังคงสภาพเดิม แม้จะเกิดความร้อนจนร้อนจัดเป็นสีแดง) ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนจะรักษาความแข็งไว้ไม่ได้

2.1.6 เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก (Plastic mold steels) เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิ 175-200°C ภายใต้อุณหภูมิสูง มีการกัดกร่อนจากสารเคมี และต้องรับแรงเสียดสีกับผงพลาสติกด้วย ดังนั้นสมบัติสำคัญจะต่างไปจากเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มอื่น โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาถึง ได้แก่ ความสามารถในการกลึงไส ความต้านทานแรงอัด ความแข็งที่ผิวสูง ความแข็งแรงที่แกนสูง ความแน่นอนของขนาดภายหลังการชุบแข็ง ความสามารถในการขัดผิวให้เรียบ ความต้านทานการกัดกร่อนที่ผิว ซึ่งจากสมบัติข้างต้นหากนำ

เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มทำงานเย็นหรือทำงานร้อนมาใช้ก็อาจจะไม่ได้ผลดีเท่ากับการใช้งานเหล็กกล้าที่ใช้งานเฉพาะสำหรับกลุ่มนี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถใช้ผลิตแม่พิมพ์งานหล่อแบบฉีดสำหรับโลหะผสมที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น สังกะสี และตะกั่วได้เช่นกัน

2.2 ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง [7]

ลวดเชื่อมเติมประกอบด้วยเส้นลวด (Filler Wire) แท่งลวด (Filler Rods) เส้นลวดอิเล็กโทรด (Wire Electrodes) และลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ (Cover Electrode) ซึ่งลวดเติมทำด้วยเหล็กกล้าไม่ผสม เหล็กกล้าผสมโลหะผสมแข็ง โลหะแข็งและโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็กที่ใช้สำหรับพอกผิวโลหะเหล็ก โดยการแบ่งประเภทของลวดเชื่อมสามารถแบ่งตามส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และไส้ฟลักซ์ จะแบ่งประเภทตามสมบัติเคมีของเนื้อเชื่อมได้ดังนี้

Alloy group 1 โลหะเติมกลุ่มนี้ใช้สำหรับเชื่อมพอกผิวเหล็กกล้าไม่ผสมหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ หรือบริเวณที่ไม่ต้องการความแข็งของเนื้อเชื่อมเป็นพิเศษ ในกรณีเนื้อเชื่อมจะไม่สามารถต้านทานการสึกกร่อน และเนื้อเชื่อมยังสามารถกลึงแต่งด้วยเครื่องจักรได้อีกด้วย

การนำไปใช้งาน: การเชื่อมพอกเนื้อเชื่อมอ่อน การเชื่อมเติมเนื้อและการเชื่อมรองพื้น

Alloy group 2 โลหะเติมกลุ่มนี้ความต้านทานการสึกกร่อนดีกว่าโลหะผสมกลุ่ม 1 เพราะโลหะเติมกลุ่มนี้มีโครงสร้างพื้นฐานแข็งแรงกว่าและประกอบด้วยคาร์ไบด์ในเนื้อเชื่อม โดยปกติแล้วไม่สามารถกลึงแต่งเนื้อเชื่อมได้

การนำไปใช้งาน : ใช้เชื่อมพอกล้อวิ่ง

Alloy group 3 โลหะเติมกลุ่มนี้โดยทั่วไปต้องการเนื้อเชื่อมที่มีความแข็งสูงที่อุณหภูมิสูง โดยปกติเนื้อเชื่อมจะมีธาตุ W Cr และในบางครั้งจะผสม Mo Ni V และ Co อีกด้วย โดยทั่วไปเนื้อเชื่อมมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ เนื้อเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนมาแล้วสามารถกลึงแต่งด้วยเครื่องจักรได้มีความแข็งขณะร้อน (Red hardness) จนถึงอุณหภูมิ 500 °C การเชื่อมต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อมและให้เย็นตัวช้าๆ เพื่อป้องกันการแตกร้าว

การนำไปใช้งาน : เครื่องมือใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Hot Working)

2.3 การเตรียมผิวชิ้นงาน [8]

การเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อการพอกผิวโลหะนั้นมีจุดประสงค์เพื่อขจัดไขมัน น้ำมัน จารบี ผงฝุ่น ละออง และสนิม ให้ออกจากผิวงานเพื่อทำให้ผิวงานสะอาด ปราศจากสิ่งสกปรกต่างๆ เหล่านี้ การขจัดไขมัน น้ำมัน และจารบี จะทำได้โดยการล้างออกด้วยสารละลายชนิดต่างๆ และการขจัดสนิม และผง

ฝุ่นละอองต่างๆ จะทำได้โดยการใช่แปรงลวด และกระดาษทราย สาเหตุที่จะต้องจัดสิ่งสกปรกเหล่านี้ออกจากผิวงานให้หมดนั้น เป็นเพราะสิ่งสกปรกเหล่านี้จะเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดรูพรุน การแตกร้าว และการตกระลอกของโลหะ ทำให้งานที่เชื่อมที่มีคุณภาพต่ำ

การเตรียมผิวชิ้นงานนั้นนอกจากจะเป็นการจัดสิ่งสกปรกแล้ว ยังจะต้องพิจารณาถึงรอยแตกร้าว รอยแยกของผิวงานนั้นๆ ด้วย อีกทั้งการพิจารณาถึงการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการจับยึดของโลหะพอกผิวของชิ้นงานในกรณีการเตรียมผิวชิ้นงาน ในกรณีนี้ทำได้โดยการใช้การเชื่อมเซาะ (Arc Gauging) เพื่อจัดรอยแตกร้าว หรือการเซาะร่องเพิ่มพื้นที่ผิวการจับยึด เพื่อจัดผิวเชื่อมพอกเก่าที่มีอยู่ หรือเพื่อจัดผิวงานที่แข็ง หรืองานที่บิดเบี้ยวออกไปก่อนที่จะทำการเชื่อมพอกผิว

2.4 การให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) [9]

เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อโลหะได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้โลหะเกิดการขยายตัว ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะก็จะเกิดการหดตัว การที่อุณหภูมิของโลหะลดลงอย่างไม่สม่ำเสมอจะส่งผลให้โลหะเกิดความเค้นขึ้นภายในเนื้อโลหะ โลหะที่มีความเหนียว(Ductile) สูงเช่น เหล็กกล้า มักจะไม่เกิดความเสียหายร้ายแรงเนื่องจากการหดตัวและการขยายตัว ส่วนโลหะที่มีความเหนียวต่ำเช่น เหล็กหล่อ ถ้ามีความเค้นที่เกิดขึ้นภายในสูงถึงจุดๆหนึ่งจะส่งผลให้เกิดการเสียรูป เช่น การบิดตัว เสียรูป(Distortion) ดังนั้นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมเพื่อป้องกันผลกระทบต่าง ๆ ข้างต้นคือ การให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม(Preheat) โดยแนวทางในการตัดสินใจว่าชิ้นงานควรมีการให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการเชื่อม(Preheat) หรือไม่นั้นจะพิจารณาจาก ความสามารถในการเชื่อม(Weldability) โดยความสามารถในการเชื่อมของชิ้นงาน หรือโลหะสามารถหาได้จากตารางค่า คาร์บอนสมมูล (CarbonEquivalent)

ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิในการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม(Preheat) (Smith, 1986) [10]

ปริมาณคาร์บอนสมมูล	อุณหภูมิในการให้ความร้อน (Preheat Temperature)
น้อยกว่า 0.45 %	สามารถละเว้นการ Preheat ได้
0.45 – 0.60 %	93 °C - 205 °C
มากกว่า 0.60 %	205 °C - 370 °C

วิธีการที่นิยมใช้ในการให้ความร้อนกับชิ้นงานก่อนการเชื่อม(Preheat) ได้แก่ การให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า และการให้ความร้อนด้วยแก๊ส

2.5 การเชื่อมโลหะ [11]

การเชื่อมโลหะ คือ การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมมีสารพอกหุ้ม (Shielded Metal Arc Welding) หรือเรียกว่าการเชื่อมด้วยธูปเชื่อม ซึ่งเป็นขบวนการเชื่อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากต้นทุนต่ำ งานที่เชื่อมด้วยขบวนการนี้ได้แก่ ท่อส่งแก๊ส ท่อส่งน้ำมัน งานโครงสร้าง งานช่างกล เกษตร และอื่นๆ ข้อดีของขบวนการเชื่อมแบบนี้คือ สามารถเชื่อมได้ทั้ง โลหะที่เป็นเหล็กและไม่ใช่เหล็ก ที่มีความหนาตั้งแต่ 1.2 mm ขึ้นไป และสามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม

การเชื่อมไฟฟ้า (Arc Welding) การเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า ใช้สำหรับเชื่อมซ่อมแซมชิ้นส่วนโลหะที่ชำรุดหรือประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ซึ่งในระยะแรกนั้นคุณภาพแนวเชื่อมยังไม่ดีนัก ปัจจุบันเทคโนโลยีการเชื่อมได้ก้าวหน้าไปมาก มีการปรับปรุงทั้งด้านกลวิธีการเชื่อมและคุณภาพของรอยเชื่อม นอกจากนี้ยังมีการคิดค้นกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าที่แปลกใหม่อีกมากมาย อาทิเช่น การเชื่อมแบบมิก การเชื่อมแบบทิก การเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ การเชื่อมแบบพลาสมา และอื่นๆ

ข้อดี – ข้อเสียของการเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับการย้าหมุด

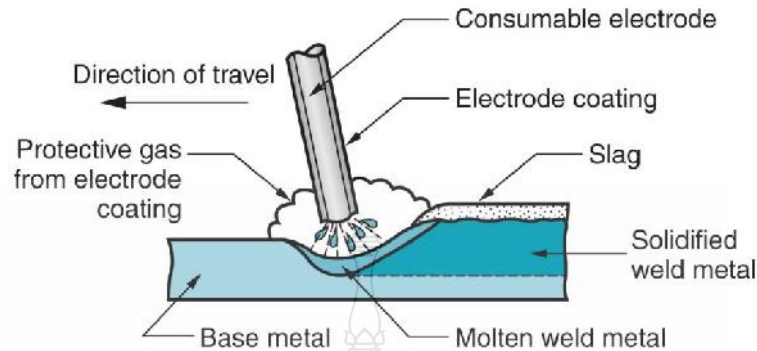
ข้อดีของการเชื่อม

- 1) โครงสร้างของงานไม่ยุ่งยาก
- 2) รอยต่อมีคุณภาพสูง
- 3) สามารถป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส น้ำมัน ของเหลว และอากาศได้ดี
- 4) ประหยัดวัสดุ
- 5) ลดขั้นตอนการทำงาน
- 6) งานมีคุณภาพสูงคงทนและสวยงาม
- 7) ลดต้นทุนการผลิต
- 8) ลดเสียงดังขณะทำงาน

ข้อเสียของการเชื่อม

- 1) ทำให้สมบัติของงานเชื่อมเปลี่ยนแปลง
- 2) งานบิดตัวและหดตัว
- 3) ทำให้เกิดความเค้นตกค้างอยู่ในวัสดุงานเชื่อม
- 4) การตรวจสอบคุณภาพของงานเชื่อมทำได้ยาก
- 5) ชิ้นส่วนของงานเชื่อมมีความไวต่อการเกิดความเค้นเฉพาะที่

หลักการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมมีสารพอกหุ้ม [11]

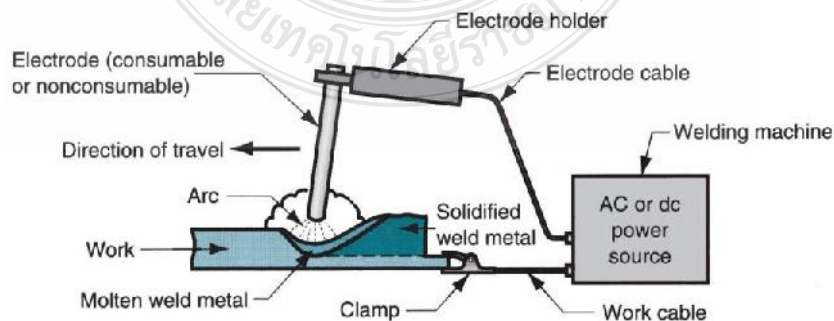


รูปที่ 2.1 การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมมีสารพอกหุ้ม [11]

การเชื่อมโลหะด้วยลวดเชื่อมมีสารพอกหุ้ม คือ กรรมวิธีการต่อโลหะให้ติดกัน ซึ่งได้รับความร้อนจากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมไฟฟ้า (Electrode) กับชิ้นงาน ความร้อนที่เกิดจากการอาร์กสูงประมาณ $6,000^{\circ}\text{C}$ ($3,316^{\circ}\text{F}$) เพื่อหลอมละลายโลหะให้ติดกัน โดยโลหะแกนลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า และละลายเป็นเนื้อโลหะเชื่อม ส่วนฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมจะได้รับความร้อนและหลอมละลายปกคลุมรอยเชื่อมเอาไว้ เพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับรอยเชื่อม พร้อมทั้งช่วยลดอัตราการเย็นตัวของรอยเชื่อมอีกด้วย เมื่อเย็นตัวแล้วฟลักซ์จะแข็งและเปราะเหมือนแก้วเรียกว่า สแลก (Slag)

วงจรพื้นฐานของการเชื่อมไฟฟ้า (Basic Arc welding circuit)

วงจรพื้นฐานของการเชื่อมไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ เครื่องเชื่อมซึ่งเป็นต้นกำลังในการผลิตกระแสเชื่อมในวงจร โดยเครื่องเชื่อมจะจ่ายกระแสไปตามสายเชื่อมจนถึงชิ้นงานและลวดเชื่อม เพื่อให้เกิดการอาร์กขึ้นระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 วงจรการเชื่อมไฟฟ้า [11]

การเชื่อมพอกผิวแข็งโดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Hard facing by with coated electrode arc welding)

การเชื่อมพอกผิวแข็งโดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Hard facing by with coated electrode arc welding) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิวแข็งเหมือนกับอุปกรณ์ที่ใช้ในกรรมวิธีเชื่อมอาร์กแบบธรรมดาด้วยอิเล็กโทรดที่มีสารพอกหุ้ม ดังนั้นในการเชื่อมรอยต่างๆ จะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม การตั้งมุมอิเล็กโทรด แรงเคลื่อนขณะอาร์กการซึมลึกและส่วนประกอบของสารพอกหุ้ม ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของผิวที่เราจะเชื่อมพอกผิวแข็ง รวมทั้งการเดินแนวเชื่อมจะใช้วิธีสายหรือไม่สายอิเล็กโทรดก็ได้ โดยให้แนวเชื่อมซ้อนกันหรือชั้นเดียวก็ได้ แต่ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงการบิดตัวของโลหะชิ้นงานด้วยว่าจะยอมให้บิดตัวมากน้อยเพียงใด ทั้งนี้ความกว้างของรอยเชื่อมไม่ควรเกิน 2.5 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรด

สำหรับกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งโดยใช้ลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้ม เป็นกระบวนการนำมาใช้ในการเชื่อมพอกผิวแข็งของใบผสมดิน และเป็นกระบวนการที่ง่ายไม่ยุ่งยาก รวดเร็ว สะดวก นิยมใช้กันทั่วไป ตลอดจนสะดวกในการเลือกใช้วัสดุพอกผิวแข็งที่มีอยู่ในตลาด

การนำการพอกผิวแข็งไปใช้งานนั้น แนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีแนวขวางตัวกับทิศทางการไหลของวัสดุจะช่วยดึงวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ลูกหีบสำหรับบดดิน เป็นต้น แนวเชื่อมที่มีทิศทางขนานกับทิศทางการไหลของวัสดุขั้วต่างๆ จะทำให้การไหลของวัสดุไหลอย่างราบเรียบ ดังนั้นก็จะเป็นการลดการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นด้วย เช่น การเชื่อมพอกผิวแข็งบนผิวบั้งกีของรถดักดิน บริเวณที่ต้องสัมผัสกับกรวด หิน ทราย และวัสดุอื่นในขณะใช้งาน โดยเชื่อมให้แนวเชื่อมตัดขวางเป็นตารางแหหรือตาข่ายพื้นที่เล็กๆ ในช่องตาข่ายจะต่ำกว่าแนวเชื่อม พื้นที่จุดนี้เองทำให้วัสดุซึ่งสัมผัสกับบั้งกีเข้ามาอัดติดตัก้าง เมื่อใช้บั้งกีครั้งต่อไปวัสดุและทรายซึ่งติดในพื้นที่จุดนั้นช่วยป้องกันดินและทรายที่จะมาเสียดสีตัวบั้งกีในครั้งต่อไป นอกจากการเชื่อมแบบตาข่ายพื้นที่ของบั้งกีดักดิน หรือพื้นของบั้งกีชุดหินมีการใช้เทคนิคการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบลายเส้น

2.6 การทดสอบหาสมบัติทางกล (Mechanical Test) [12, 13]

2.5.1 การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส

การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness Test) ค่าความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานแรกกด การขั้วและ การขึ้นรูปที่ต้องใช้การตัดเนื้อวัสดุ ในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดที่จะหาการทดสอบกับทุกวัสดุ ดังนั้นการทดสอบจะต้องให้มีความเหมาะสมกับ

วัสดุที่จะใช้ทดสอบ แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะ ในการต่อต้านการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำบนชิ้นงาน โดยมีวิธีที่นิยมใช้งานดังนี้

1) การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ อาศัยการกดของหัวกดทรงกลมที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำหนึ่งหน่วยต่อพื้นที่

2) การทดสอบแบบรอกเวลล์ (Rockwell Hardness Test) เป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยการวัดความลึกของหัวกดซึ่งทำด้วยเพชรทรงกรวย ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดแรงกดที่กระทำหนึ่งหน่วยต่อพื้นที่

3) การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136 องศาที่เคลือบด้วยคาร์บอนที่ชุบแข็ง ทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 – 120 kgf โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ค่าความแข็งจะถูกคำนวณไว้แล้วที่ความยาวรอยกดและแรงกดขนาดต่างๆ

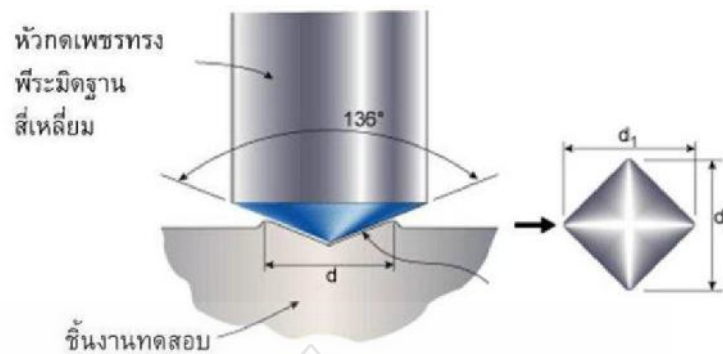
สำหรับโครงการนี้จะใช้วิธีการวัดค่าความแข็งแบบการทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) เพียงวิธีเดียวเท่านั้น จึงขอกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานของการทดสอบดังนี้

2.5.2 การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)

การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นพีรามิดฐานสี่เหลี่ยม (Vickers Microhardness Test) ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา ดังรูป 2.7 (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งแรงจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว สำหรับการทดสอบความแข็งวิธีนี้ หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่อ่อนมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมาก (HV ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกดจะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 นิวตัน ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุที่ทดสอบ

$$Hv = \frac{2F \sin(136/2)}{d^2}$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (N/mm²)
F คือ แรงกด (N)
D คือ ค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุม d1 และ d2 ของรอยกด = (d1+ d2)/2 (mm²)



รูปที่ 2.3 การทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ [13]

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ได้แก่

1) การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิด แต่ถ้าชิ้นงานอ่อนและใช้น้ำหนักกดมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับหัวกดเพชร ตอนคลายหัวกดได้ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มีชั้นออกไซด์ หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นงานทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) หรือกรรมวิธีเย็น (cold working)

2) ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ทั้งตามแนวแกน x และ y

3) ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกดและหลังจากการทดสอบวัดความแข็ง ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชิ้นงานทดสอบ

4) การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุมจะขึ้นกับสายตาของผู้ทำการตรวจสอบ ดังนั้นควรให้บุคคลใดบุคคลหนึ่งเป็นผู้อ่านค่าเนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กมาก จึงจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจหารอยกดที่เกิดขึ้น

2.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา [14]

สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของโลหะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโลหะ และการจัดเรียงตัวของอะตอมในโลหะ การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาของโลหะเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญในการ ตรวจสอบคุณภาพ ตลอดจนใช้เป็นหลักฐานเบื้องต้นในการวิเคราะห์สาเหตุของความเสียหายของชิ้นส่วน โลหะนั้นๆ

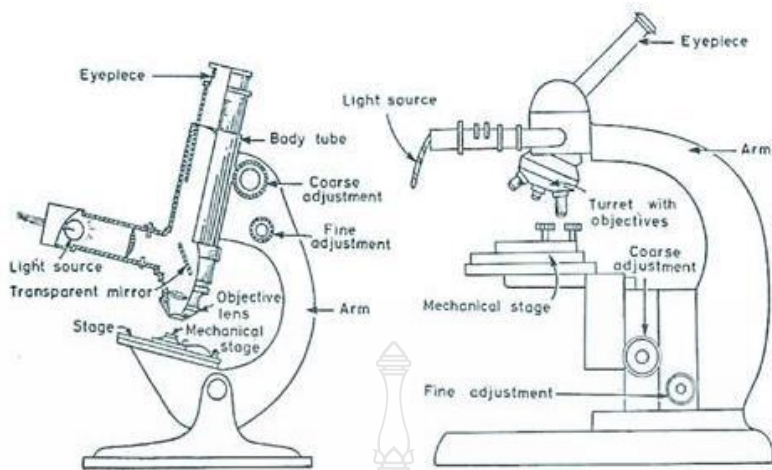
การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา แบ่งเป็น

1. การตรวจสอบในระดับมหภาค (Macro-scopic examination) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานโดยใช้กำลังขยายต่ำกล่าวคือ เมื่อเตรียมชิ้นงานโดยการขัดหยาบ ขัดละเอียด ขัด เงาม (Polishing) และกัดกรด (Etching) แล้วสามารถตรวจสอบได้โดยตาเปล่า (Visual inspection) หรืออาจ ใช้กำลังขยายได้ไม่เกิน 10 เท่า

2. การตรวจสอบในระดับจุลภาค (Micro-scopic examination) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของ ชิ้นงาน โลหะโดยใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นกล่าวคือ ตั้งแต่ 10 เท่าเป็นต้นไป ซึ่งอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการตรวจสอบ โครงสร้าง ฯ ในระดับจุลภาค คือ กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา (Metallurgical microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยจะมีกำลังขยายอยู่ระหว่าง 10-1,000 เท่า ที่กำลังขยายสูงช่วยทำให้การจำแนกชนิดของ เฟส (Phase) โครงสร้าง (Structure) ที่ปรากฏอยู่ รวมถึงลักษณะรูปร่าง และขนาดของเฟส หรือ โครงสร้างนั้น ๆ ในชิ้นงานตัวอย่างได้ง่ายขึ้น ในบางกรณีที่ โครงสร้าง หรือเฟสที่ปรากฏในตัวอย่าง ชิ้นงานมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตรวจสอบได้ที่ระดับกำลังขยาย 10-1,000 เท่า จึงต้องมีการเลือกใช้เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูง ในที่นี้คือมีกำลังขยายที่มากกว่ากล้อง จุลทรรศน์แบบใช้แสง และใช้แหล่งกำเนิดแสงจากลำแสงอิเล็กตรอนดังนั้นกล้องชนิดนี้จึงได้ชื่อว่า “กล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอน” (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้งานในทางโลหะกรรมมีอยู่ 2 ชนิดคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน)

กล้องจุลทรรศน์สำหรับส่อง โครงสร้างงานทางโลหะวิทยา หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมีอยู่หลายลักษณะด้วยกัน เช่น ชนิดที่ตัวโครงสร้างของกล้องสามารถเคลื่อนย้ายได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) แต่ที่ได้รับความนิยมใช้งานในปัจจุบัน และมีการใช้งาน ณ ห้องปฏิบัติการโลหะวิทยาภาพ คือ กล้องจุลทรรศน์ชนิดที่ฐานแท่นรองรับชิ้นงานตัวอย่างสามารถ เคลื่อนไป-มาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข)

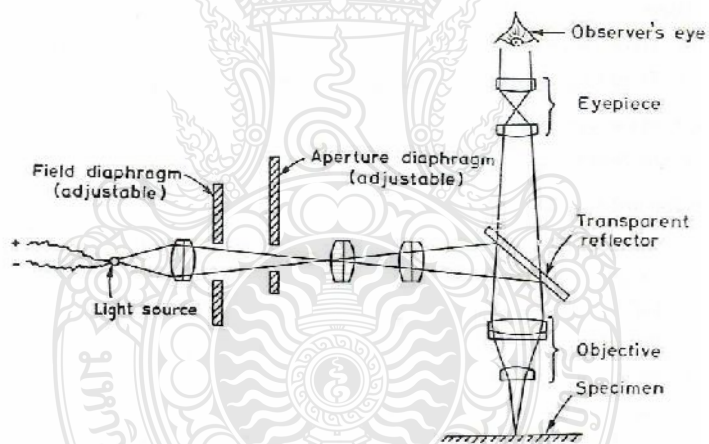
การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แสดงดังรูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงซึ่งจะส่งลำแสงผ่านเลนส์รวมแสงไปตกกระทบบนแผ่นแก้วสะท้อนแสง (Transparent reflector) ทำให้แสงดังกล่าวตกลง ในลักษณะที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ผิวชิ้นงานที่ได้ผ่านการเตรียมมาแล้วก็จะสะท้อนแสงกลับขึ้น ไปผ่านเลนส์วัตถุ (Objective lense) แล้วผ่านเลนส์ตา (Eyepiece) ก่อน จะผ่านเข้าตา (Observer's eye) ทำให้เห็นภาพขยาย ของโครงสร้างชิ้นงานดังกล่าว



ก. กล้องจุลทรรศน์ชนิดที่ตัว
โครงสร้างเคลื่อนย้ายได้

ข. กล้องจุลทรรศน์ชนิดที่ฐานแท่นรองรับ
ชิ้นงานสามารถเคลื่อนไปมาได้

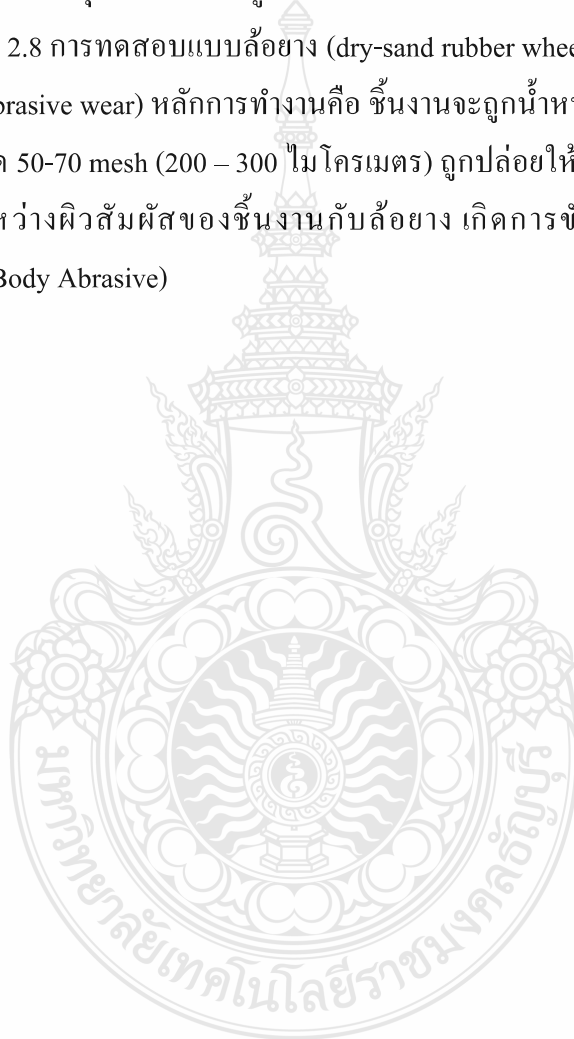
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง [14]

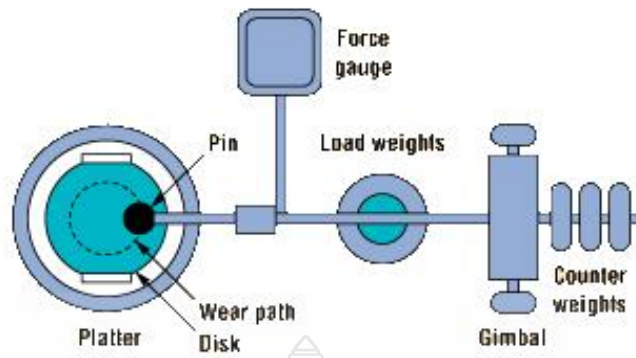


รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหวิทยา [14]

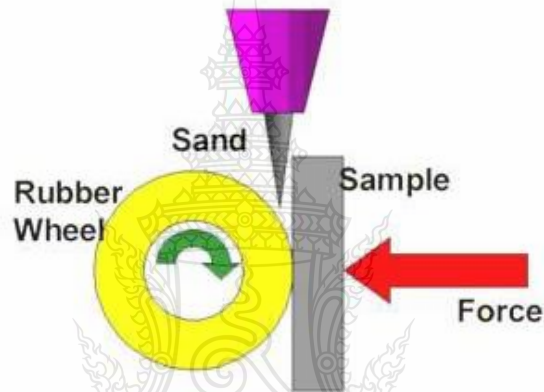
2.8 การตรวจสอบการสึกกร่อน[12]

การทดสอบการสึกกร่อนนั้น ออกแบบให้มีความใกล้เคียงกับการทำงานจริงของเครื่องจักรกลนอกจากนี้ในการทดสอบยังต้องสามารถควบคุมให้อยู่ได้สภาวะการใช้งานจริงให้มากที่สุด ซึ่งตัวแปรที่ต้องการควบคุมได้แก่ น้ำหนักถ่วงที่ใช้ ความเร็วในการหมุนหรือเคลื่อนที่ อุณหภูมิ การหล่อลื่นและความชื้น เป็นต้น ได้รวบรวมลักษณะการทดสอบการสึกกร่อนไว้หลายๆ ลักษณะ ได้แก่ แบบหมุดกดบนจานหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แบบล้อยาง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และแบบบอล 4 ลูก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 การทดสอบแบบล้อยาง (dry-sand rubber wheel) เป็นการทดสอบประเภทการสึกกร่อนแบบขัดถู (abrasive wear) หลักการทำงานคือ ชิ้นงานจะถูกน้ำหนักกดเข้าหาด้านข้างของล้อยาง ขณะที่ผงขัดขนาด 50-70 mesh (200 – 300 ไมโครเมตร) ถูกปล่อยให้ตกอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงของโลกเข้าระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับล้อยาง เกิดการขัดสีแบบที่มีลักษณะสามองค์ประกอบ (Three Body Abrasive)

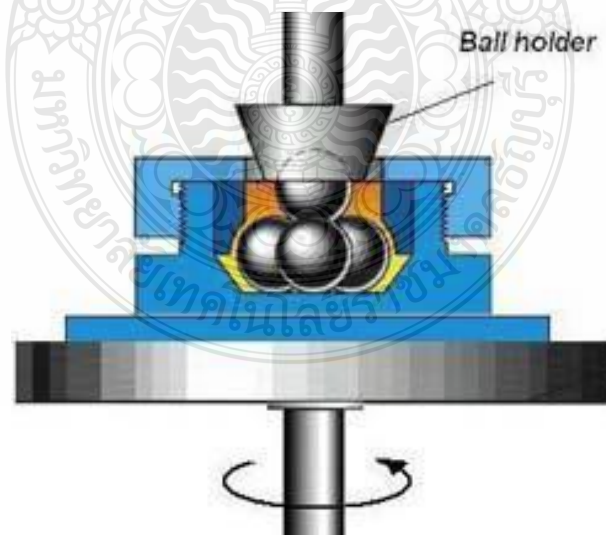




รูปที่ 2.6 การทดสอบการสึกหรอแบบจานหมุน [12]



รูปที่ 2.7 การทดสอบการสึกหรอแบบล้อยาง [12]



รูปที่ 2.8 การทดสอบการสึกหรอแบบบอล 4 ลูก [12]

ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกกร่อน

1) ความแข็งเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการสึกกร่อน โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ส่วนมากวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงจะมีอัตราการสึกกร่อนต่ำกว่าวัสดุที่มีความแข็งต่ำ ในกรณีการสึกกร่อนแบบขัณฑูที่มีลักษณะสามองค์ประกอบ ค่าความแข็งของอนุภาคขัณฑู (abrasive particle) จะมีผลต่อการสึกกร่อนของวัสดุด้วย

2) น้ำหนักที่กระทำกับวัสดุ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการสึกกร่อนของวัสดุ โดยเมื่อให้แรงที่มากกระทำกับวัสดุเพิ่มขึ้นจะเป็นผลทำให้มีอัตราการสึกกร่อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ Archard

3) อุณหภูมิ การที่มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในระบบที่มีการสึกกร่อนจะมีผลทำให้อัตราการสึกกร่อนเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากจะทำให้ค่าความคงทนของวัสดุ (yield strength) ลดลงและยังอาจมีผลทำให้เกิดการสึกกร่อนแบบกัดกร่อน (corrosive wear) ได้ง่ายขึ้นอีกด้วย

4) ความเร็วของผิวสัมผัส เมื่อความเร็วในการสัมผัสเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราการสึกกร่อนจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นการสึกกร่อนแบบกัดกร่อน ความเร็วของอนุภาคขัณฑูที่มากระทบบริเวณผิววัสดุจะทำให้มีอัตราการสึกกร่อนเพิ่มมากขึ้นด้วย

5) ความชื้น ซึ่งความชื้นจะส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนแบบเสริมกันทำให้อัตราการสึกกร่อนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะจะทำให้เกิดการสึกกร่อนแบบกัดกร่อน แต่ในบางกรณีที่มีความชื้นสูงมากพอจะกลายเป็นตัวสำหรับหล่อลื่น (lubricant) จึงทำให้เกิดการสึกกร่อนลดลง

6) อนุภาค พบว่าค่าความแข็ง ขนาดและรูปร่างของอนุภาคจะมีผลต่อการสึกกร่อน โดยถ้าอนุภาคมีความแข็ง ขนาดและอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมสูงจะทำให้มีอัตราการสึกกร่อนเพิ่มขึ้น โดยความเป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาคขัณฑูจะมีผลต่ออัตราการสึกได้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาอิทธิพลตัวแปรในงานเชื่อม ที่มีผลต่อสมบัติ ทางโลหะวิทยา สมบัติทางกลของรอยต่อวัสดุต่าง ๆ เช่น

Zhang *et al.* [15] ทำการศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีผลต่อสมบัติทางกลในรอยเชื่อมเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High Strength Low Alloy: HSLA) โดยการเปรียบเทียบผลของการเชื่อมเชื่อมกับสภาวะที่ได้จากตลาด โดยชิ้นงานเชื่อมเชื่อมประกอบด้วยการเชื่อมสร้างชั้นผิวและไม่มีชั้นผิว ชิ้นงานที่ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความล้าตัวของรอยเชื่อม ผลการทดลองพบว่ารอยเชื่อมเชื่อมที่ไม่มีชั้นผิวก่อนการเชื่อมจริงทำให้ความแข็งแรง

บริเวณพื้นหลอมละลายมีค่าลดลง โดยมีสาเหตุมาจากเฟอไรต์ถูกกักขังไว้ในโครงสร้าง ขณะที่รอยเชื่อมที่มีการเชื่อมสร้างชั้นผิวก่อนการเชื่อมนั้นแสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานการล้าตัว ความหนาของชั้นผิวที่เพิ่มขึ้นทำให้ทำให้เฟอไรต์มีลักษณะเป็นแผ่นและทำให้โครงสร้างฟิลไลต์และเบนไนท์มีความละเอียดขึ้น เมื่อความหนาของชั้นผิวมีค่าเท่ากับ 10 มม. ค่าความแข็งและความต้านทานการล้ามีค่าลดลงเนื่องจากการเจือจางของโลหะเชื่อมเข้าสู่พื้นที่การหลอมละลาย

Buchanan *et al.* [3] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการสึกกร่อน (Wear) ของรอยเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอ้อย โดยทำการเชื่อมพอกด้วยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของเหล็กกล้าผสม Fe-Cr-C ที่มีโครงสร้างไฮโปและไฮเปอยูเทคติก และทำการเชื่อมพอกผิวลงบนเหล็กหล่อสีเทาด้วยลวดเชื่อม 2 เกรด และทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสึกกร่อนของผิวพอกแข็งโดยการออกแบบเป็นลักษณะล้อหมุนซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมการหีบอ้อย ผลการทดลองพบว่าลวดเชื่อมไฮเปอยูเทคติกให้ความต้านทานการสึกกร่อนได้ดีกว่าลวดเชื่อมไฮโปยูเทคติก ค่าความแข็งที่เหมาะสมที่สุดพบได้กับการเชื่อมในชั้นเชื่อมชั้นแรก พฤติกรรมการสึกกร่อนนั้นไม่มีความแตกต่างกันในทุกๆ สภาวะกลไกการเกิดการสึกกร่อนเกิดจากหลุดออกมาเป็นชิ้นๆ และการแตกร้าวของผิวงาน

Fan *et al.* [16] ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากเหล็กโครเมียมคาร์ไบด์ $(Cr,Fe)_2_3C_6$ ด้วยลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง Fe-Cr-C ที่มีปริมาณโครเมียมสูง การศึกษาเริ่มต้นด้วยการเชื่อมทิกและเติมลวดเชื่อมโลหะผสมกราไฟท์และโครเมียมบนแผ่นเหล็กกล้า ASTM A36 การเลือก ลวดเชื่อมออกแบบตามหลักการแบ่งขนาดและการกระจายตัวของเฟสคาร์ไบด์ใน โลหะเชื่อมที่ ตรวจสอบได้ที่อุณหภูมิห้อง จากลวดเชื่อมที่ใช้พบ โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบ่ง ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ โครงสร้างไฮโปยูเทคติก ยูเทคติก และไฮเปอยูเทคติก และไม่พบรอยแตกร้าวใดๆ บนผิวพอกแข็ง ผลการตรวจสอบการเปื่อยเบนรังสีเอกซ์พบ โครงสร้างจุลภาคไฮเปอยูเทคติก ประกอบด้วยเฟสสามเฟส คือ สารละลายของแข็ง Fe-Cr และ $(Cr,Fe)_2_3C_6$ ปริมาณเล็กน้อยของเฟส $(Cr,Fe)_7C_3$ เฟสส่วนใหญ่ คือ $(Cr,Fe)_2_3C_6$ ที่มีเฟส $(Cr,Fe)_7C_3$ อยู่ตรงกึ่งกลางและเป็นสาเหตุทำให้ ความแข็งเพิ่มสูงถึง 70 HRC

Chang *et al.* [17] ได้ทำการศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของผิวพอกแข็ง Fe-40wt%Cr-xC ที่มีปริมาณคาร์บอนผสม 1.0-4.0wt% โดยการเชื่อมทิก โดยกลุ่มลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง ก่อให้เกิดรูปแบบโครงสร้างที่อุณหภูมิต่างๆ ประกอบด้วยคาร์ไบด์หลายรูปแบบ การเติมกราไฟท์ใน ปริมาณที่แตกต่างกันทำให้ได้โครงสร้างประกอบด้วย โครงสร้างไฮโปยูเทคติก ยูเทคติก และไฮเปอ ยูเทคติก เฟส Fe-Cr เฟส (Cr,Fe)₂₃C₆ และเฟส (Cr,Fe)₇C₃ การตรวจสอบตัดขวางแนวเชื่อมพอกผิวพบ โครงสร้างที่มีการแข็งตัวแบบเอพิแทกเซียลที่เกิดการเติบโตแบบระนาบจากขอบผิวพอกแข็ง นอกจากนี้พบการเติบโตของเฟสยูเทคติกที่ผิวสัมผัสของผิวพอกแข็งและแผ่นงาน โครงสร้างที่ กึ่งกลางแนวมีลักษณะเดียวกับที่ขอบแนวเชื่อมพอกผิวแข็งทำให้ค่าความแข็งมีค่าค่อนข้างใกล้เคียง กัน สุดท้ายความแข็งของลวดเชื่อมไฮเปอยูเทคติกที่มีปริมาณความแข็ง 4.05%wt มีค่าสูงกว่าลวดเชื่อม ไฮเปอยูเทคติกที่มีปริมาณความแข็ง 1.35%wt ประมาณสามเท่า

Jeshvaghani *et al.* [5] ศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โดยใช้ลวด เชื่อมพอกผิวแข็งที่มีส่วนผสมหลัก คือ นิกเกิล เชื่อมบนผิวเหล็กหล่อเหนียว โดยการทำการเชื่อมแนว เดียว (Single pass) และสองแนว (2 pass) ผลของการจำนวนแนวเชื่อมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของผิวพอกแข็งถูกทำการศึกษา ผลการทดลองพบว่าโครงสร้าง จุลภาคประกอบไปด้วยออสเทนิต (Fe,C), เฟสแกมมา (Fe, Ni) และคาร์ไบด์ส่วนเล็กๆ (Cr₇C₃) ความแข็งของผิวพอกแข็งมีค่าสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียว โดยค่าความแข็งแนวเดียวและสองแนวมีค่า 500 และ 450HV ตามลำดับ

Chatterjee and Pal [18] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอจากอนุภาคของแข็ง (Solid Particle Erosion: SPE) ของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งที่เชื่อมลงบนผิวเหล็กหล่อสีเทา (ASTM2500) ตาม มาตรฐาน ASTM G76 พบว่าอัตราการเกิดการสึกกร่อนมีความแตกต่างตามชนิดของลวดเชื่อมพอกผิว โดยอัตราการสึกกร่อนขึ้นกับสัดส่วนของคาร์ไบด์ในผิวพอกแข็ง ความแข็งไม่ได้เป็นปัจจัยหลักใน การเพิ่มอัตราการสึกกร่อนของผิวพอกแข็งแต่ขึ้นกับอัตราการกระจายตัวของเฟสคาร์ไบด์

J.C.F. Jorge *et al.* [19] ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณ โครเมียมต่อความสัมพันธ์ (Toughness) ของเนื้อเชื่อมชั้นเดียว ในการเชื่อมระหว่างโครงสร้างจุลภาคและค่าความเหนียว เหล็กกล้า C-Mn ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์คใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding) พบว่าเมื่อ ปริมาณของโครเมียมเพิ่มขึ้นสัดส่วนของ Acicular ferrite เพิ่มขึ้นในตอต้นและสัดส่วนของ

Allotrimorphic ferrite ลดลงอย่างต่อเนื่อง ก่อนถูกแทนที่ด้วย ferrite with second phase และท้ายสุด จะเกิดมาร์เทนไซต์ เปรอร์เซ็นต์ของบริเวณ reheat เป็นปัจจัยที่ควบคุมค่าความเหนียว (Toughness) เพราะว่าบริเวณ Columnar มีค่าต้านทานแรงกระแทกต่ำแม้ว่ามีปริมาณ acicular ferrite สูงก็ตาม สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและค่าความเหนียว (Toughness) ในเนื้อเชื่อมชั้นเดียว จะขึ้นอยู่กับจำนวนองค์ประกอบของโครงสร้างมาร์เทนไซต์/อสเทนไนท์

สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ที่ได้มีการศึกษาอิทธิพลตัวแปรในงานเชื่อมที่มีผลต่อ สมบัติทางกลของวัสดุต่างๆ และสมบัติทางโลหะวิทยา ที่มีการเชื่อมชั้นผิวรองพื้น และไม่มีการเชื่อม ชั้นผิวรองพื้น โดยได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างมหภาค ค่าความแข็ง และอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้ใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กสวดหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งโดยใช้เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 เป็นชิ้นงานทดลองเชื่อม และใช้ลวดเชื่อมอาร์กหุ้มฟลักซ์ (Arc Welding Electrode) ชนิดพอกผิวแข็ง โดยในขั้นตอนการเชื่อมได้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ 1) การเชื่อมแบบที่มีการสร้างชั้นรองพื้น และแบบที่ 2) การเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น ซึ่งลักษณะการเชื่อมจะทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง จำนวน 3 ชั้น โดยเชื่อมแบบ Manual Metal Arc (MMA) จากผู้เชี่ยวชาญในการเชื่อม จากนั้นนำชิ้นงานหลังการเชื่อมไปทดสอบหาสมบัติทางกล และตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยการวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

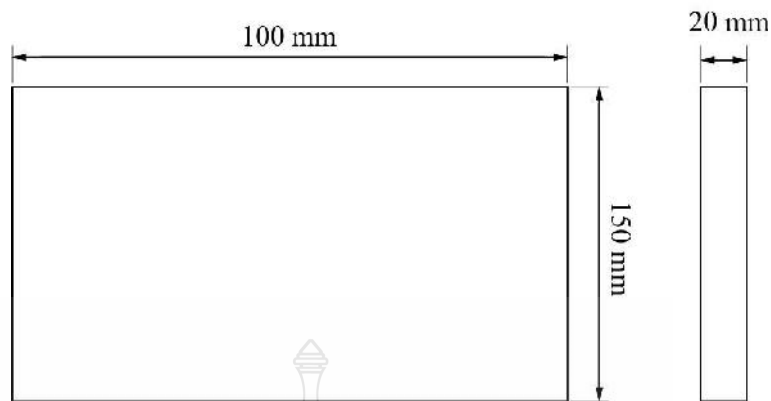
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้ชิ้นงานทดลองเชื่อม คือ เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 ส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3.1 ทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาดดังนี้ ความกว้าง 100 mm ยาว 150 mm และหนา 20 mm แสดงดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 (ร้อยละ โดยน้ำหนัก %)

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11					
C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr
1.53	0.44	0.25	0.87	0.09	11.85



รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลอง (หน่วย: mm)

นอกจากนี้ในการวิจัยนี้ได้ใช้ลวดเชื่อมอาร์กหุ้มฟลักซ์ชนิดพอกผิวแข็งเป็นวัสดุในการเชื่อม โดยในการเชื่อมจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ 1) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้รองพื้น และ 2) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ไม่ใช้รองพื้น ซึ่งลวดหุ้มฟลักซ์ทั้ง 2 ประเภทนี้ เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm ยาว 350 mm แสดงส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมอาร์กหุ้มฟลักซ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก %)

Material	Chemical composition (%)						
	Type	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr
Buffer electrodes		0.11	1	0.5		9	29
Hardfacing electrodes		0.5	1.5	0.3	1.1		6.4

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องเชื่อม GMAW

เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ที่มีเครื่องหมายทางการค้า ยี่ห้อ KEMPPPI Master TIG – AC 2500 ซึ่งเป็นเครื่องเชื่อมทิก (TIG) ระบบอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถเชื่อมได้ทั้งระบบการเชื่อมทิก (TIG) และการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.2 ตู้อบชิ้นงาน

ตู้อบลวดเชื่อมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตู้ที่สามารถปรับตั้งค่าอุณหภูมิได้โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 120-400 องศาเซลเซียส โดยสามารถอ่านค่าของการวัดอุณหภูมิได้จากเกจวัดอุณหภูมิ โดยการอบไล่ความชื้นชิ้นงานจะใช้อุณหภูมิที่ 350 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการอบ 60 นาที และทำการอบไล่ความชื้นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั้ง 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ดังรูปที่ 3.3



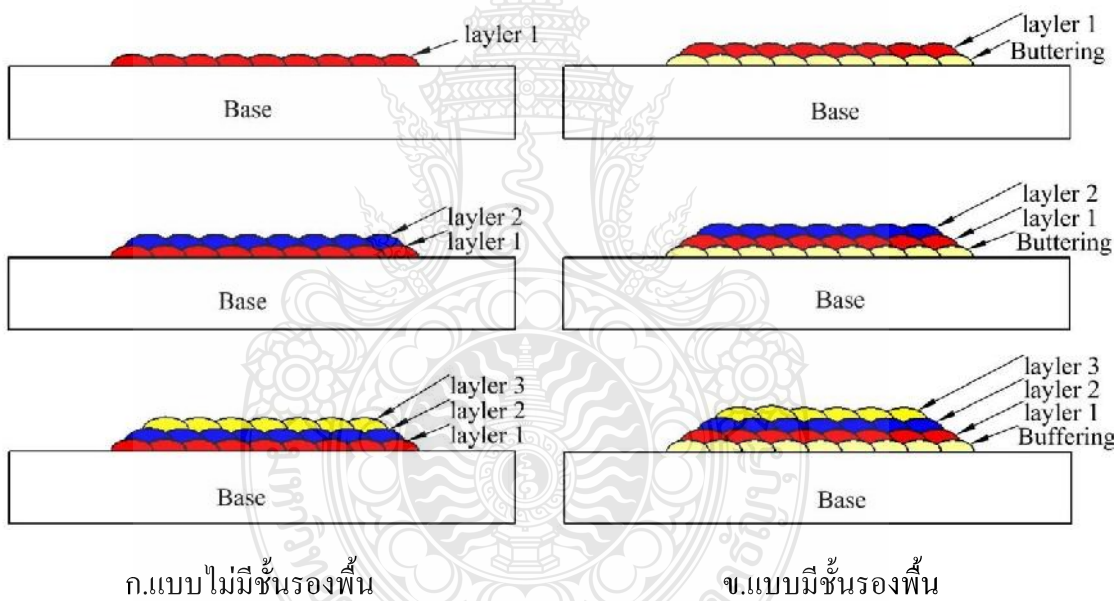
รูปที่ 3.3 ตู้อบชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

ในขั้นตอนการดำเนินการทดลองการเชื่อมพอกผิวแข็งจะทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเชื่อม การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และดำเนินการทดลอง โดยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1 พารามิเตอร์ในการทดลองการเชื่อมพอกผิวแข็ง

- 1) กระแสเชื่อมของชั้นพอกผิวแข็ง ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษากระแสในการเชื่อมที่ 80,90 และ 100 แอมแปร์
- 2) จำนวนชั้นของชั้นพอกผิวแข็ง 1 2 และ 3 ชั้น
- 3) การเชื่อมแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบมีการสร้างชั้นรองพื้น และแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น แสดงดังรูปที่ 3.4



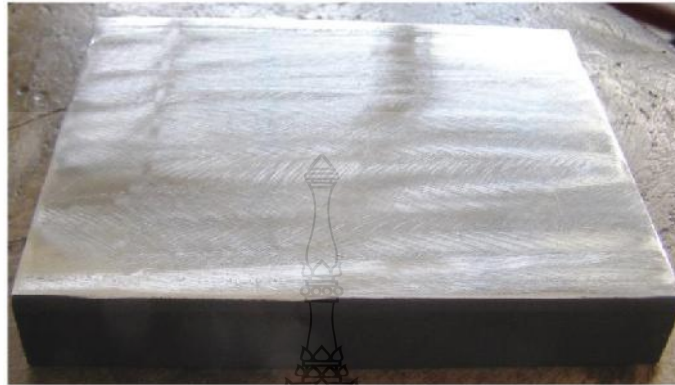
รูปที่ 3.4 การเชื่อมแบบมีรองพื้นและแบบไม่มีรองพื้น

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ชิ้นงานในการวิจัยนี้ได้ใช้เหล็ก SKD 11 หรือเหล็กกล้าเครื่องมือ โดยในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

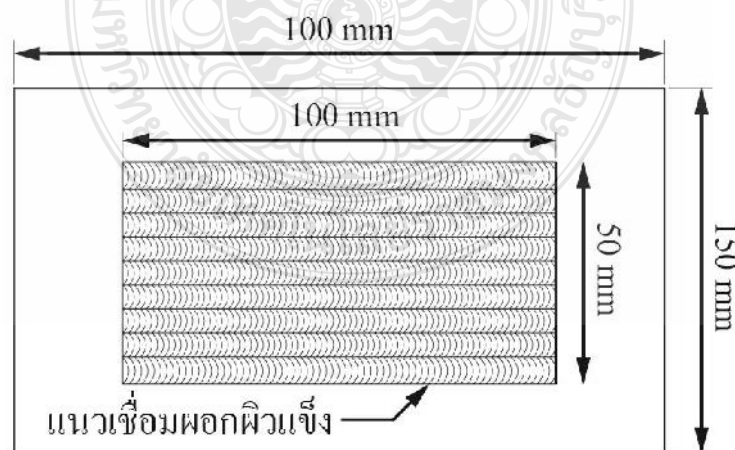
- 1) การกำจัดผิวดิบของเหล็กกล้าเครื่องมือ นำเหล็กกล้าเครื่องมือมาขัดละเอียดบริเวณผิวด้านบนด้วยเครื่องเจียรระไนมือ เพื่อกำจัดผิวดิบของเหล็กกล้า โดยใช้เครื่องเจียรระไนมือมีเครื่องหมายการค้า MAKTEC MT958 ที่มีความเร็วรอบ 11000 รอบต่อนาที และใช้ใบกระดาษทราย

ซีอนเบอร์ 180 ขนาด 4 นิ้ว ซึ่งหลังจากกำจัดผิวดิบของเหล็กกล้าเครื่องมือแล้วมีลักษณะใส วาว แสดง
ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเจียรระโนผิวดิบของแผ่นเหล็กกล้าเครื่องมือ

2) การสร้างขอบเขตบนผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ เมื่อได้ทำการเจียรระโนผิวดิบของ
เหล็กกล้าเครื่องมือตามขั้นตอนที่ 1 แล้ว ในขั้นตอนต่อไปคือ การสร้างขอบเขตบนผิวเหล็กกล้า
เครื่องมือ การทำสัญลักษณ์บนผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือ จะใช้เหล็กขีดเพื่อเป็นสัญลักษณ์ โดยให้มี
รูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนานกับแผ่นเหล็กกล้าเครื่องมือ ขนาดความกว้าง 50 mm และยาว 100 mm ดัง
แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขอบเขตในการเชื่อมพอกผิวแข็ง

3.2.3 ขั้นตอนการเชื่อม

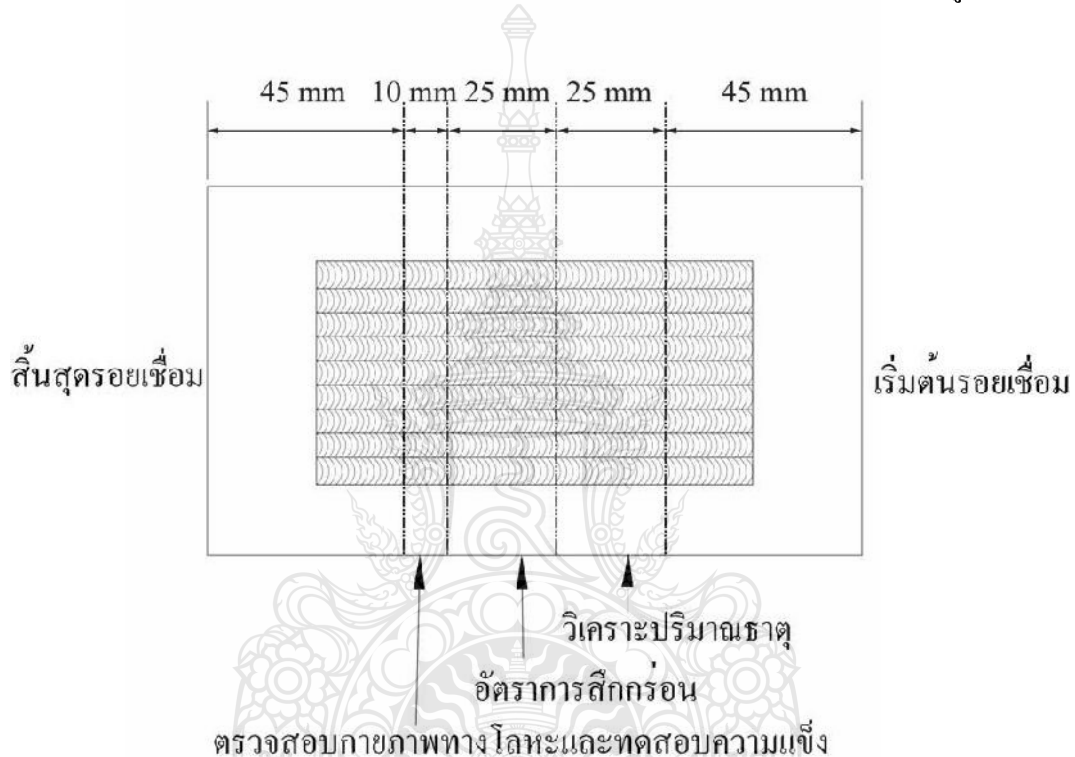
ในขั้นตอนการเชื่อมจะทำการศึกษาปริมาณกระแสเชื่อมในการสร้างชั้นรองพื้นที่ 90 แอมแปร์ และปริมาณกระแสเชื่อมในการสร้างชั้นพอกผิวแข็งที่ 80 90 และ 100 แอมแปร์ ตามลำดับ กำหนดให้มีอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน (Pre-heat temperature) ก่อนการเชื่อมที่ 250 องศาเซลเซียส การเชื่อมเป็นแบบเดินแนว (Autogeneous welding) บนผิวของแผ่นเหล็กกล้าเครื่องมือ โดยไม่สายลวดเชื่อม (Non waving) ทิศทางการเชื่อมขนานกับด้านความยาวของแผ่นเหล็กกล้าเครื่องมือ โดยในขั้นตอนการเชื่อมของการวิจัยนี้ได้อาศัยช่างเชื่อมที่ผ่านการสอบวัดฝีมือจากสถาบันพัฒนาฝีมือและแรงงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคมในระดับที่ 1 และใช้ท่าราบในการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การเชื่อมท่าราบ

3.2.4 การออกแบบการตัดชิ้นงานหลังจากการเชื่อม

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งตามขั้นตอนข้างต้น ได้นำมาทำการออกแบบการตัดชิ้นงาน เพื่อทดสอบรอยเชื่อม ซึ่งแบ่งชิ้นงานที่ผ่านเชื่อมออกเป็น 4 ส่วน โดยทำการวัดขนาดจากส่วนที่เริ่มต้นรอยเชื่อมเข้ามา 50 mm เว้นพื้นที่ไว้สำหรับชิ้นงานทดสอบอัตราการสึกกร่อนและการวิเคราะห์ส่วนผสมปริมาณธาตุจะมีขนาด 25 mm และเว้นพื้นที่สำหรับชิ้นงานตรวจสอบกายภาพทางโลหะวิทยาความแข็งของชิ้นงานที่ได้มีขนาด 10 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบ

3.2.5 กระบวนการตัดชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อม

แนวเชื่อมที่ได้ถูกตัดขวางที่กึ่งกลางความยาวของชิ้นงาน โดยการนำชิ้นงานมาตัดแบ่งชิ้นส่วนด้วยเครื่อง Wire-cut Electrical Discharge Machines เครื่องหมายการค้า

Mitsubishielectric



รูปที่ 3.9 เครื่อง Wire-cut Electrical Discharge Machines

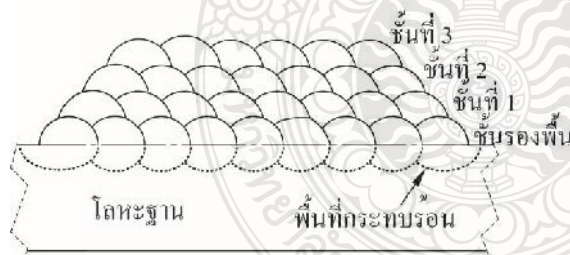
3.3 การตรวจสอบโครงสร้างกายภาพทางโลหะวิทยา

3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง ซึ่งถูกตัดชิ้นงานเพื่อทดสอบรอยเชื่อมในการทดลองข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ได้ถูกนำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพทางโลหะวิทยา โดยนำชิ้นงานมาขัดหยาบด้วยกระดาษทรายน้ำ โดยเครื่องขัด แสดงดังรูปที่ 3.10 (ก) ซึ่งใช้ความละเอียดของกระดาษทรายเริ่มต้นที่เบอร์ 80 120 150 360 400 600 800 และ 1000 ตามลำดับ จากนั้นนำไปขัดด้วยผงเพชร (Diamond) ที่มีขนาด 1 ไมครอนและล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ และทำให้แห้งโดยการเป่าด้วยลมร้อน แสดงดังรูป 3.10 (ข) หลังจากนั้นนำชิ้นงานนี้ไปกัดผิวหน้าด้วยสารละลายไนทรล 4 เปอร์เซ็นต์ ที่ประกอบด้วยกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 65 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาตร 4 เปอร์เซ็นต์ และเอทานอล 96 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 3.10 (ค) โดยการใช้สำลีจุ่มลงในสารละลาย และทาลงบนผิวหน้าชิ้นงานทิ้งไว้ 15 วินาที แสดงดังรูปที่ 3.10 (ง) จากนั้นล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดทำให้แห้งด้วยการเป่าลมร้อน เพื่อแสดงขอบเกรน รายละเอียดในเกรน และจุดบกพร่องต่างๆ ซึ่งสามารถทดสอบโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานตามพื้นที่ที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.11 (ก) ด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ แสดงดังรูป 3.11 (ข)



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการกัดชิ้นรอย



ก) พื้นที่การตรวจสอบ

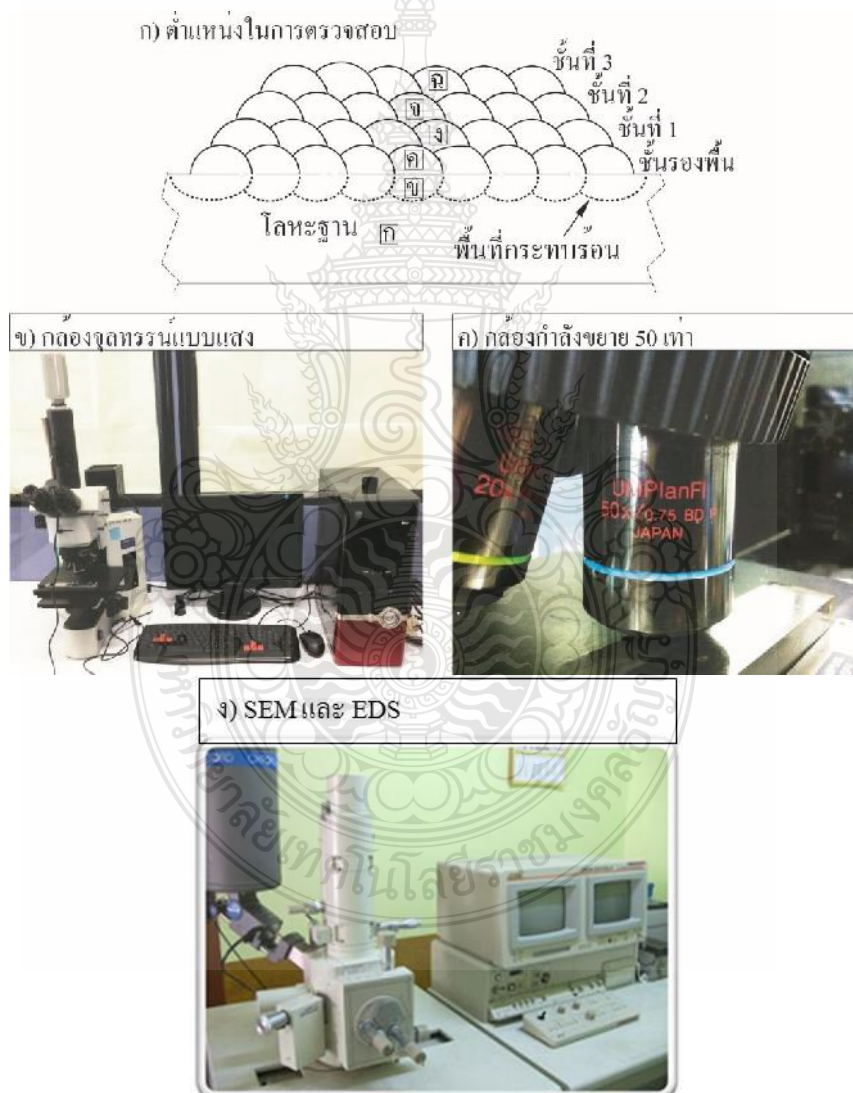
ข) กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ แบบซูม

รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ได้ถูกนำมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อแสดงเฟส ขอบเกรนและรายละเอียดบริเวณโลหะเชื่อมตามตำแหน่ง

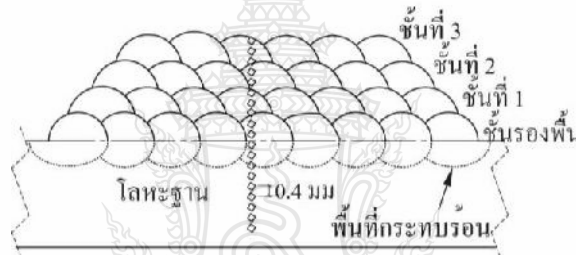
ดังต่อไปนี้ ตำแหน่ง ก คือ โลหะฐาน ข คือ บริเวณพื้นที่กระทบกระแทกร้อน ค คือ ชั้นแนวเชื่อมรองพื้น ง คือ แนวเชื่อมพอกผิวของชั้นที่ 1 จ คือ แนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 และ ฉ คือ แนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ตามที่ได้กำหนดไว้ในรูป 3.12(ก) การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคในงานวิจัยนี้ใช้ กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical micro scope) ดังแสดงในรูปที่ 3.12(ข) ที่มีกำลังขยาย 50 เท่า ดังแสดงในรูป 3.12(ค) นอกจากนี้ในการวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่โครสโคป (Scanning electron microscope; SEM) และการวิเคราะห์ธาตุด้วย Energy dispersive X-ray Spectrometer (EDS) ของชิ้นงานหลังจากการเชื่อม แสดงดังรูป 3.12 (ง)



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค

3.4 การทดสอบความแข็ง

ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ได้ถูกนำมาทดสอบซ้ำอีกครั้งตามขั้นตอนการกัดชิ้นรอย แสดงดังรูปที่ 3.10 เพื่อตรวจสอบความแข็งของแนวเชื่อม โดยทดสอบตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ในรูปที่ 3.13 (ก) ซึ่งทดสอบบริเวณหน้าตัดของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งจากตำแหน่งผิวหน้าของชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งบนสุดจนถึงโลหะฐาน (Base metal) การตรวจสอบความแข็ง ทดสอบด้วยเครื่องแบบไมโครวิกเกอร์ เครื่องหมายการค้า MATSUZAWA รุ่น T-X7-LCD ดังรูปที่ 3.12 (ข) โดยการกำหนดตำแหน่งการตรวจสอบด้วยกล้องที่มีกำลังขยาย 20 เท่า เว้นระยะระหว่างจุด 0.5 mm เมื่อกำหนดจุดการทดสอบได้แล้ว ทำการเปลี่ยนจากกล้องเป็นหัวกดทดสอบความแข็ง โดยใช้แรงกด 200 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที



ก) ตำแหน่งในการตรวจสอบ



ข) เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์

รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบความแข็ง

3.5 การทดสอบการสึกกร่อน (Wear Test)

การทดสอบการสึกกร่อน (Wear Test) เป็นการทดสอบแบบล้อยางขัดสี โดยใช้ทรายแห้งและล้อยางเป็นตัวสัมผัสกับชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ และทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียไป โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G65-94 (อ้างอิงตามมาตรฐาน) และทำการทดสอบการสึกกร่อนแบบขัดสีบริเวณเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ โดยใช้ความเร็วรอบของล้อขัดที่ 200 รอบต่อนาที อัตราการไหลของทรายที่ 300-400 กรัมต่อนาที โดยทรายที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดที่ 200-300 μm และใช้เวลาในการทดสอบที่ 30 นาทีต่อชิ้น น้ำหนักที่ใช้ในการกดชิ้นงาน 13 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบการสึกกร่อน



รูปที่ 3.15 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล

บทที่ 4

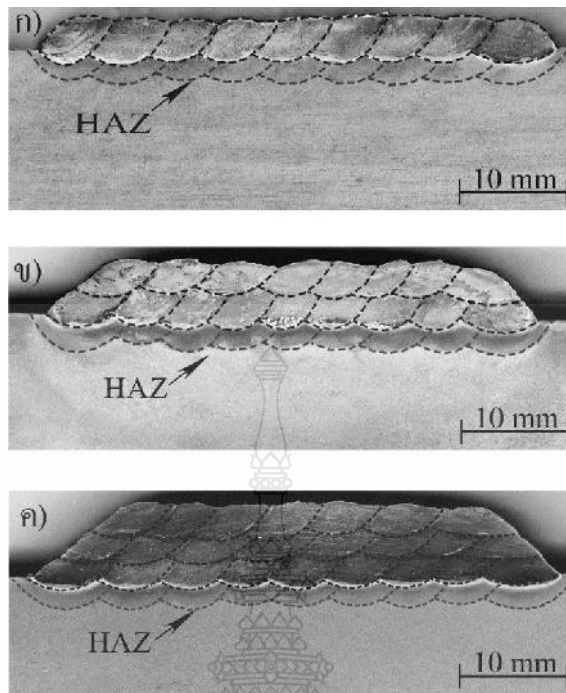
ผลการทดลองและวิเคราะห์

การศึกษาดทดลองในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนของการเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS – SKD11 ด้วยการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ และทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง จำนวน 1, 2 และ 3 ชั้น และใช้กระแสในการเชื่อมที่ 90 A

4.1 เปรียบเทียบการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น และไม่มีชั้นเชื่อมรองพื้น

4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค แบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A

ผลจากการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคของชิ้นทดสอบ แบบไม่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นการแสดงโครงสร้างมหภาคแบบไม่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น พบว่า ในรูปที่ 4.1 (ก,ข,และ ค) ได้แสดงขอบเขตการแบ่งแยกชั้น ในแต่ละชั้นค่อนข้างชัด ระหว่างชั้นโลหะฐานพื้นที่กระเทรื้อน และ จำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง ที่จำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น ในรูปที่ 4.1 (ก) ที่จำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง 2 ชั้น ในรูปที่ 4.1 (ข) และที่จำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น ในรูปที่ 4.1 (ค) ทำการตรวจสอบจากด้านล่าง ขึ้นไปด้านบนตามลำดับ ผลปรากฏว่าในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ที่ไม่ได้ทำการเชื่อมชั้นรองพื้น ที่ทำการตรวจสอบมีความสมบูรณ์ ไม่พบจุดบกพร่องใดๆในโลหะเชื่อม หรือจุดต่อระหว่างชั้นโลหะเชื่อม

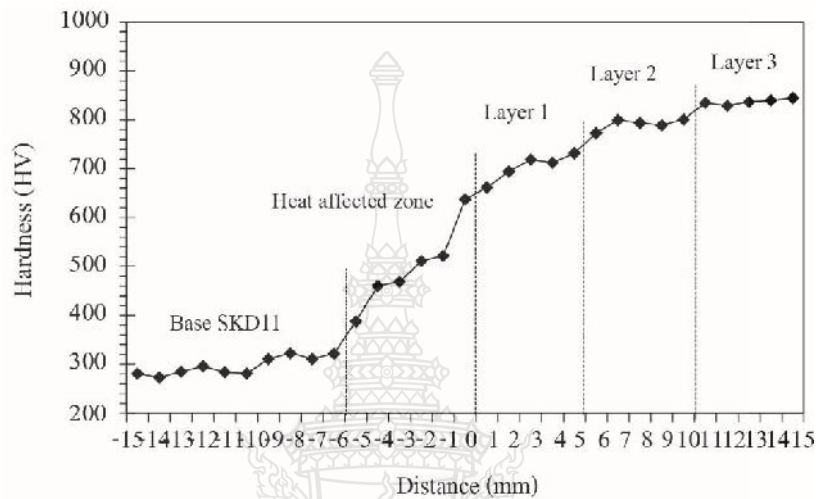


รูปที่ 4.1 โครงสร้างมหภาค แบบไม่ร่องพื้น ที่กระแส 90 A

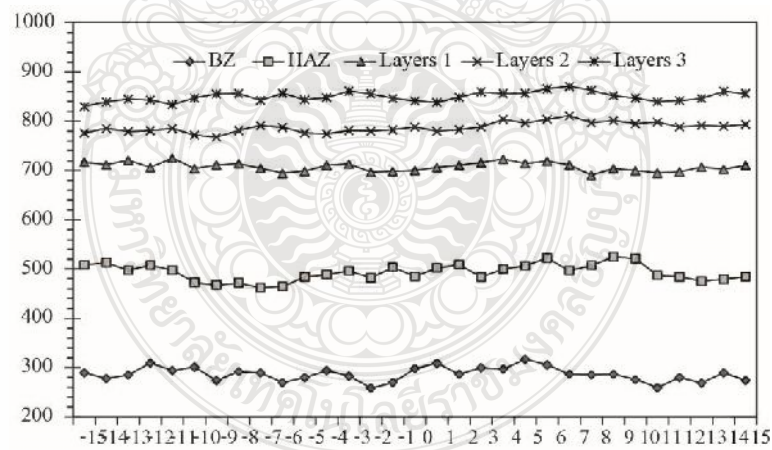
4.1.2 การตรวจสอบความแข็ง แบบไม่ร่องพื้น ที่กระแส 90 A

รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองการทดสอบค่าความแข็ง ของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง ที่แสดงโครงสร้างมหภาคดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยกำหนดให้ตำแหน่งขอบเขตระหว่างชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 และโลหะฐานมีค่าเท่ากับ 0.0 mm และ ทำการวัดค่าความแข็งลงไปโลหะฐานที่ระยะ 15 mm และขึ้นไปบนผิวพอกแข็ง ที่ระยะ 15 mm ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งของโลหะฐานในพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนมีค่าความแข็งประมาณ 300 HV และค่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อตำแหน่งที่ทำการวัดเข้าสู่พื้นที่ที่กระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อม ค่าความแข็งในพื้นที่ที่กระทบร้อนมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เมื่อตำแหน่งการทดสอบมีระยะใกล้เคียงบริเวณตำแหน่งของโลหะเชื่อมชั้นพอกผิวแข็งที่ 1 ความแข็งที่เพิ่มขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนและเฟสในพื้นที่ที่กระทบร้อนที่มีการปรับสภาพตามค่าความร้อนที่ได้รับ พบได้จากการเพิ่มความแข็งตามระยะที่เข้าใกล้ขอบเขตของโลหะพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 และแสดงค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 500 HV ที่ระยะ 0.5 mm ห่างขอบเขตของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ไม่ได้ศึกษาและรายงานถึงรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงนี้ ค่าความแข็งมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในของโลหะพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ โดยในแต่ละชั้นพอกผิวแข็ง ค่าความแข็งจะต่ำสุดที่ขอบเขตด้านล่างของชั้นโลหะพอกผิวแข็งและสูงขึ้นที่ขอบเขตด้านบนของชั้นโลหะพอกผิวแข็ง

ความแข็งสูงสุดของโลหะพอกผิวแข็ง ในแต่ละชั้นมีค่าเท่ากับ 700 790 และ 840 HV สำหรับโลหะพอกผิวแข็งชั้นที่ 1-3 ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กหล่อสีเทาด้วยลวดเชื่อมที่โลหะเหล็กเป็นธาตุหลักที่แสดงการเพิ่มความแข็งเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของชั้นพอกผิวแข็ง [18, 20]



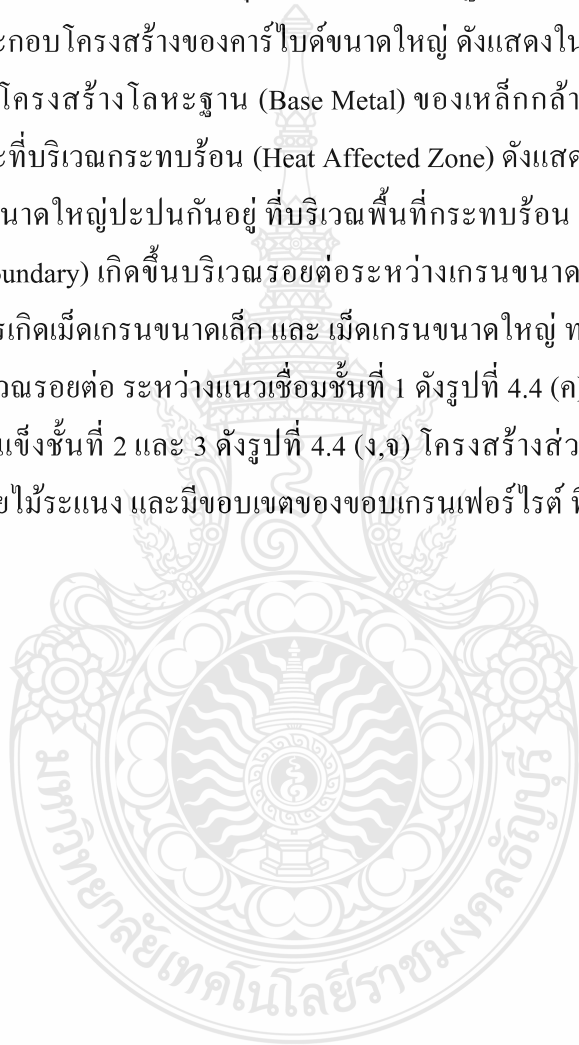
รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งของชั้นงานกวดทิศทางแนวตั้งแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A

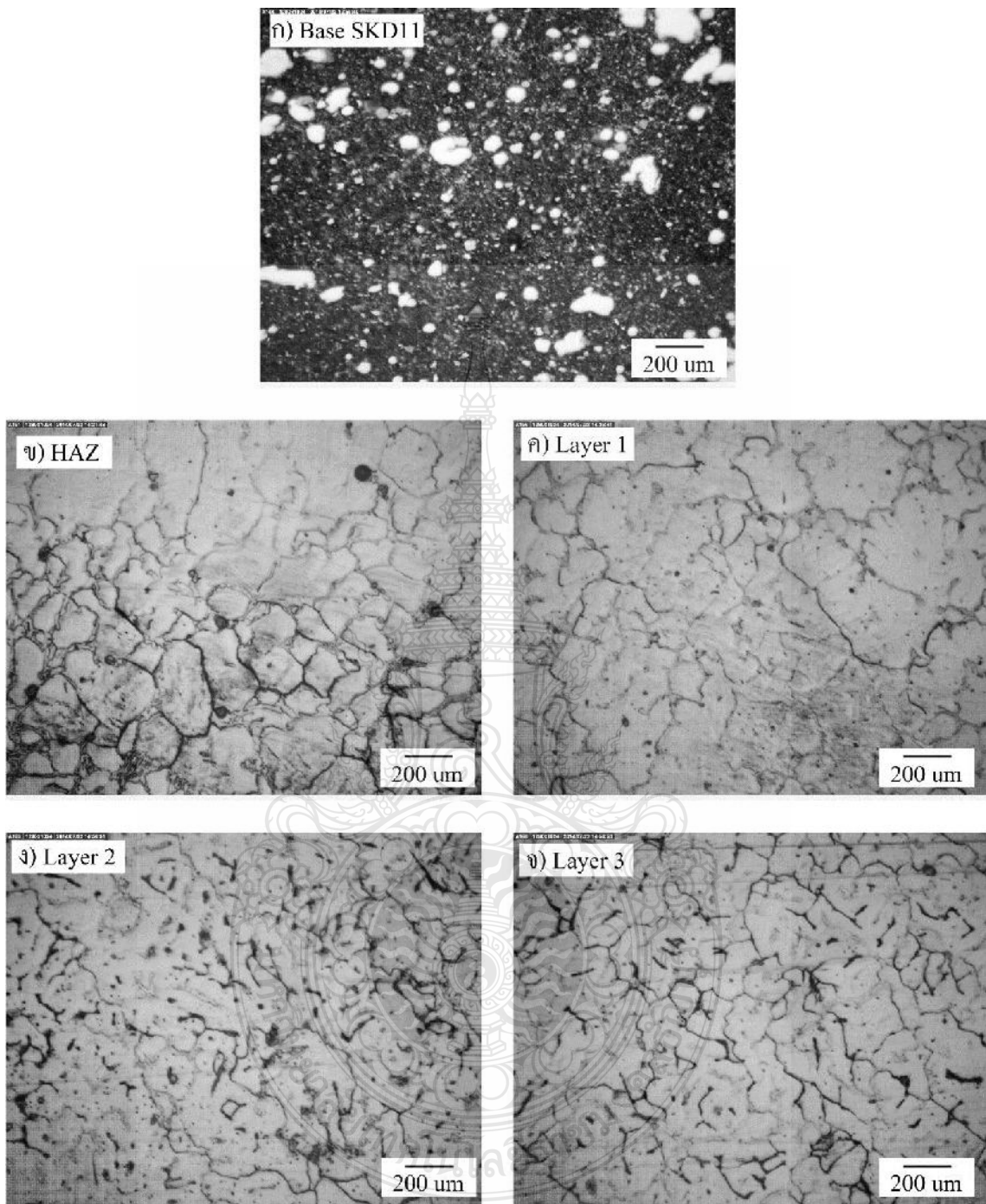


รูปที่ 4.3 ค่าความแข็งของชั้นงานกวดทิศทางแนวอนแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 90 A

4.1.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แบบไม่ร่อนพื้นที่กระแส 90 A

รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 ที่ใช้กระแสในการเชื่อมที่ 90 A แบบไม่มีชั้นร่อนพื้น โดยทำการตรวจสอบบริเวณโลหะฐาน (Base metal) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone) บริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 (Layer 1) บริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 (Layer 2) และบริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 (Layer 3) พบว่า ในรูปที่ 4.4 (ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณโลหะฐาน (Base Metal) เหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 มีส่วนประกอบโครงสร้างของคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) ซึ่งสอดคล้องกับการแสดงผลของโครงสร้างโลหะฐาน (Base Metal) ของเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D2 ของ N yasavol et al [21] ขณะที่บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) พบขนาดเกรนขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ปะปนกันอยู่ที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน แสดงดังลูกศรที่ชี้ และพบขอบเกรน (Grain Boundary) เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างเกรนขนาดเล็ก และ เกรนขนาดใหญ่ แสดงดังที่ลูกศรชี้ การเกิดเม็ดเกรนขนาดเล็ก และ เม็ดเกรนขนาดใหญ่ ทางผู้วิจัยคาดว่าจะส่งผลต่อความแข็งแรงที่สูงขึ้นบริเวณรอยต่อ ระหว่างแนวเชื่อมชั้นที่ 1 ดังรูปที่ 4.4 (ค) พบโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.4 (ง,จ) โครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยโครงสร้างรูปร่างคล้ายไม้ระแนง และมีขอบเขตของขอบเกรนเฟอร์ไรต์ ที่มีลักษณะพิเศษเป็นกลุ่มสี่เหลี่ยม

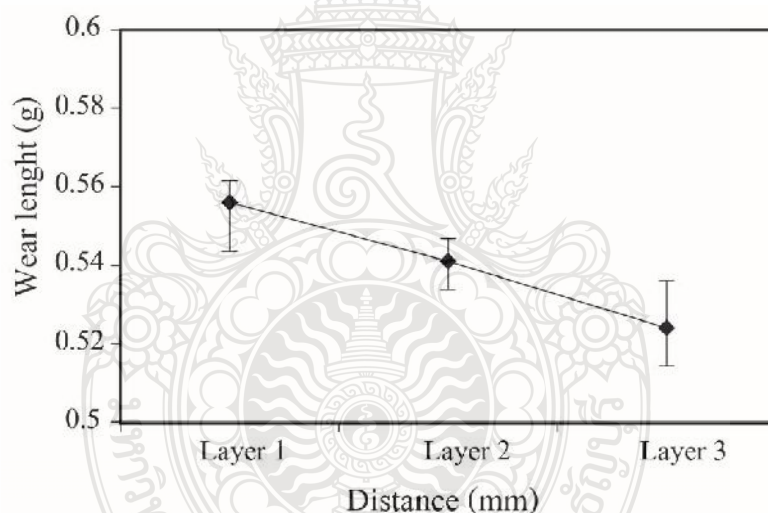




รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคแบบไม่ร่อนพื้น ที่กระแส 90 A

4.1.4 การตรวจสอบอัตราการสึกกร่อนแบบไม่ร่องพื้น ที่กระแส 90 A

ผลการตรวจสอบอัตราการสึกกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 แบบไม่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยได้ทำการตรวจสอบบริเวณชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 ชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 และ ชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 พบว่าค่าความแข็งที่แตกต่างกันตามจำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 มีความสัมพันธ์โดยตรงต่ออัตราการสึกกร่อนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และเหล็กที่มีค่าความแข็งต่ำ ที่มีจำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง เช่น แสดงค่าอัตราการสึกกร่อนสูงที่สุด ที่ 0.556 กรัม ส่วนการทดสอบอัตราการสึกกร่อนที่ชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 พบว่า มีอัตราการสึกกร่อนที่ 0.541 กรัม ซึ่งมีการสึกกร่อนน้อยกว่าอัตราการสึกกร่อนของชั้นที่ 1 และเหล็กที่มีการต้านทานการสึกกร่อนได้สูงที่สุดคือเหล็กที่มีการเชื่อมพอกผิวแข็งจำนวน 3 ชั้น แสดงค่าอัตราการสึกกร่อนต่ำที่สุดที่ 0.524 กรัม ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มค่าความแข็ง และ ลดอัตราการสึกกร่อนของผิวโลหะชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง [22]

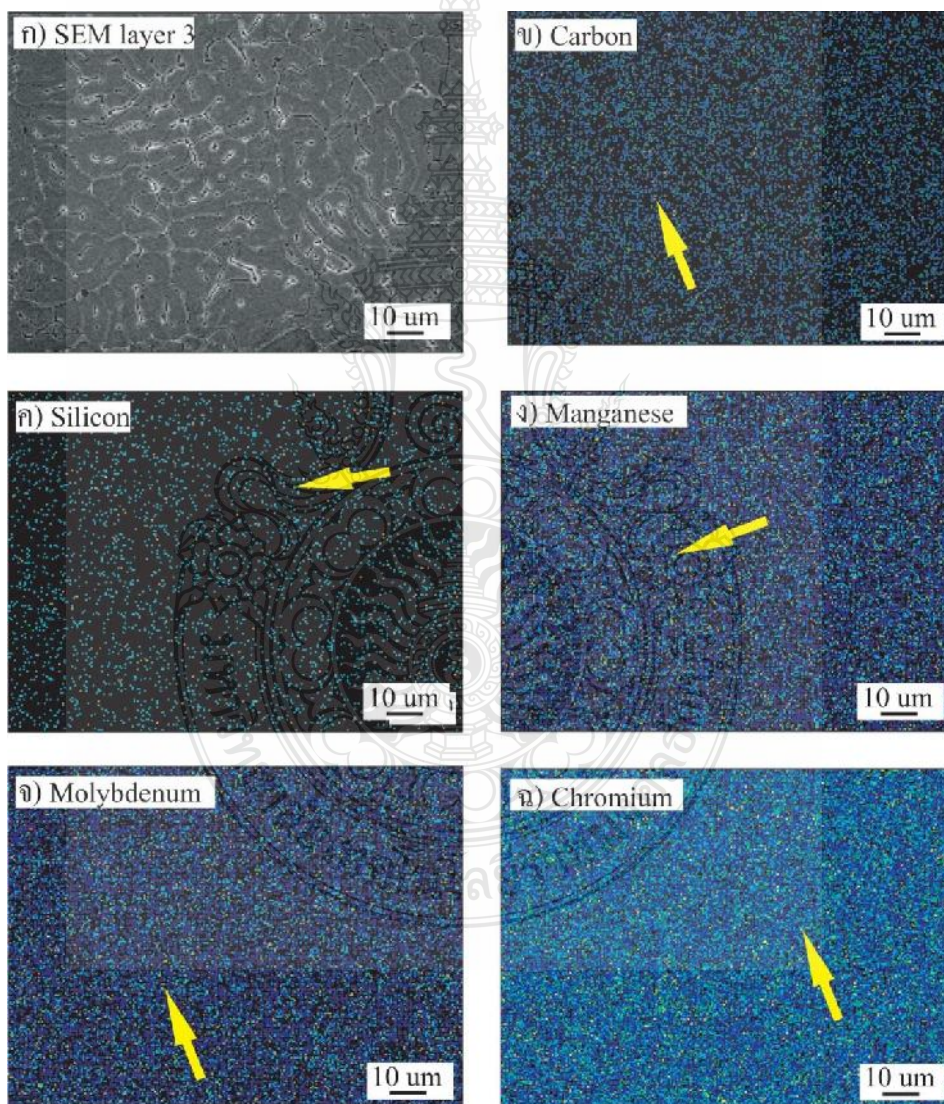


รูปที่ 4.5 อัตราการสึกกร่อนแบบไม่ร่องพื้น ที่กระแส 90 A

4.1.5 การตรวจสอบการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ และการกระจายตัวแบบไม่ร่องพื้น ที่กระแส 90 A

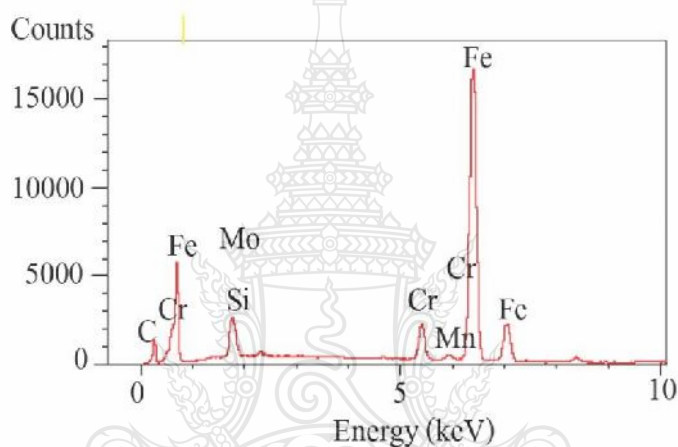
รูปที่ 4.6 ผลการตรวจสอบการวิเคราะห์ EPMA-Mapping ของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 ที่ใช้กระแสในการเชื่อมพอกผิวแข็งที่ 90 A แบบไม่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น โดยได้ทำการทดสอบบริเวณชั้นแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ที่มีอัตราการสึกกร่อนน้อยที่สุดดังรูปที่ 4.5 และในรูปที่ 4.6 (ก) คือรูปโครงสร้างเดนไดรต์ของโลหะพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 โดยถูกนำไปทำการวิเคราะห์

ส่วนผสมทางเคมีด้วยการวัดการกระจายตัวของพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry : EDS) เพื่อให้ทราบถึงส่วนผสมของธาตุต่างๆ ที่ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และ ความต้านทานการสึกกร่อนลดลง ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีพบว่า ธาตุที่พบใน โครงสร้างเดนไดรท์ประกอบด้วยธาตุสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งของชั้นผิวพอกแข็ง ดังรูปที่ 4.6 (ข) พบปริมาณธาตุคาร์บอนกระจายตัวบริเวณขอบเกรน และ พบธาตุซิลิกอนกระจายตัวอยู่บริเวณพื้นที่ที่ถูกสรชี ดังรูปที่ 4.6 (ค) และยังพบธาตุแมงกานีส โมลิบดีนัม และ โครเมียม กระจายอยู่บริเวณทั่วไป แต่มีปริมาณที่ค่อนข้างน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ง,จ และ ฉ)



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีของชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่ร่องพื้น ที่ กระแส 90 A

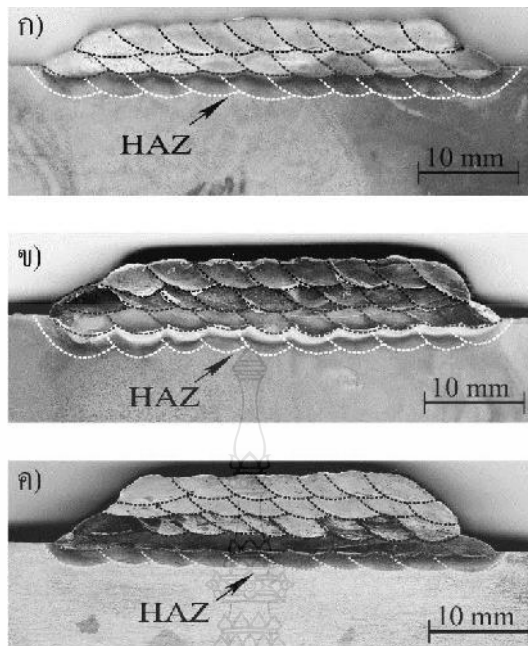
รูปที่ 4.7 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ด้วยการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry : EDS) พบว่า ธาตุหลักในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 มีจำนวน 5 ธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) และ โมลิบดีนัม (Mo) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าในตำแหน่งชั้นที่ 3 มีประมาณของธาตุ ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) และ แมงกานีส (Mn) สูง ซึ่งธาตุเหล่านี้มีอิทธิพลสูง ในการเพิ่มความแข็งแรง และทนต่อการสึกกร่อนให้กับเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง และได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srinivasan, Muthupandi et al. [20] ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า การเพิ่มขึ้นของธาตุ ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) และ แมงกานีส (Mn) ส่งผลให้ค่าความแข็งที่สูงขึ้นของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง



รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยการวัดการกระจายตัว แบบไม่รบกวนพื้น

4.1.6 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคแบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A

ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค แบบมีการเชื่อมชั้นรองพื้น ของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นการแสดงโครงสร้างมหภาคแบบมีการเชื่อมชั้นรองพื้น พบว่าในรูปที่ 4.8 (ก, ข และ ค) ได้แสดงขอบเขตการแบ่งแยกชั้นในแต่ละชั้นค่อนข้างชัดเจน ระหว่างโลหะฐาน (Base metal) พื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone) ชั้นเชื่อมรองพื้น (Buttering Layer) แนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 (Layer 1) ดังรูปที่ 4.8 (ก) แนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 (Layer 2) ดังรูปที่ 4.8 (ข) และ แนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 (Layer 3) ดังรูปที่ 4.8 (ค) ได้ทำการตรวจสอบทางด้านล่าง ขึ้นไปด้านบนตามลำดับ ผลปรากฏว่า ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ที่ได้ทำการเชื่อมชั้นรองพื้นก่อนทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง ที่ทำการตรวจสอบ มีความสมบูรณ์ ไม่พบจุดบกพร่องใดๆในเนื้อโลหะ หรือ จุดต่อระหว่างชั้นโลหะ

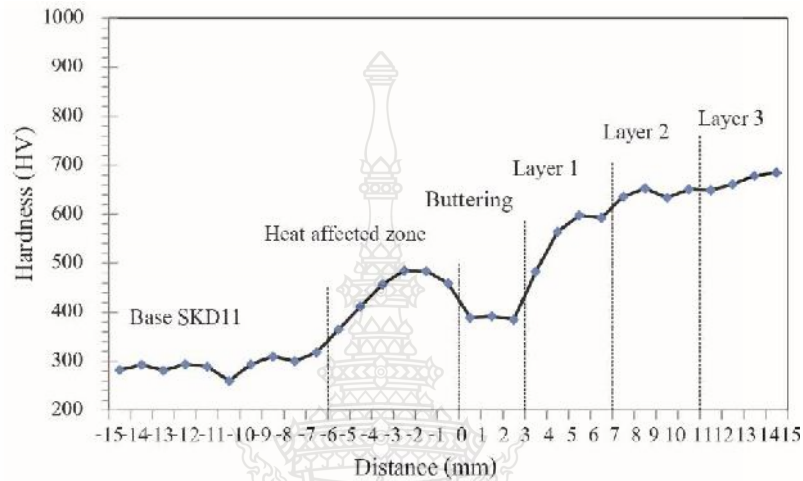


รูปที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 90 A

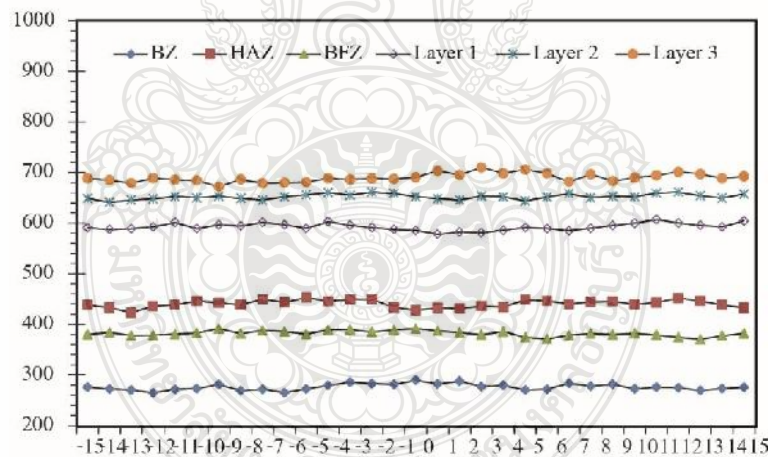
4.1.7 การตรวจสอบความแข็งแบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A

ผลการตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 แบบมีการเชื่อมชั้นรองพื้นก่อนทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ที่แสดงโครงสร้างมหภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยกำหนดขอบเขตระหว่างชั้นเชื่อมรองพื้น และ โลหะฐาน มีค่าเท่ากับ 0.0 mm และ ทำการวัดค่าความแข็งลงไปสู่โลหะฐานที่ระยะ 15 mm และขึ้นไปบนผิวโลหะที่เชื่อมพอกแข็งที่ระยะ 15 mm ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งของโลหะฐานในพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยที่ 300 HV และค่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อตำแหน่งที่ทำการวัดเข้าสู่พื้นที่ที่กระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อม ค่าความแข็งในพื้นที่กระทบร้อนมีแนวโน้มที่สูงขึ้น โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 460 HV เมื่อตำแหน่งการทดสอบมีระยะใกล้เคียงกับตำแหน่งของโลหะเชื่อมรองพื้น พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดต่ำลงที่บริเวณเนื้อเชื่อมรองพื้น ซึ่งใกล้เคียงกับโลหะฐานเฉลี่ยที่ 390 HV และค่าความแข็งก็ได้เพิ่มสูงขึ้นทันที เมื่อถึงแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 ค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 590 HV ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Winarto and Priadi [23] ได้กล่าวไว้ว่า ค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันนั้น เกิดจากส่วนผสมทางเคมี ที่มีผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมพอกผิวแข็งมีค่าสูงกว่าส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมรองพื้น อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในโลหะพอกผิวแข็งชั้นที่ 1,2 และ 3 ตามลำดับ โดยในแต่ละชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง ค่าความแข็งจะต่ำที่สุดที่ขอบเขตด้านล่างของชั้นเชื่อม

โลหะพอกผิวแข็ง และ สูงขึ้นที่บริเวณขอบเขตด้านบนของโลหะพอกผิวแข็ง ค่าความแข็งสูงสุดของโลหะพอกผิวแข็งในแต่ละชั้นมีค่าเท่ากับ 590, 640 และ 680 HV สำหรับโลหะพอกผิวแข็งชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ผลการทดลองได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chatterjee and Pal [18] ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าการเชื่อมพอกผิวเหล็กหล่อสีเทาด้วยลวดเชื่อมที่โลหะเป็นธาตุหลักที่แสดงการเพิ่มความแข็งเกิดขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของชั้นพอกผิวแข็ง



รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งของชั้นงานกตทิศทางแนวตั้งแบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A

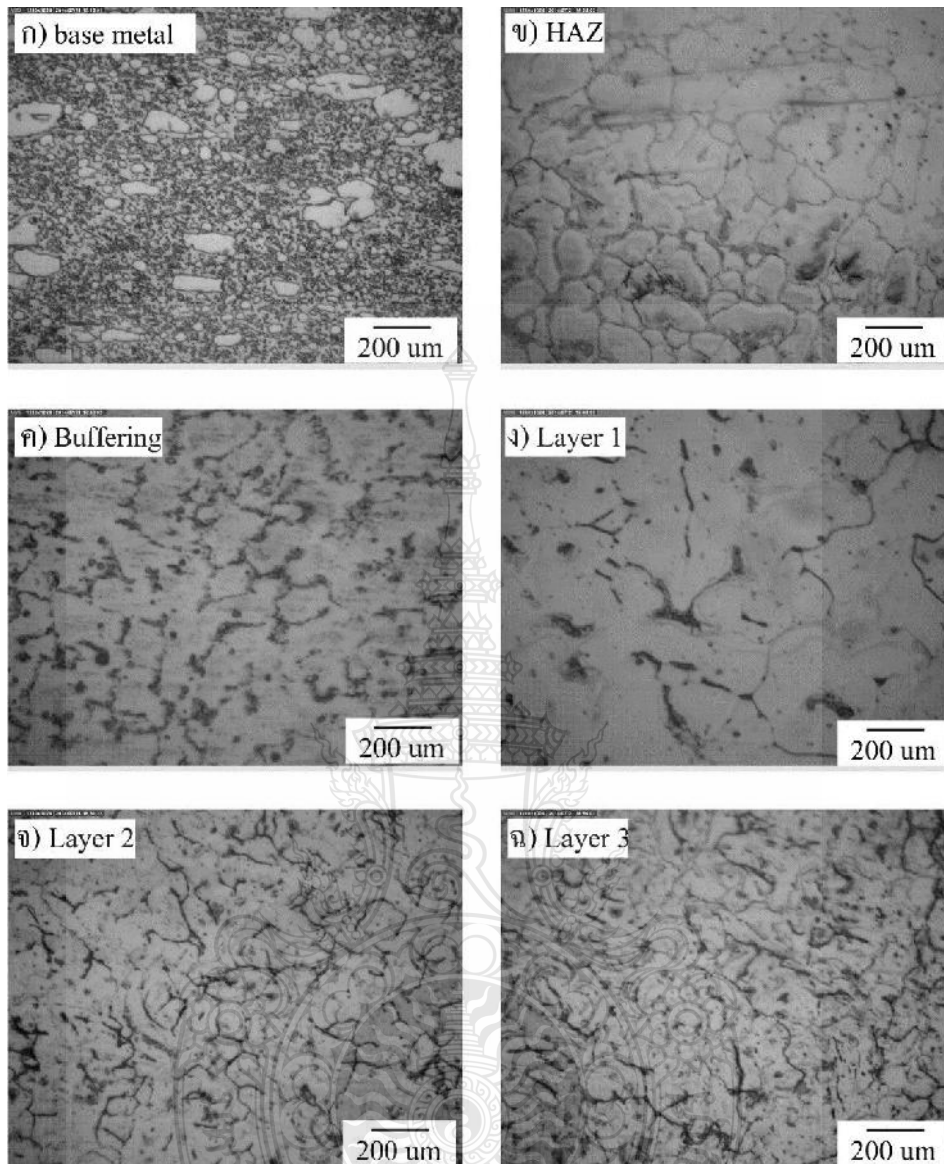


รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งของชั้นงานกตทิศทางแนวนอนแบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A

4.1.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A

รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 ที่ใช้กระแสในการเชื่อมที่ 90 A แบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น โดยทำการตรวจสอบบริเวณ โลหะฐาน (Base Metal) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affected Zone) บริเวณชั้นเชื่อมรองพื้น (Buttering Layer) บริเวณชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 (Layer 1) บริเวณชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 (Layer 2) และ บริเวณชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 (Layer 3) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐาน เหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 รูปที่ 4.11 (ก) มีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างจุลภาคการเชื่อมพอกผิว แข็งแบบไม่รองพื้น ดังรูปที่ 4.4 (ก) ส่วนรูปที่ 4.11 (ข) เป็นโครงสร้างจุลภาค บริเวณพื้นที่กระทบ ร้อน (HAZ) พบว่า เม็ดเกรนมีขนาดเล็ก และใหญ่ กระจายตัวอยู่อย่างเป็นระเบียบ รูปที่ 4.11 (ค) เป็น โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมชั้นรองพื้น พบเม็ดเกรนมีลักษณะเรียวย มีสีขาวกระจายตัวอยู่ใน โครงสร้างพื้นที่ที่เป็นสีดำ ในปริมาณที่มากกว่าบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ส่วนรูปที่ 4.11 (ง) เป็นลักษณะของโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 (Layer 1) มีลักษณะเป็นเดน ไดรต์ รูปที่ 4.11 (จ) เป็นโครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 (Layer 2) พบว่าเม็ด เกรนมีความละเอียดมากขึ้นและเดนไดรต์ก็มีเพิ่มมากขึ้น และรูปที่ 4.11 (ฉ) พบว่าโครงสร้างจุลภาค บริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยโครงสร้างรูปร่างคล้ายกับไม้ระแนง และ มีขอบเขตของเกรนเฟอร์ไรต์และเดนไดรต์ที่มีลักษณะพิเศษเป็นกลุ่มสี่เหลี่ยม [21]



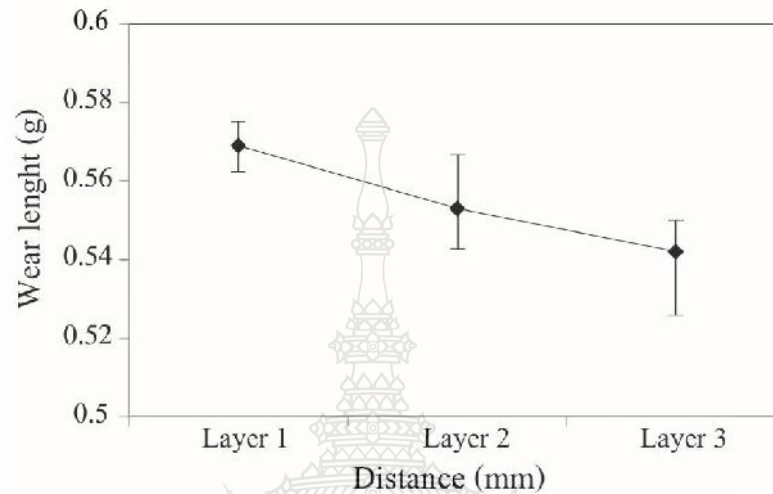


รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 90 A

4.1.9 การตรวจสอบอัตราการสึกกร่อนแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 90 A

รูปที่ 4.12 ผลการตรวจสอบอัตราการสึกกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 แบบมีการเชื่อมชั้นรองพื้น ก่อนทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยได้ทำการตรวจสอบที่บริเวณชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 ชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 และชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 พบว่าอัตราการสึกกร่อนที่มากที่สุดคือ 0.569 กรัม คือชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 ส่วนอัตราทดสอบอัตราการสึกกร่อนของชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 พบว่ามีอัตราการสึกกร่อนที่ 0.553 กรัม และชั้นที่ทนต่อการสึกกร่อนได้มากที่สุดคือ ชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ซึ่งมีอัตราการสึกกร่อนที่ 0.542 กรัม เมื่อนำไป

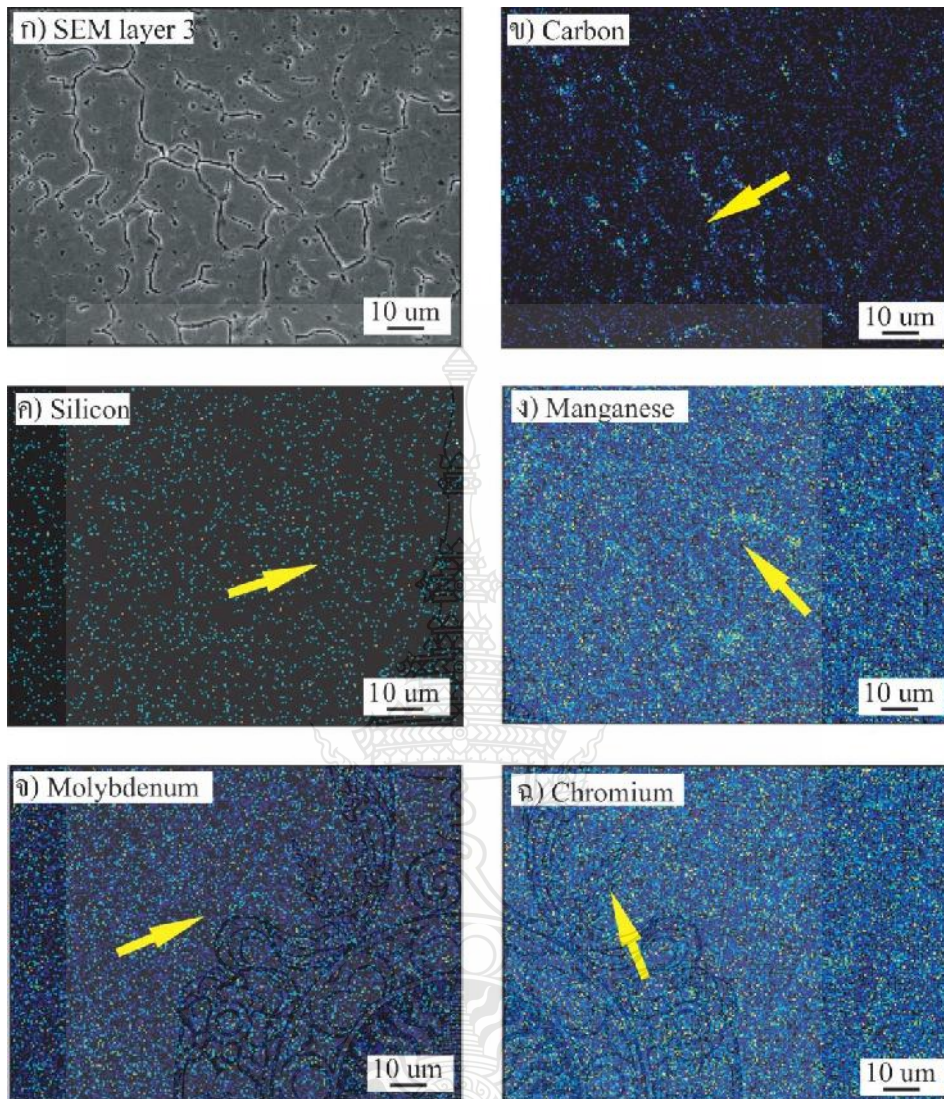
เปรียบเทียบกับทดสอบการสึกกร่อนที่กระแสเดียวกัน แบบไม่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น ดังรูปที่ 4.5 พบว่าการเชื่อมแบบไม่มีการเชื่อมชั้นรองพื้นสามารถทนต่อการสึกกร่อนได้ดีกว่าแบบมีการเชื่อมรองพื้น



รูปที่ 4.12 อัตราการสึกกร่อนแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 90 A

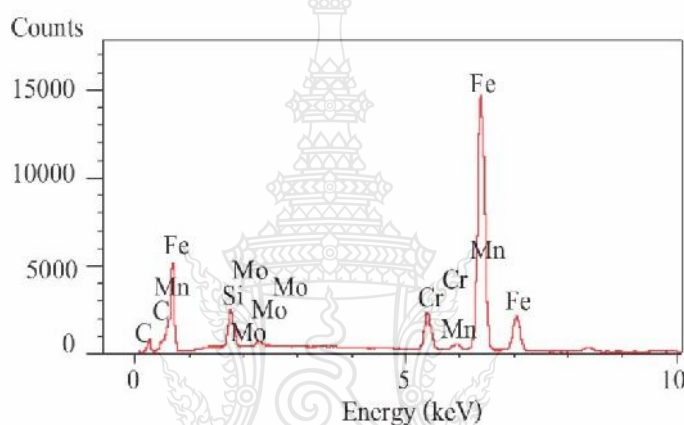
4.1.10 การตรวจสอบการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ และการกระจายตัวแบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A

รูปที่ 4.13 ผลการตรวจสอบการวิเคราะห์ EPMA-Mapping บริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 โดยใช้กระแสไฟที่ 90 A แบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น พบว่า บริเวณชั้นแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 มีค่าอัตราการสึกกร่อนที่ต่ำ ดังในรูปที่ 4.12 พบปริมาณธาตุคาร์บอนกระจายตัวอยู่บริเวณขอบเกรน ดังรูปที่ 4.13 (ข) และพบธาตุซิลิกอนกระจายตัวอยู่บริเวณพื้นที่ที่ลูกศรชี้ ดังรูปที่ 4.13 (ค) และนี้ยังพบธาตุ แมงกานีส โมลิบดีนัม และ โครเมียม กระจายอยู่บริเวณทั่วไป แต่มีปริมาณค่อนข้างน้อย ดังรูปที่ 4.13 (ง จ และ ฉ)



รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมีของชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบมีชั้นรองพื้น ที่ กระแส 90 A

รูปที่ 4.14 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 แบบมีการเชื่อมชั้นรองพื้น ด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลัง (Energy Dispersive Spectrometry : EDS) พบว่า ธาตุหลักในแนวเชื่อมชั้นที่ 3 มีจำนวน 5 ธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (C) ซิลิกอน(Si) โครเมียม(Cr) แมงกานีส(Mn) และ โมลิบดีนัม(Mo) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า ในตำแหน่งชั้นที่ 3 มีปริมาณของธาตุ ซิลิกอน(Si) โครเมียม(Cr) และ แมงกานีส(Mn) อยู่สูง ซึ่งธาตุเหล่านี้มีอิทธิพลสูง ในการเพิ่มค่าความแข็งแรงให้กับเนื้อเชื่อม และได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srinivasan et al. [24] ที่ได้กล่าวไว้ว่า การเพิ่มขึ้นของธาตุ ซิลิกอน (Si) โครเมียม (Cr) และ แมงกานีส (Mn) ส่งผลต่อความแข็งที่สูงขึ้นของแนวเชื่อม

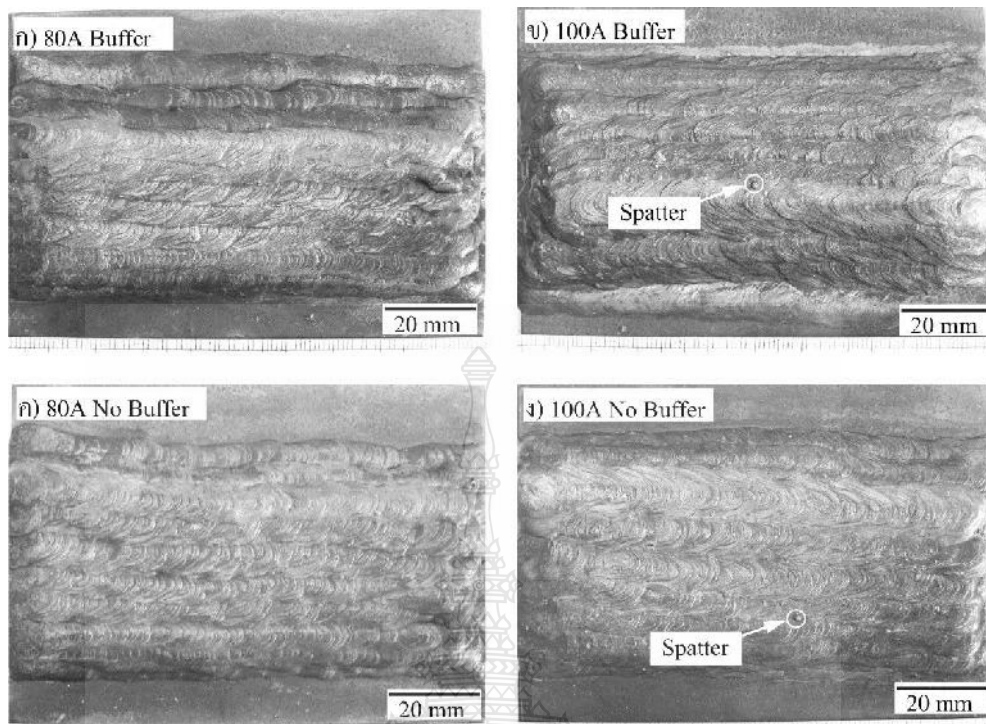


รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยการวัดการกระจายตัว แบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 90 A

4.2 เปรียบเทียบกระแสเชื่อม ที่มีผลต่อการเชื่อมพอกผิวแข็ง แบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น และไม่มีชั้นเชื่อมรองพื้น

4.2.1 การตรวจสอบผิวหน้าแนวเชื่อม

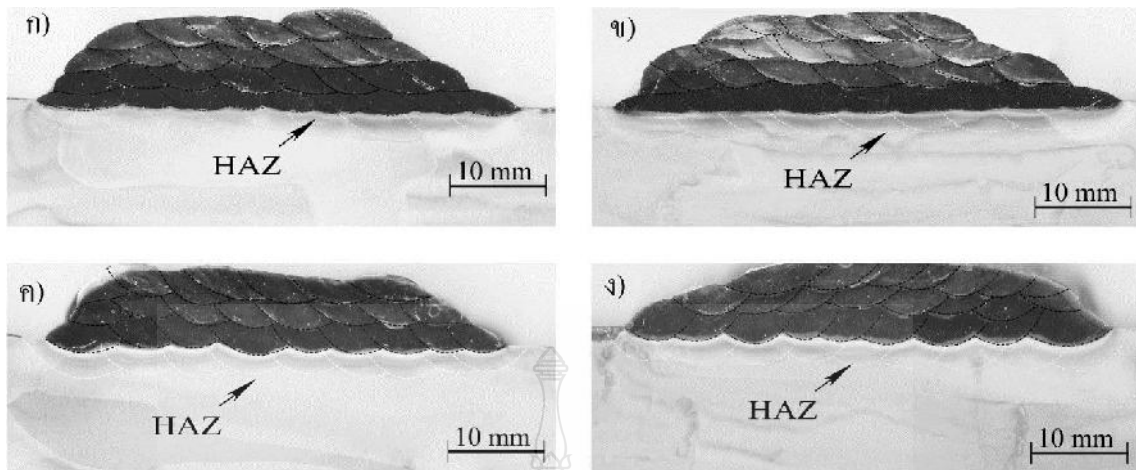
การตรวจสอบผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 แบบไม่มี การเชื่อมรองพื้น และ แบบมีการเชื่อมชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า ผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 80 A ดังรูปที่ 4.15 (ก) ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ แต่ผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่กระแส 100 A ดังรูปที่ 4.15 (ข) พบเม็ดโลหะในแนวเชื่อม แสดงดังที่ลูกศรชี้ และที่ผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีชั้นรองพื้น ที่กระแส 80 A ดังรูปที่ 4.15 (ค) ก็ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ ส่วนผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง แบบไม่มีชั้นรองพื้น ที่กระแส 100 A ดังรูปที่ 4.15 (ง) ก็พบว่ามีเม็ดโลหะเกิดขึ้นในแนวเชื่อม ดังที่ลูกศรชี้ ซึ่งเหมือนกับที่พบในแนวเชื่อมแบบรองพื้น ที่กระแส 100 A ดังรูปที่ 4.15 (ข)



รูปที่ 4.15 ผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบรองพื้นและแบบไม่รองพื้นที่กระแส 80 และ 100 A

4.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

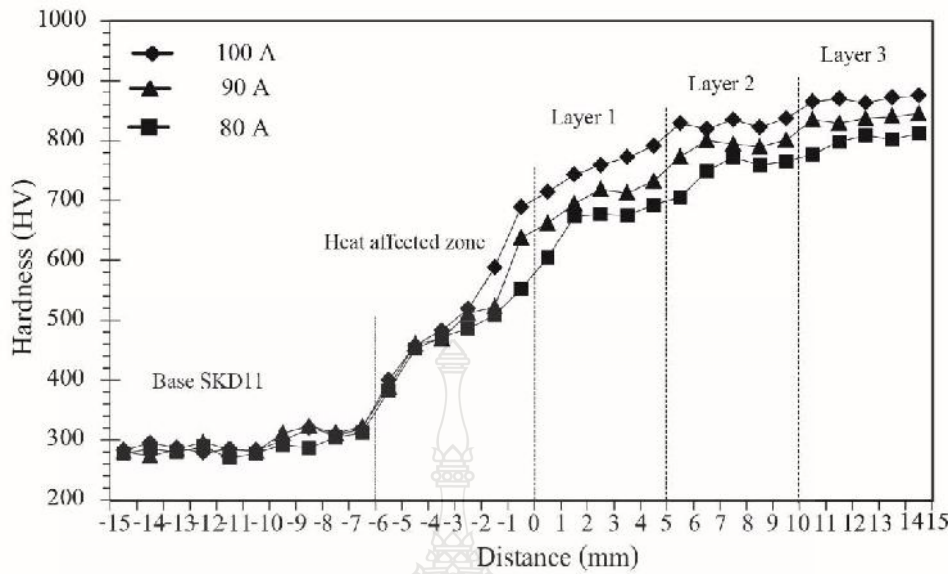
ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 ที่ใช้กระแสในการเชื่อมพอกผิวแข็งที่ 80 และ 100 A ดังแสดงในรูปที่ 4.16 แสดงโครงสร้างมหภาคของการเชื่อมพอกผิวแข็ง ทั้งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นก่อนทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง และ แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นในแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง แบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่กระแส 80 และ 100 A ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ก,ข) ได้ทำการตรวจสอบทางด้านล่างขึ้นไปด้านบน พบว่าโลหะเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่พบจุดบกพร่องใดๆ ในโลหะเชื่อม หรือ ชั้นแนวเชื่อม และได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคแบบไม่มีการเชื่อมรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ค,ง)



รูปที่ 4.16 โครงสร้างมหภาค ที่กระแส 80 และ 100 A

4.2.3 การตรวจสอบความแข็ง

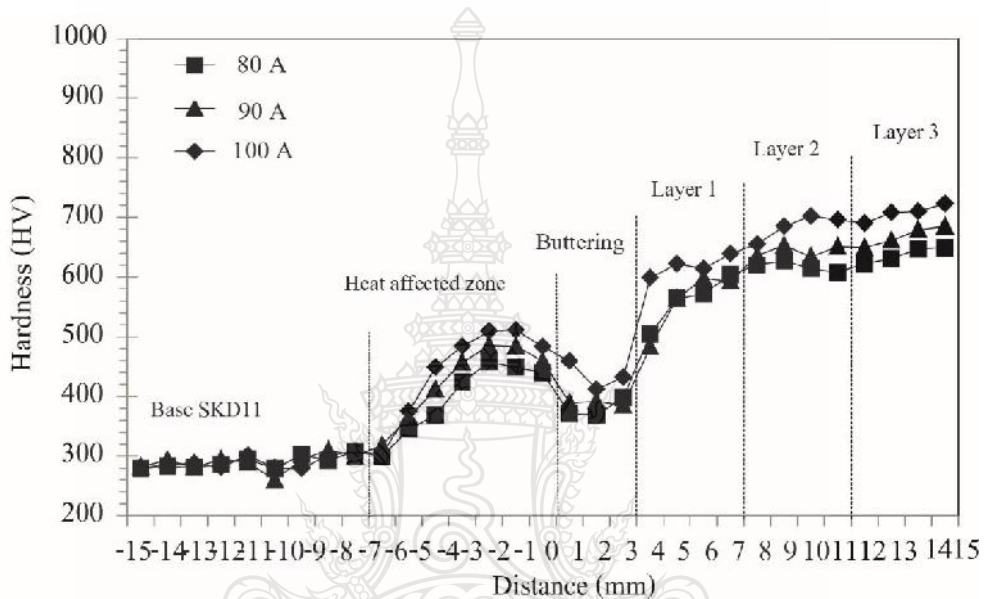
ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 แบบไม่มีการเชื่อมรองพื้น กระแสที่ใช้ในการเชื่อมที่ 80 และ 100 A ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า ค่าความแข็งบริเวณโลหะฐานในพื้นที่ ที่ไม่ได้รับผลกระทบที่มีค่าความร้อน บริเวณที่ตำแหน่ง -15 ไปถึงตำแหน่ง -6 มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 300 HV และค่าความแข็งก็มีแนวโน้มมีค่าเพิ่มสูง ขึ้นเมื่อตำแหน่งที่ทำการวัดเข้าสู่พื้นที่ที่กระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อมซึ่งจะอยู่บริเวณตำแหน่ง -5 ไปถึงตำแหน่ง 0 เมื่อตำแหน่งการทดสอบมีระยะใกล้เคียงบริเวณตำแหน่งของโลหะเชื่อมชั้นพอกผิวแข็ง ค่าความแข็งก็มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง สังเกตได้ที่จุดทดสอบที่บริเวณตำแหน่ง 1 ถึง 15 ซึ่งค่าความแข็งที่ใช้กระแสเชื่อมที่ 80 A แต่ละชั้นมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 670, 750 และ 800 HV และค่าความแข็งที่ใช้กระแสเชื่อมที่ 100 A แต่ละชั้นมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 750, 830 และ 870 HV ตามลำดับ ซึ่งได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Winarto and Dedi Priadi [23] ซึ่งได้อธิบายไว้ว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นนั้น เกิดความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีที่เกิดขึ้นของการแปรระดับความเจือจาง (Dilution) ในจำนวนชั้นเชื่อม



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งของชิ้นงานแบบไม่รองพื้น ที่กระแส 80 และ 100 A

ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 แบบมีการเชื่อมรองพื้น กระแสที่ใช้ในการเชื่อมที่ 80 และ 100 A ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า ค่าความแข็งของโลหะฐาน ในพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบที่มีค่าความร้อน ที่ตำแหน่ง -15 ถึง ตำแหน่ง -6 มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 300 HV และค่าความแข็งก็มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อตำแหน่งที่ทำกรวดเข้าสู่พื้นที่กระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อม ค่าความแข็งในพื้นที่กระทบร้อนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในตำแหน่งที่ -5 ถึง ตำแหน่ง 0 โดยกระแสที่ใช้เชื่อมที่ 80 A มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 420 HV และกระแสที่ใช้เชื่อมที่ 100 A มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 470 HV ค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งนี้คาดว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค โดยมีความร้อนเกิดขึ้นในพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone) ลักษณะของเกรนในพื้นที่นี้มีความละเอียดกว่าพื้นที่บริเวณ โลหะฐาน สามารถทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นได้ และเมื่อตำแหน่งของการทดสอบมีระยะใกล้เคียงกับตำแหน่งของโลหะเชื่อมรองพื้น พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดต่ำลง ที่บริเวณเนื้อเชื่อมของชิ้นรองพื้น ที่ตำแหน่ง 0 ถึง ตำแหน่ง 4 ซึ่งที่กระแสเชื่อมที่ 80 A มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 380 HV และที่กระแสเชื่อมที่ 100 A มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 440 HV และค่าความแข็งก็ได้เพิ่มสูงขึ้นทันใด เมื่อถึงแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 ที่ตำแหน่ง 4 ถึง ตำแหน่ง 8 ที่ใช้กระแสเชื่อมที่ 80 A มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 590 HV และที่ใช้กระแสเชื่อมที่ 100 A มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 630 HV ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Winarto and Priadi [23] ได้กล่าวไว้ว่า ค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมทางเคมีที่มีผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมพอกผิวแข็งมีค่าสูงกว่าส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมรองพื้น อย่างไรก็ตาม

ก็ตาม ค่าความแข็งมีแนวโน้มที่สูงขึ้นใน โลหะพอกผิวแข็งชั้นที่ 1,2 และ 3 ซึ่งชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งในแต่ละชั้นที่ใช้กระแสเชื่อมที่ 80 A มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 590, 620 และ 640 HV และที่ใช้กระแสเชื่อมที่ 100 A มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 630, 680 และ 710 HV ตามลำดับ ซึ่งได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chatterjee and Pal [20] ได้กล่าวไว้ว่า การเชื่อมพอกผิวเหล็กหล่อสีเทาด้วยลวดเชื่อมที่โลหะเป็นธาตุหลักที่แสดงการเพิ่มความแข็ง โดยการเพิ่มขึ้นของชั้นพอกผิวแข็ง



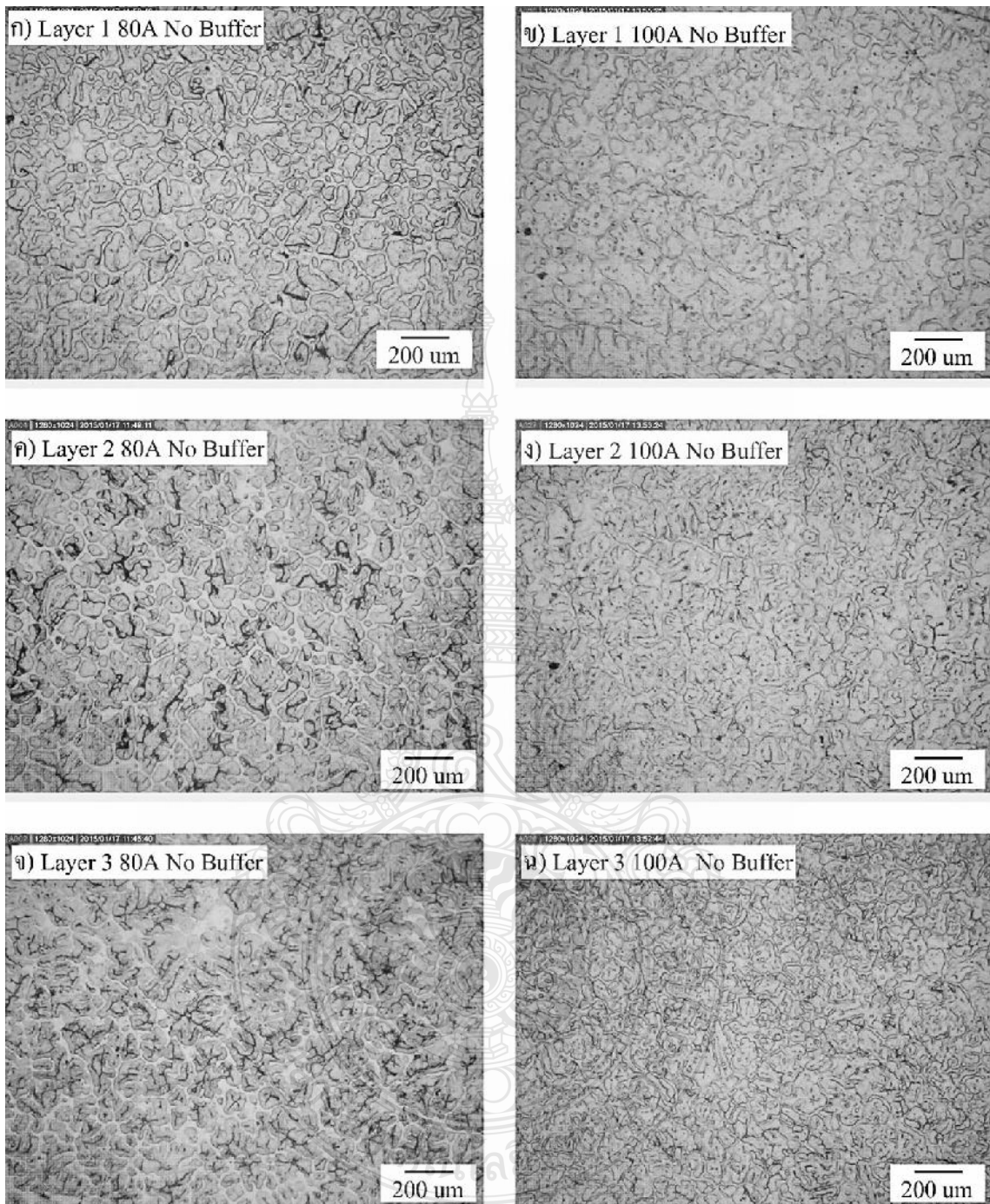
รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของชิ้นงานแบบรองพื้น ที่กระแส 80 และ 100 A

4.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แบบไม่รองพื้น

รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 ที่ใช้กระแสในการเชื่อมที่ 80 และ 100 A แบบไม่มีชั้นรองพื้น โดยทำการเปรียบเทียบการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ก,ข) พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 (Layer 1) ที่กระแส 80 A รูปที่ 4.19 (ก) พบว่า เกรนมีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปนกันอยู่ ส่วนในรูปที่ 4.19 (ข) พบว่าเม็ดเกรนมีความละเอียดมากกว่า รูปที่ 4.19 (ก) เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณผิวพอกแข็งชั้นที่ 2 (Layer 2) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ค,ง) พบว่าแนวโลหะชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง มีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น เคนไครท์มีการก่อตัวมีรูปแบบที่สามารถตรวจสอบได้ชัดเจนมากขึ้น ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 ทั้ง ค และ ง และในรูปที่ 4.19 (จ,ฉ) ที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่า ที่ระยะห่างระหว่างเคนไครท์ทุติยภูมิ (Secondary dendrite arm spacing :

SDAS) มีค่าลดลง การลดลงของค่า SDAS นี้ อีกนัยยะหนึ่งสามารถแปลความหมายให้ทราบถึงการเพิ่มขึ้นของความแข็ง และความแข็งแรงของโลหะได้ Askeland and Phule [25] เมื่อเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 โครงสร้างเค้นไครท์ในชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 คล้ายได้รับผลกระทบความร้อนของการเชื่อมชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 และส่งผลทำให้ SDAS ของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (จ,ฉ)



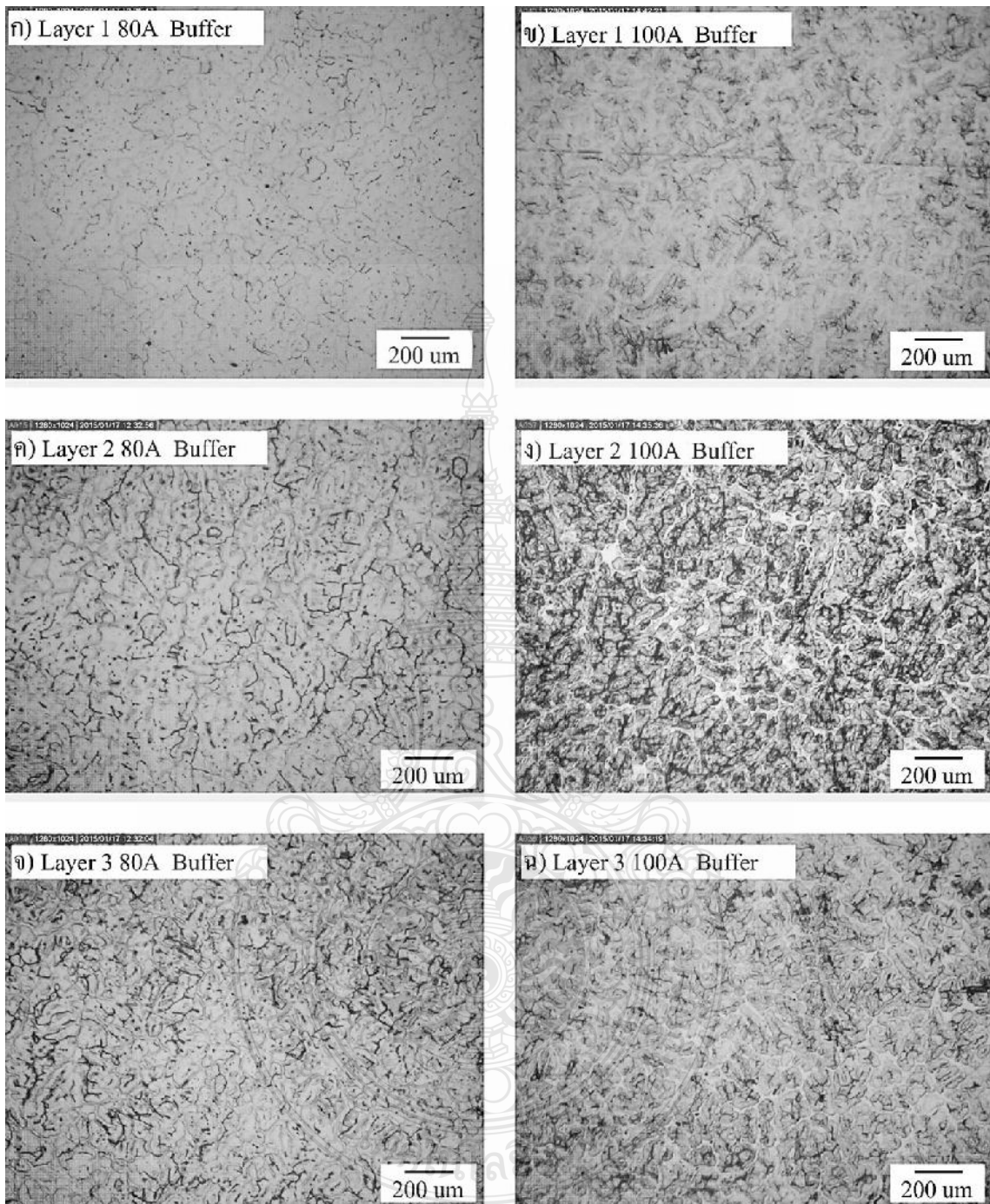


รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาค แบบไม่รองพื้น ที่กระแส 80 และ 100 A

4.2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แบบมีชั้นรองพื้น

รูปที่ 4.20 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 ที่ใช้กระแสน้ำเชื่อมที่ 80 และ 100 A แบบมีการเชื่อมชั้นรองพื้นก่อนทำการเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยทำการตรวจสอบที่บริเวณชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 (Layer 1) ชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 (Layer 2) และชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 (Layer 3) พบว่าโครงสร้างจุลภาคการเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีชั้นเชื่อมรองพื้น ที่บริเวณชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 (Layer 1) ดังรูปที่ 4.20 (ก,ข) พบว่าเม็ดเกรนมีลักษณะเรียวยาว มีสีขาวกระจายอยู่ในพื้นที่ ส่วนรูปที่ 4.20 (ค,ง) เป็นบริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 (Layer 2) พบว่าโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมมีลักษณะเกรนละเอียด และบริเวณขอบเกรนปรากฏเฟสสีขาวมีขนาดเล็ก และยาวแทรกตัวอยู่ตามขอบเกรน และรูปที่ 4.20 (จ,ฉ) แสดงโครงสร้างบริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 (Layer 3) พบว่าบริเวณขอบเกรนปรากฏเฟสสีขาวขนาดใหญ่และกว้างขึ้นแทรกตัวอยู่ตามขอบเกรน คาดว่าเป็นเฟสของโครเมียมคาร์ไบด์ [26] เป็นผลของปริมาณส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม มีส่วนผสมของธาตุโครเมียม (Cr) เป็นธาตุหลัก

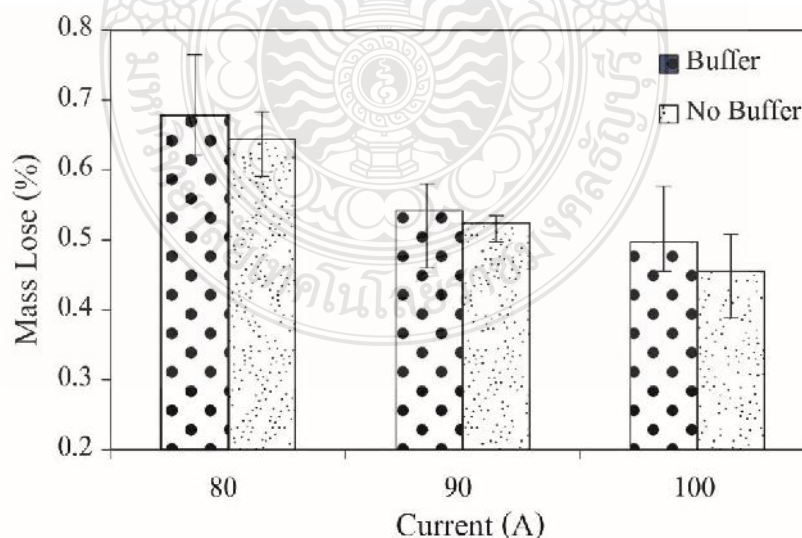




รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาค แบบมีชั้นรองพื้น ที่กระแส 80 และ 100 A

4.2.6 การตรวจสอบการสึกกร่อนของชิ้นงานเชื่อม แบบรองพื้น และไม่รองพื้น

รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบอัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง เหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 แบบมีการเชื่อมชั้นรองพื้น และไม่มีชั้นเชื่อมรองพื้น ด้วยกระแสไฟเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยได้ทำการทดสอบและเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักการสึกกร่อนที่สูญหายไป พบว่า กระแสไฟที่ใช้เชื่อมที่ 80 A แบบมีการเชื่อมรองพื้น มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายไปที่ 0.678 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแบบไม่มีการเชื่อมรองพื้น มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายไปที่ 0.644 เปอร์เซ็นต์ และกระแสไฟที่ใช้เชื่อมแบบมีการเชื่อมชั้นรองพื้นที่ 90 A มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายไปที่ 0.542 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแบบไม่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายไปที่ 0.524 เปอร์เซ็นต์ และกระแสไฟที่ใช้เชื่อมที่ 100 A แบบมีการเชื่อมรองพื้น มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายไปที่ 0.497 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแบบไม่มีการเชื่อมรองพื้น มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายไปที่ 0.455 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่า อัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็ง ทั้งแบบมีการเชื่อมชั้นรองพื้น และไม่มีชั้นเชื่อมรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งการเปรียบเทียบอัตราการสึกกร่อนทั้ง 3 กระแส แสดงอัตราการสึกกร่อนสูงสุดที่ 0.678 เปอร์เซ็นต์ คือชั้นเชื่อมที่มีชั้นรองพื้น ที่กระแส 80 A และเหล็กที่มีค่าความแข็งสูงสุด และมีอัตราการสึกกร่อนน้อยที่สุด ที่ 0.455 เปอร์เซ็นต์ เป็นเหล็กที่เชื่อมแบบไม่มีการเชื่อมชั้นรองพื้น และใช้กระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อมที่ 100 A ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุทธิพร ฤทธิภักดี [22] ได้กล่าวไว้ว่า การเพิ่มจำนวนชั้นพอกผิวแข็งส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มค่าความแข็ง และลดอัตราการสึกกร่อนของผิวโลหะได้



รูปที่ 4.21 อัตราการสึกกร่อนของชิ้นงานเชื่อม แบบรองพื้น และไม่รองพื้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยการทดลองอิทธิพลของการเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นแนวต่อสมบัติของล้อยืด โลหะเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 ใช้ตัวแปรกระแสเชื่อมที่ 80 90 และ 100 A แบบมีชั้นเชื่อม รองพื้น และแบบไม่มีชั้นเชื่อมรองพื้น แล้วนำมาเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น แล้วทำการตรวจสอบ โครงสร้างทางโลหะวิทยา และทดสอบสมบัติทางกลของแนวเชื่อม เพื่อที่จะหาจำนวนชั้นที่ดีที่สุด ใน การเชื่อมพอกผิวแข็ง ผลการทดลองโดยมีข้อสรุปดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การเพิ่มจำนวนที่มากขึ้นของชั้นแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง ส่งผลทำให้ค่าความแข็ง เพิ่มขึ้น และลดอัตราการสึกกร่อนของ โลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนผสม ทางเคมีที่มีผลต่อค่าความแข็ง

5.1.2 กระแสเชื่อมที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อ โครงสร้างจุลภาค และ สมบัติทางกล ของชั้น โลหะพอกแข็ง

5.1.3 กระแสเชื่อมที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานการสึกกร่อนที่ดีที่สุด คือกระแสเชื่อมที่ 100 A แบบไม่มีชั้นเชื่อมรองพื้น

5.1.4 ชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่มีการเชื่อมชั้นรองพื้นที่กระแส 100 A แสดงค่า ความแข็งสูงสุดที่ 870 HV และมีค่าเปอร์เซ็นต์การสึกกร่อนน้อยที่สุดที่ 0.455 เปอร์เซ็นต์

5.1.5 โลหะที่ส่งผลต่อการเพิ่มค่าความแข็ง และลดอัตราการสึกกร่อน คือ ซิลิกอน โครเมียม และแมงกานีส

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองอิทธิพลของการเชื่อมพอกผิวแข็งซ้ำแนวต่อสมบัติของล้อยี่ห้ออ้อย โลหะเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 เกิดปัญหาในระหว่างการทดลองจึงต้องมีการปรับปรุงหรือใช้ในการทดลองในคราวต่อไป โดยมีข้อเสนอแนะไว้ในการพิจารณาดังนี้

5.2.1 ในการทดลองศึกษาครั้งต่อไปควรทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมที่หลากหลายและเป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้กันโดยแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลต่อ และโครงสร้างจุลภาคต่อตัวแปรในกระบวนการเชื่อมตัวอื่นๆ

5.2.2 การเลือกวัสดุทดลอง ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งควรเลือกลวดเชื่อมพอกผิวแข็งที่หาซื้อง่าย และมีจำหน่ายในประเทศ เนื่องจากลวดเชื่อมที่ผู้วิจัยเลือกต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการซื้อลวดเชื่อมพอกผิวแข็งที่ค่อนข้างสูง



รายการอ้างอิง

- [1] X. H. Wang, F. Han, X. M. Liu, S. Y. Qu, and Z. D. Zou, "Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 489, pp. 193-200, 8/20/ 2008.
- [2] M. Dumovic, "Repair and Maintenance Procedures for Heavy Machinery Components " *Welding Technology Centre The Lincoln Electric Company*, Australia 2002.
- [3] V. E. Buchanan, P. H. Shipway, and D. G. McCartney, "Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry," *Wear*, vol. 263, pp. 99-110, 9/10/ 2007.
- [4] C.-M. Chang, Y.-C. Chen, and W. Wu, "Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C hardfacing alloy," *Tribology International*, vol. 43, pp. 929-934, 5// 2010.
- [5] R. Arabi Jeshvaghani, E. Harati, and M. Shamanian, "Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding," *Materials & Design*, vol. 32, pp. 1531-1536, 3// 2011.
- [6] คำรงค์มิตร เขียนขุนทด, "อิทธิพลของวัฏจักรความร้อนที่มีผลต่อโลหะเชื่อมมิกเหล็กกล้า เครื่องมือเกรด SKD 11," ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2557.
- [7] ยุคล จุลอุภัย, "การสึกหรอและเทคโนโลยีการเชื่อมซ่อมพ่นพอกผิวโลหะ," ศูนย์วิจัยและพัฒนา งานเชื่อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, สำนักพัฒนาเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม, 2536.
- [8] C. W. Kuo, C. Fan, S. H. Wu, and W. Wu, "Microstructure and Wear Characteristics of Hypoeutectic, Eutectic and Hypereutectic (Cr,Fe)₂₃C₆ Carbides in Hardfacing Alloys," *MATERIALS TRANSACTIONS*, vol. 48, pp. 2324-2328, 2007.
- [9] ถนอม โพธิ์ทอง, "จะให้ความร้อนล่วงหน้าเมื่อไหร่และอย่างไร," วารสารเชื่อม, pp. 15-20, 2541.
- [10] D. Smith, *Welding Skills and Technology*: Gregg Division McGraw-Hill, 1984.

- [11] Raymond H, *Shielded Metal Arc Welding in Welding Brazing and Soldering* vol. vol.6, 1993.
- [12] CMU. ก า ร ท ด ส อ บ ก า ร สึ ก ห ร อ [Online]. Available: http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/mat1151ro_ch2.pdf (10 มกราคม 2558)
- [13] สุรธยา ลิ้มนา, "การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกของเหล็กกล้าผสมคาร์บอน AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมไส้ฟลักซ์," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2553.
- [14] พรวิสา วงศ์ปัญญา, "การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสะท้อน," ปฏิบัติการโลหการกายภาพ 1, pp. 1-3, 2556.
- [15] C. Zhang, X. Song, P. Lu, and X. Hu, "Effect of microstructure on mechanical properties in weld-repaired high strength low alloy steel," *Materials & Design*, vol. 36, pp. 233-242, 4// 2012.
- [16] C. Fan, M.-C. Chen, C.-M. Chang, and W. Wu, "Microstructure change caused by (Cr,Fe)₂₃C₆ carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys," *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, pp. 908-912, 10/5/ 2006.
- [17] C.-M. Chang, C.-M. Lin, C.-C. Hsieh, J.-H. Chen, and W. Wu, "Micro-structural Characteristics of Fe-40wt%Cr-xC Hardfacing Alloys with [1.0-4.0wt%] Carbon Content," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 487, pp. 83-89, 11/13/ 2009.
- [18] S. Chatterjee and T. K. Pal, "Solid particle erosion behaviour of hardfacing deposits on cast iron—Influence of deposit microstructure and erodent particles," *Wear*, vol. 261, pp. 1069-1079, 11/30/ 2006.
- [19] J. C. F. Jorge, L. F. G. Souza, and J. M. A. Rebello, "The effect of chromium on the microstructure/toughness relationship of C–Mn weld metal deposits," *Materials Characterization*, vol. 47, pp. 195-205, 9// 2001.
- [20] S. Chatterjee and T. K. Pal, "Weld procedural effect on the performance of iron based hardfacing deposits on cast iron substrate," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, pp. 61-69, 3/30/ 2006.

- [21] Y. Kitagawa, K. Ikeuchi, T. Kuroda, Y. Matsushita, K. Suenaga, T. Hidaka, *et al.*, "Hydrogen embrittlement susceptibility of microstructures formed in multipass weld metal for HT780 class steel," *Joining Science & Technology*, vol. 43, pp. 12-22, 2008.
- [22] สุพร ฤทธิภักดี, "พฤติกรรมการสีกหรือแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็ก AISI 1020," การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554, pp. 2070-2075, 20-21 ตุลาคม 2554.
- [23] Winarto and D. Priadi, "Effect of Preheating and Buttering on Cracking Susceptibility and Wear Resistance of Hardfaced HSLA Steel Deposit," *QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY*, vol. 31, pp. 202s-205s, 2013.
- [24] P. B. Srinivasan, V. Muthupandi, W. Dietzel, and V. Sivan, "An assessment of impact strength and corrosion behaviour of shielded metal arc welded dissimilar weldments between UNS 31803 and IS 2062 steels," *Materials & Design*, vol. 27, pp. 182-191, // 2006.
- [25] D.R. Askeland and P.P. Phule, *Science and Engineering of Materials*. Singapore: Cengage Learning, 2006.
- [26] C. T. Kwok, H. C. Man, and F. T. Cheng, "Cavitation erosion–corrosion behaviour of laser surface alloyed AISI 1050 mild steel using NiCrSiB," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 303, pp. 250-261, 5/15/ 2001.

ภาคผนวก ก

ใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11



Mill test certificate

SRIPETCH STEEL IMPORT EXPORT CO. LTD.,

1702 MOO 4, SUKHUMVIT RD., THEPARAK,

T. A.MUANG,SAMUTPRAKARN10270

Our order no.

Purchase Order v. June 21 2012

REQUIREMENTS Tool steel bars in quality , hot rolled,resp.forged	MELTING PROCESS E
--	-------------------

MATERIAL 1.2379 SKD11	EXECUTION annealed
--------------------------	--------------------

ITEM-NO.	IDEN-NO.	PART	DRAWING	PATT.-NO.	DEMENSION	Info	QUANT.	WEIGHT KP	HEAT	TEST-NO.
	1 2 3	flat bars 305x10 mm. 21 bars						2564	111191	111191

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V			
NOMINAL VALUE%	1,500 1,600	0,10 0,60	0,20 0,60	0,030	0,020	11,00 13,00	0,70 1,00	0,70 1,00			Min Max
Heat 111191	1,530	0,44	0,25	0,014	0,004	11,58	0,87	0,90			Act

TEST-NO.	L T Q	TEMP C	RP N/MM ² 0.2% 1.0%	RM N/MM ²	A %	Z %	TEMP °C	IMPACT TEST AVJ	HARDN. HB
REQU.VALUE									Max. 255
111191									218-222

VISUAL INSPECTION AND DIMENSIONS SATISFACTORY THE REQUIREMENTS ARE FULFILLED

Inspector

Joachim

ภาคผนวก ข

ใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของลาวเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็ง





Eutectic Corporation
 194W14355 Garwin Mace Drive
 Menomonee Falls, WI 53051 USA
 Phone: +1 262-532-4577
 Fax: +1 262-255-5542
 www.eutectic.com

CERTIFICATION OF TESTS

Date: November 17, 2014

Sold To: MESSER EUTECTIC CASTING (PVT) LTD
 12K ENTERPRISE ROAD
 ENHUBURSE 10
 SINGAPORE
 627690

Ship To: PHISUNWAN INTERTRADE CO., LTD
 149 SOI HANGSIT-NAKORNMAJIK 66
 BANGSIY-NAKORNMAJIK ROAD
 PHATHUMTHANI, THAILAND
 17170

EC Order No.	Customer Order No.	Consignee Order No.	Date
598370	1201411-112/PO5711-0080S		11/17/14

Item	Size	Product	Quality Control No.	Quantity
9606.3612	3.2MM	MG 600	925578-01	300 KG

SPECIFICATION / CLASSIFICATION:

CHEMICAL ANALYSIS

					(X) Typical	() Actual					
C.	0.110	Mn.	0.48	Si	0.97	S	0.003	P.	0.028	Ni	0.47
Cr.	28.85	Mo.	0.05	Co	0.07	Sb.		Tl		N.	
Co.		Al		Pb	Balance	V.		W.			
Cb.	0.02	B									

Ferrite Diagram:	Charpy V-Notch Impact Values:	As Welded	Heat Treated
Magne Gage:	Tensile Strength:		
X-ray:	Yield Strength:		
Hardness:	Elongation:		
Bonds:	Red. of Area:		



Other information:

Signature Steve Schloesser

Title QA Manager





Eutectic Corporation
 N94W14355 Garwin Mace Drive
 Menomonee Falls, WI 53051 USA
 Phone: +1 262-532-4677
 Fax: +1 262-255-5542

CERTIFICATION OF TESTS

Date: November 15, 2013

Sold To: MESSER EUTECTIC CASTOLIN PTE LTD.
 12K ENTERPRISE ROAD
 ENTERPRISE 10
 SINGAPORE
 627997

Ship To: PHUSUWAN ENTERTRADE CO. LTD
 149 SOI RANOSIT-NAKORNNA YOK 66
 RANOSIT-NAKORNNA YOK ROAD
 PHATHUMTHANI, THAILAND
 12130

EC Order No.	Customer Order No.	Consignee Order No.	Date	
395117	E201310-257, PF201310-171		11/15/13	
Item	Size	Product	Quality Control No.	Quantity
8824.3612	3.2MM	MG 761	934392-01	300 KG

SPECIFICATION / CLASSIFICATION:

CHEMICAL ANALYSIS

				(X) Typical		() Actual					
C.	0.467	Mn.	0.26	Si	1.45	S.	0.014	P.	0.013	Ni.	0.40
Cr.	6.40	Mo.	1.14	Cu.		Nb.		Ti.		N.	
Co.		Al.		Fe.	Balance	V.		W.	9.86		
Cb.		B.									

	As Welded	Heat Treated
Ferrite-Diagram:		
Magne Gage:		
X-ray:		
Hardness: 55 - 60 HRc (as welded)		
Bends:		
	Charpy V-Notch Impact Values:	
	Tensile Strength:	
	Yield Strength:	
	Elongation:	
	Red. of Arcs:	

Other Information:



Signature Steve Schlosser
 Title QA Manager



Part of the Messer World's







กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน

วุฒิบัตรฉบับนี้ให้เพื่อรับรองว่า

นายดำรงกัมภีร์ เกียนขุนทด

ได้ผ่านการทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติ
ช่างเชื่อมไฟฟ้า

ชั้น ๑ (ช่างต้น)

ศูนย์พัฒนาฝีมือแรงงานจังหวัดสระบุรี เมื่อวันที่ ๓๑ เมษายน ๒๕๕๕



สภาอาชีพ
ทดสอบโดย

ได้ไว้ ณ วันที่ ๓ พฤษภาคม ๒๕๕๕

(นายประพันธ์ มณฑการติวงศ์)
ผู้อำนวยการศูนย์พัฒนาฝีมือแรงงาน
ปฏิบัติการการตามอธิบดีกรมพัฒนาฝีมือแรงงาน
นายทะนะเบ็ญน

(นายวีรศักดิ์ เพ็ญนิล)
หัวหน้าฝ่ายฝึกฝึกอบรม
ผู้ดำเนินการทดสอบ

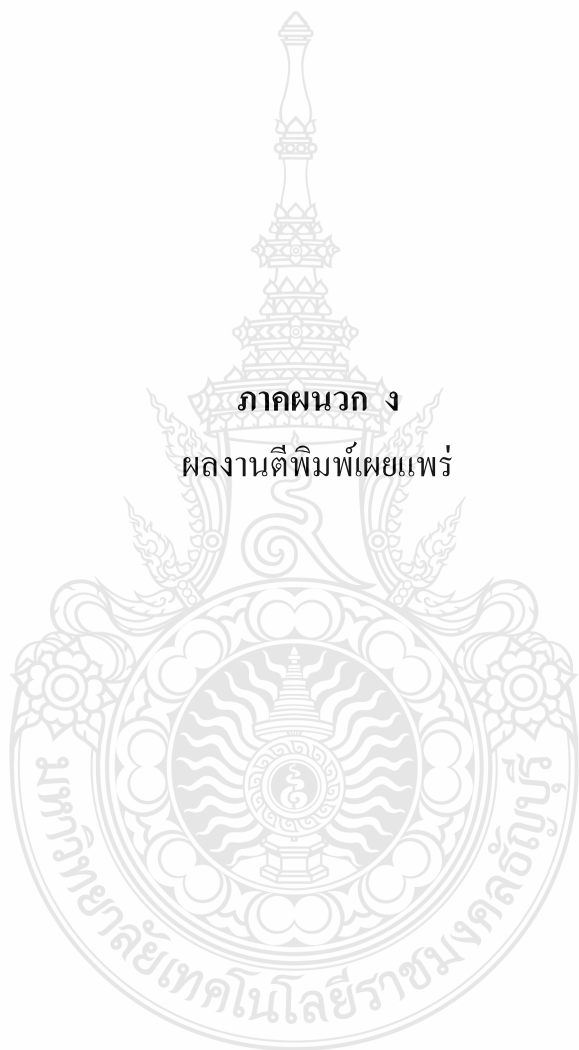
๒๕๖๓
๒๕๖๓
๒๕๖๓



เลขทะเบียนชุดใบตัว
เจ้าหน้าที่ทะเบียน

ขอความร่วมมือจาก
นาย/นาง/นางสาว/นาย/นาง/นางสาว
นาย/นาง/นางสาว/นาย/นาง/นางสาว
นาย/นาง/นางสาว/นาย/นาง/นางสาว
นาย/นาง/นางสาว/นาย/นาง/นางสาว
นาย/นาง/นางสาว/นาย/นาง/นางสาว

ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





บทคัดย่อการประชุมทางวิชาการระดับชาติ หอบ.วิจัย ครั้งที่ 9

การพัฒนาห้องถิ่นสู่ภูมิภาคอาเซียน : ความหลากหลายบนพื้นที่ชายแดน

2 - 3 กรกฎาคม 2558

ณ อาคารเทพรัตนสิริปภา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี





ประชุมวิชาการ มอว. ใจชัย ครั้งที่ 9

การพัฒนาท้องถิ่นสู่ภูมิภาคอาเซียน : ความหลากหลายบนพื้นที่ชายแดน

2 – 3 กรกฎาคม 2558

อาคารเทพรัตนสิริปภา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

สารบัญ

	หน้า
<ul style="list-style-type: none"> ● การผสมผสานภูมิปัญญาท้องถิ่นกับองค์ความรู้สากลในการเพาะพันธุ์และอนุบาลพันธุ์ปลาน้ำจืดของชุมชนโพรงมะเดื่อ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม นางสาวฉวี ลีมปฐมชัยชาญ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 	181
<ul style="list-style-type: none"> ● ผลของ 17 beta estradiol ต่อการแปลงเพศปลาหมอ นายธนภัทร วรโสภา คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ 	183
<ul style="list-style-type: none"> ● การพัฒนาผลิตภัณฑ์กุนเชียงปลาเพื่อสุขภาพ ผศ.ประภาพรณ เพียรชอบ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 	185
<ul style="list-style-type: none"> ● การใช้สารทดแทนสารประกอบฟอสเฟตในการปรับปรุงคุณภาพเต้าหู้ปลา ดร.หุติยา รัตนศิริวัฒน์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 	187
<ul style="list-style-type: none"> ● Large-Area of the reduced Graphene oxide paper fabricated by a simple thermal annealing technique ดร.สุทธิมาศ หนูทองแก้ว คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 	189
<ul style="list-style-type: none"> ● การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งชั้นพอกผิวแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C โดยการเชื่อมอาร์กเลวดนั้มฟลักซ์ นายอรุณกร จันทร์ชนะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 	191
<ul style="list-style-type: none"> ● อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11 ต่ออัตราการสึกหรอของผิวโลหะเชื่อมอาร์คเลวดนั้มฟลักซ์ นายคมิต สิริพันธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 	193
<ul style="list-style-type: none"> ● ผลการฝึการหายใจเบื้องต้นต่อความเครียดในมารดาหลังคลอดที่บุตรได้รับการรักษาด้วยการส่องไฟ นางสาวนันทิชาพร ตายเมธ คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชธานี 	195
<ul style="list-style-type: none"> ● ผลของการสอนรายวิชาจิตวิทยาสำหรับพยาบาลคือพหุติการรณการเรียนรู้ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาแห่งชาติ ดร.สมจิตต์ ฤประสงค์ คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 	197

อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11 ต่ออัตราการสึกหรอของผิวโลหะเชื่อมอาร์คลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

กานิต ลิขิตพันธ์^{1*} ทวี หนัดสี² กิตติพงษ์ กิมะพงศ์¹ และ ชัยยะ ประณีตพลกรัง¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

²สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

*E-mail address : kanit_kema@hotmail.com

บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นวิธีในการซ่อมผิวชิ้นส่วนเครื่องจักรที่เกิดการสูญเสียไปเนื่องจากการสึกหรอโดยการขัดสีและจากการกระแทกให้สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมพอกผิวแข็งเพื่อศึกษาอายุการใช้งาน จึงมีความสำคัญและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง บทความนี้มีจุดประสงค์ในศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมอาร์คลวดหุ้มฟลักซ์ พอกผิวแข็งที่มีผลต่อความแข็ง โครงสร้างจุลภาค และอัตราการสึกหรอของบนแผ่นเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11 ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การเพิ่มจำนวนชั้นพอกผิวแข็งส่งผลต่อการเพิ่มความแข็ง และลดอัตราการสึกหรอนของโลหะ พอกผิวแข็ง ชั้นพอกผิวแข็งที่แสดงค่าความแข็งสูงสุด 860 HV และอัตราการสึกหรอต่ำสุด 0.031 กรัม คือชั้นพอกผิวแข็ง ชั้นที่ 3 วัสดุผสมสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งและลดการสึกหรอของชั้นพอกผิวแข็ง คือ ซิลิกอน โครเมียม และแมงกานีส

คำสำคัญ : ชั้นพอกผิวแข็ง ความแข็ง อัตราการสึกกร่อน



Influence Of Layers Number Hardfacing Tool Steel JIS-SKD11 On Wear Rateshieldedmetal Arc Weld Surface

Kanit Sittiphan^{1*} Tavee Madsa² Kittipong Kimapong³ Chaiya Franeetpongrun¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Pathumthani

² Industrial Technology Engineering Faculty of Industrial of Technology Rajamangala University of Technology of Technology
Rattanakosin, Wang Klai Kang Wong Campus, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan

*E-mail: kanit_kem@hotmail.com

Abstract

Hard-faced welding is a repair welding for increasing the metal amount at the machine part surfaces that was lost by an abrasion of two metals. When comparing to another repairing process, the welding method is easier for operation and is an effective method for recycling of the machine part. A variation study of hard-faced welding parameters to increase the lifetime of hard faced layer properties is important and is continuously developing. An aim of this article is to effect study of hard faced shielded metal arc welding on hardness, microstructure and wear rate of JIS-SKD11 tool steel surface. The summarized results are as follows. Increase of the hard faced layer was affected to increase the weld hardness and decrease the weld wear rate. The hard faced layer that showed the maximum hardness of 860 HV and the minimum wear rate of 0.031 grams was the 3rd layer. Important alloying elements that affected to increase hardness and decrease wear rate was silicon, chromium and manganese.

Keywords : Influence of layers , steel JIS-SKD11, rateshieldedmetal





ประกาศมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
เรื่อง แต่งตั้งกองบรรณาธิการประชุมวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 9

ตามที่ สำนักงานส่งเสริมบริหารงานวิจัย บริการวิชาการและทำนุบำรุงศิลปวัฒนธรรม สำนักงานอธิการบดี ได้รับอนุมัติให้ดำเนินโครงการประชุมวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 9 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเวทีในการนำเสนอผลงานวิจัยของนักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา ในสาขาต่างๆ ทั้งจาก หน่วยงานภาครัฐ เอกชนและผู้สนใจทั่วไป ซึ่งนำมาสู่การสร้างบรรยากาศของการวิจัยและการเผยแพร่องค์ความรู้สู่สังคม และเพื่อให้การดำเนินงานโครงการดังกล่าวบรรลุตามวัตถุประสงค์ มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล

ฉะนั้น อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 18 และ 21 แห่งพระราชบัญญัติมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2533 จึงแต่งตั้งกองบรรณาธิการประชุมวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 9 ดังมีรายชื่อต่อไปนี้

1. หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพันธกิจสังคม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

มีหน้าที่ ดูแลการบริหารและการดำเนินการจัดทำหนังสือประมวลบทความในการประชุมทางวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 9 (Proceedings) และพิจารณาความเหมาะสมในการตีพิมพ์

2. กองบรรณาธิการ

- | | |
|---|--|
| 1) รองศาสตราจารย์สุวัฒน์ อึ้งพวงษากร | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 2) รองศาสตราจารย์ณัฐจาพร พิเชียรณรงค์ | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 3) รองศาสตราจารย์ชาญณรงค์ สายแก้ว | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 4) ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิเศษกาญจนา ทองหัว | มูลนิธิประชาชนสังคม จังหวัดอุบลราชธานี |
| 5) ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรทัย เลียงจินดาถาวร | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 6) ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑุ ราวีเรีย | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 7) ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุ่งรัศมี บุญดาว | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 8) ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรุณญา พิมพ์มงคล | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 9) ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิริยา พรหมทอง | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 10) ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมบัติ สิ้นสุขวาน | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 11) ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุมนา นีระ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 12) ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรัสญา มณีบุตร | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |

- | | |
|--|------------------------------|
| 13) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาติรี ฝ่ายคำตา | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 14) ผู้ช่วยศาสตราจารย์กองพล อารีรักษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 15) ผู้ช่วยศาสตราจารย์กตัญญู แก้วหานาม | มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์ |
| 16) อาจารย์ชญาตา ดานวงศ์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี |
| 17) อาจารย์วิษรี เกษพิชัยณรงค์ | มหาวิทยาลัยมหิดล |

มีหน้าที่ พิจารณากลับกรองผลงานที่เสนอขอรับการตีพิมพ์ ให้ข้อเสนอแนะและตรวจสอบความถูกต้องของบทความวิจัยฉบับสมบูรณ์ที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ก่อนตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือประมวลบทความในการประชุมทางวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 9 (Proceedings) และให้คำปรึกษาด้านวิชาการฝ่ายจัดการ ในการดำเนินงาน

3. ฝ่ายจัดการ

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1) นางสาวปัญจีรา ศุภกุล | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 2) นายสุภวัฒน์ ไสวรรณี | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 3) นางสาวนิตยศรี วงศ์สุวรรณ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |

มีหน้าที่ ดูแลการดำเนินการจัดทำหนังสือประมวลบทความในการประชุมทางวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 9 (Proceedings) ประสานงานระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิ กองบรรณาธิการ และผู้เขียน ตรวจสอบความถูกต้องของกรการจัดรูปแบบ พิสูจน์อักษร

ทั้งนี้ ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 ถึงวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2558

ประกาศ ณ วันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2558

รองศาสตราจารย์นงนิตย์ อีระวัฒน์สุข-
อธิการบดีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

รองศาสตราจารย์ ดร.ดำรงค์ วัฒนา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.เอ็มอัชกา วัฒนบูรานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย อัศวลาภสกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ เนรงค์ สิงห์ปุระอุตม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลาธิป สมาทิต	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัฐมาภรณ์ พิมพ์ทอง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรธิภา องค์คุณารักษ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี ฝ้ายคำดา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.จักกริช พฤษการ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.พิจิตรา แก้วสอน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.อรพรรณ บุตรกตัญญู	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.เอกภูมิ จันทรัตน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤตยา แสงเจริญ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลลภา อารีรัตน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สังคม เตชะวงศ์เสถียร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ คำดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ขวัญฤดี ตันตระกูลพิณพิสัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จินตนา สมสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิรชญา มณีเนตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มภาวดี แก้วกันเนตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริช ศรีโคคงกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุอังคณา แกล่งกันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมณา นีระ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ณอมพร เลาหจรัสแสง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิ่งฟ้า แสงสี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดวงหทัย กาศวิบูลย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ถุติพันธ์ สมุทร์ทัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีระพงษ์ แสงชูโต	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ดร.กรีทา แก้วคง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพร อารีรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ทิรา เจียรณีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุดิมา พรหมมาก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กวิณธร เสถียร	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุช วรางคนากุล	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิวากร แก้วมณี	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยสฤกษ์ อเนกสุข	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วศิน บุญญาวุธตระกูล	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรินภา กิ่งเกื้อกุล	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เป็ญจมาศ จันทร์ภา ไพบูลย์กิจกุล	มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี
ดร. วศิน ยูวนะเดมีย์	มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กรรณก ทิพรส	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.กัญญารัตน์ โศจร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.มนตรี วงษ์สะพาน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐจาพร พิชัยณรงค์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนวัฒน์ ไชยรัตน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เหียนทอง ทองพันธ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมณฑา เก่งการพานิช	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ เกษมผลกุล	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพพร ภูระยา	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปองรัตน์ รัตนปัญญาวงศ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.วัชรีย์ เกษพิชัยณรงค์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กตัญญู แก้วหนานาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ วัชรีย์ กาญจนศิริดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตกรกร โพธิ์งาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุบิน บุระรัช	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทัศนีย์ นะแสง	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชิตชนก เข็มขาว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
ดร.ณรงค์ศักดิ์ รอบคอบ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัชวีญ ลิขิตยาพิทักษ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต
ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ วงศ์พิชญฐ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ วีระพงษ์ธนากร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ สมหมาย ชินนาค	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิกา รัตนหงส์เลขา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา พยัค	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา รุ่งรัชกานนท์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรา สิงห์ทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุช อารีเจียร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชรีตา ปุกหุด	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต สีนวงศ์พิทักษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ จีงวัฒน์ตระกูล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาทิพย์ แผลมคม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริยาภรณ์ เจริญบุตร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งรัศมี บุญดาว	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริยา พรหมทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ สีนุตร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุระ วุฒิปุทธิ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวดี กงเพชร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แสวง วัชรธนกิจ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรทัย เลียงจินดาถาวร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรัญญา พิมพ์มงคล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ อ่อนลอย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจัน มณีนิล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประชาสันติ ไตรยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร.ท.ดร. สมญา ภูณะยา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศรีประไพ ธรรมแสง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.กิตติ เหลาสุภาพ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.จริยาภรณ์ กุณวณิช	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ศีลัมพร วุฒิปุทธิ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ณรงค์ วสันตปิยมงคล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ณัฐชวัล โมคาพานิชวงษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ทรงสุภา พุ่มชุมพล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ธามินทร์ เกื้อโอโสม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ธารชดา พันธุ์นิล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ประเทือง ม่วงอ่อน	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ศุภชัย วรรณเลิศสกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.สุมาลี เอยวิจิตร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.สุวภัทร ศรีจงแสง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.เหมวรรณ เหมะนัค	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.อนิรุช สิบสิงห์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ภูภาศิริ อภินันท์เดชา	วิทยาลัยนครราชสีมา

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายคณิต สิทธิพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	30 ธันวาคม 2530
ที่อยู่	128/1 หมู่ 1 ตำบลไทรทอง อำเภอไม้แก่น จังหวัดปัตตานี 94220
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	บริษัทชาญนครวิศวกรรม จำกัด ตำแหน่งวิศวกรโครงการ

