

อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะที่มีผล
ต่อสมบัติโลหะพอกแข็งเหล็กกล้า JIS-S50C

INFLUENCE OF SHIELDED METAL ARC WELDING
PARAMETERS ON JIS S50C STEEL HARD-FACED
WELD PROPERTIES

อรรณกร จันทร์ชนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์ที่มีผลต่อ
สมบัติโลหะพอกแข็งเหล็กกล้า JIS-S50C

อรรณกร จันทร์ชนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์

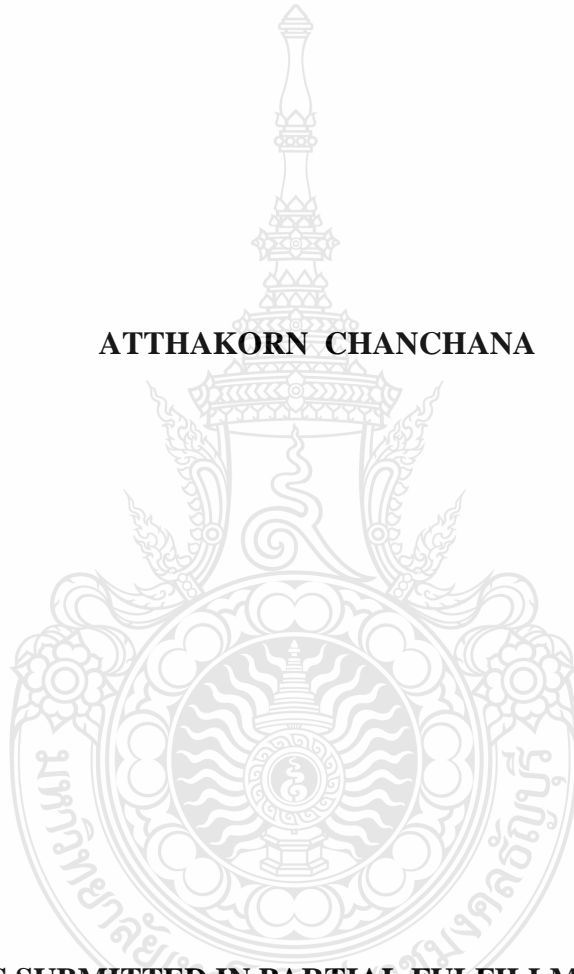
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**INFLUENCE OF SHIELDED METAL ARC WELDING PARAMETERS
ON JIS S50C STEEL HARD-FACED WELD PROPERTIES**

ATTHAKORN CHANCHANA



**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

อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะผสมฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติโลหะพอก
แข็งเหล็กกล้า JIS-S50C

Influence of Shielded Metal Arc Welding Parameters on JIS S50C Steel
Hard-faced Weld Properties

ชื่อ - นามสกุล

นายอรรถกร จันทร์ชนะ

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

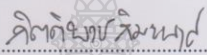
อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ชัยยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.

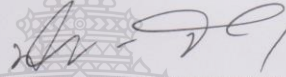
ปีการศึกษา

2557

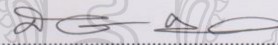
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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

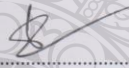
ประธานกรรมการ


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทร์มณี, Ph.D.)

กรรมการ


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย คอสกุล, D.Eng.)

กรรมการ


.....
(อาจารย์ชัยยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.)

กรรมการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

วันที่ 23 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมอาร์กด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติโลหะพอกแข็งเหล็กกล้า JIS-S50C
ชื่อ - นามสกุล	นายอรรถกร จันทร์ชนะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ชัยยะ ปรานิตพลกรัง, D.Eng.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกแข็งเป็นหนึ่งในวิธีการซ่อมแซมเพื่อเพิ่มปริมาณโลหะที่มีความแข็งบนผิวของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกษตรซึ่งหลุดหายไปเนื่องจากกลไกการสึกหรอ การกัดกร่อน หรือการกระแทก ระหว่างชิ้นส่วนและสิ่งแวดล้อม การเลือกกระบวนการเชื่อมและตัวแปรการเชื่อมที่สามารถทำให้เกิดผิวหน้าที่มีความแข็งและสามารถยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนได้จึงเป็นที่ต้องการและมีความสำคัญ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติผิวพอกแข็งเหล็กกล้า JIS-S50C

ในการดำเนินการศึกษานี้จะใช้กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยการเชื่อมอาร์กด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ ขนาด 3.2 มม. บนผิวของแผ่นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS S50C ซึ่งมีขนาดกว้าง 100 มม. ยาว 150 มม. และหนา 20 มม. โดยการทดสอบจะทำการปรับตัวแปรในการเชื่อมต่างๆ ดังนี้คือ จำนวนชั้นของการเชื่อม 1-3 ชั้น กระแสเชื่อม 65-165 แอมแปร์ และใช้วิธีการเชื่อมจะมีสองแบบคือ แบบที่มีและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ชิ้นงานที่ผ่านเชื่อมด้วยตัวแปรดังกล่าว จะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ และสภาพโครงสร้างของแนวเชื่อม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า จำนวนชั้นของการเชื่อมพอกที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น และลดอัตราการสึกหรอ วิธีการเชื่อมพอกผิวแข็งโดยไม่มีการเชื่อมรองพื้นจะได้ค่าความแข็งสูงและมีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าวิธีการเชื่อมที่มีการเชื่อมรองพื้น ตัวแปรการเชื่อมที่ดีที่สุดคือ กระแสเชื่อม 115 แอมแปร์ การเชื่อมไม่รองพื้นและจำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น ที่ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุด 800 HV มีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าความต้านทานการสึกหรอของโลหะฐานเดิมถึงประมาณ 3.5 เท่า

คำสำคัญ: การเชื่อมอาร์กด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ชั้นพอกแข็ง การสึกหรอ

Thesis Title	Influence of Shielded Metal Arc Welding Parameters on JIS S50C Steel Hard-faced Weld Properties
Name – Surname	Mr.Atthakorn Chanchana
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Mr.Chaiya Praneetpong, D.Eng.
Academic Year	2014

ABSTRACT

Hard-faced welding process is one of repairing methods for raising the hard metal amount on the agricultural machine part surfaces that are removed by the wear corrosion or contact between part surface and environment. A selection of an appropriate welding process parameters is required to produce a higher surface hardness in order to extend the service life. This research aims to study the influence of arc welding parameters on the properties of the Hard-Facing Welding of the Carbon Steel JIS S50C by using the shielded metal arc welding (SMAW) process.

Material used in this study was the carbon steel JIS-S50C plate sized 100 mm. wide, 150 mm. long and 20 mm. thick. The SMAW process was applied to produce the hard-faced welding layer between 1-3 layers using a welding current of 65-165 A. Both non-buffering and buffering layers were also prepared before welding the hard-faced layers. Mechanical property tests and wear resistant test were carried out to investigate the welded specimens.

The experimental results showed that an increasing of a number of hard-faced layers was directly influenced on increasing the surface hardness and increasing wear resistance. The hard-faced weld metal with non-buffering layer showed higher hardness and lower weight loss than the one with buffering layer. The optimum welding parameters that showed a hardness of 800 HV, a weight loss of 0.324% was a welding current of 115A, non-buffering and 3 layers of hard-faced metal. This optimum hard-faced metal was 3.5 times higher than that of JIS-S50C carbon steel.

Keywords: shielded metal arc welding, medium carbon steel, hard-faced layers, wear test

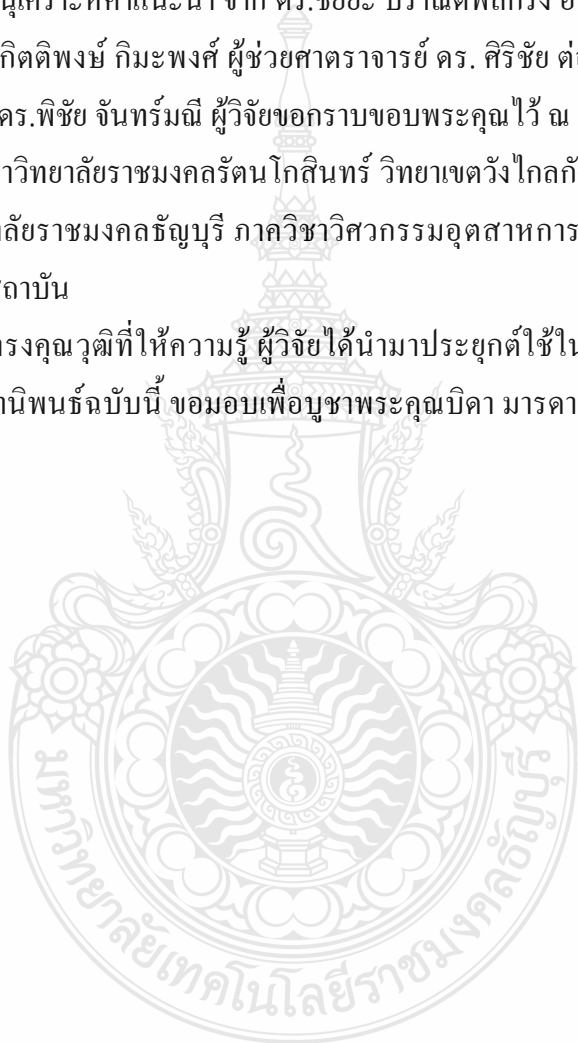
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยได้ตั้งวัตถุประสงค์ไว้อย่างสำคัญ เพื่อให้ค้นพบองค์ความรู้ใหม่ๆ และเพื่อแก้ปัญหาอุปสรรคบางประการที่เกิดขึ้นจากวัสดุอุปกรณ์ชิ้นส่วนอันจะนำมาซึ่งประโยชน์ต่อการผลิตในภาคส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปด้วยดี ซึ่งได้รับความเมตตาอนุเคราะห์คำแนะนำ จาก ดร. ชัยยะ ปรานิตพลกรัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย ต่อสกุล คณะกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย จันทรมณี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ โกลินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคคอนเมือง พร้อมทั้งบุคลากรทุกสถาบัน

ขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ความรู้ ผู้วิจัยได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ประโยชน์และคุณค่าอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

อรรถกร จันทร์ชนะ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน.....	17
2.2 กระบวนการเชื่อมอาร์กเชื่อมหุ้มฟลักซ์.....	20
2.3 หน้าที่ของวัสดุแกนลวดเชื่อมไฟฟ้า.....	10
2.4 มาตรฐานลวดเติมที่ใช้สำหรับพอกผิวของเซอร์มัน.....	24
2.5 รูปแบบการเกิดการสึกหรอ.....	31
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	36
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	39
3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อม.....	41
3.4 การตรวจสอบโครงสร้างกายภาพทางโลหะวิทยา.....	43
3.5 การทดสอบความแข็ง.....	46
3.6 การทดสอบอัตราการสึกกร่อน.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	49
4.1 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งแบบรองพื้นและไม่รองพื้นต่อสมบัติของ โลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน S50C	49
4.1.1 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อผิวหน้าแนวเชื่อม	49
4.1.2 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อ โครงสร้างมหภาค และจุลภาคโลหะเชื่อม	51
4.1.3 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อปริมาณพื้นที่เฟส	56
4.1.4 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่ออัตราการสึกกร่อน	57
4.1.4 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี	58
4.1.5 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อความแข็ง	60
4.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่รองพื้นต่อสมบัติของโลหะเชื่อมเหล็ก กล้าคาร์บอน S50C	62
4.2.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่อผิวหน้าแนวเชื่อม	62
4.2.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่อ โครงสร้างมหภาค.....	63
4.2.3 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่ออัตราการซึมลึก.....	64
4.2.4 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่อความแข็ง	65
4.2.5 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่อ โครงสร้างจุลภาค	66
4.2.6 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่อปริมาณพื้นที่เฟส	68
4.2.7 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่อแรงกระแทก	68
4.2.8 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่ออัตราการสึกกร่อน	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม	78
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบสมบัติทางกล.....	85
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	99



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051	6
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อม (ร้อยละโดยมวล)	24



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพสมมูลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์	18
รูปที่ 2.2 กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	21
รูปที่ 2.3 สัดส่วนความร้อนที่เกิด แบบกระแสสลับ	22
รูปที่ 2.4 สัดส่วนความร้อนที่เกิดกระแสตรงต่อขั้วลบ	22
รูปที่ 2.5 สัดส่วนความร้อนที่เกิด กระแสตรงต่อขั้วบวก	23
รูปที่ 2.6 ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดจากการขัดสี	31
รูปที่ 2.7 ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดจากแรงกระแทก	32
รูปที่ 2.8 ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดจากการกัดเซาะ	33
รูปที่ 2.9 ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดจากการกัดกร่อน	33
รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลอง	36
รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง	38
รูปที่ 3.3 ตู้อบลวดเชื่อมที่ใช้ในการวิจัย	38
รูปที่ 3.4 การเชื่อมแบบมีร่องพื้นและแบบไม่มีร่องพื้น (ก) แบบไม่มีชั้นร่องพื้น (ข) แบบมีชั้นร่องพื้น	39
รูปที่ 3.5 การเจียรระโนผิวดิบของแผ่นเหล็กกล้า (ก) การเจียรระโนผิวหน้า (ข) ชั้นที่ได้ทำการเจียรระโนผิวหน้า	40
รูปที่ 3.6 ขอบเขตในเชื่อมพอกผิวแข็ง (ก) การสร้างขอบเขตแนวเชื่อม (ข) ระยะขอบเขตแนวเชื่อม	40
รูปที่ 3.7 การเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยการใช้ท่าราบ	41
รูปที่ 3.8 การออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบ	42
รูปที่ 3.9 เครื่อง Wire-cut Electrical Discharge Machines (ก) ลวดตัวนำ (ข) เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (ค) จอควบคุมเครื่อง (ง) ลักษณะการยึด	43
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการกัดชิ้นรอย (ก) เครื่องขัด (ข) การเป่าลมร้อน (ค) กรดไนตริกและเมทานอล (ง) การกัดชิ้นรอย	44
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (ก) พื้นที่การตรวจสอบ (ข) กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ แบบซูม	45

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (ก) ตำแหน่งในการตรวจสอบ (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ค) กล้องกำลังขยาย 50 เท่า	46
รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบความแข็ง (ก) ตำแหน่งในการตรวจสอบ (ข) เครื่องทดสอบความแข็ง (ค) การกำหนดตำแหน่งตรวจสอบ (ง) ทดสอบความแข็ง.	47
รูปที่ 3.14 การทดสอบอัตราการสึกกร่อน	48
รูปที่ 3.15 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (ก) ตำแหน่งในการตรวจสอบ (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาด	48
รูปที่ 4.1 ผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น แบบมีร่องพื้นและไม่มีสร้างชั้นรองพื้น (ก) พอกผิวแข็ง 1 ชั้น กระแส 90 A ไม่ร่องพื้น (ข) พอกผิวแข็ง 1 ชั้น กระแส 90 A ร่องพื้น (ค) พอกผิวแข็ง 2 ชั้น กระแส 90 A ไม่ร่องพื้น (ง) พอกผิวแข็ง 2 ชั้น กระแส 90 A ร่องพื้น (จ) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 90 A ไม่ร่องพื้น (ฉ) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 90 A ร่องพื้น	50
รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น แบบมีร่องพื้นและไม่มีร่องพื้น (ก) พอกผิวแข็ง 1 ชั้น ร่องพื้น 90 A (ข) พอกผิวแข็ง 1 ชั้น ไม่ร่องพื้น 90 A (ค) พอกผิวแข็ง 2 ชั้น ร่องพื้น 90 A (ง) พอกผิวแข็ง 2 ชั้น ไม่ร่องพื้น 90 A (จ) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น ร่องพื้น 90 A (ฉ) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น ไม่ร่องพื้น 90 A	52
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวและขนาดจุดบกพร่องในชิ้นงาน แบบไม่มีโครงสร้างรองพื้น	53
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะฐาน (ก) เนื้อโลหะฐาน S50C (ข) พื้นที่กระทบร้อน S50C (ค) ชั้นรองพื้น	54
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของจำนวนชั้นแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (ก) ชั้นที่ 1 ไม่ร่องพื้น 90 A (ข) ชั้นที่ 1 ร่องพื้น 90 A (ค) ชั้นที่ 2 ไม่ร่องพื้น 90 A (ง) ชั้นที่ 2 ร่องพื้น 90 A (จ) ชั้นที่ 3 ไม่ร่องพื้น 90 A (ฉ) ชั้นที่ 3 ร่องพื้น 90 A.....	55
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อปริมาณพื้นที่เฟสที่ I	56
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อปริมาณพื้นที่เฟสที่ II	57
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่ออัตราการสูญเสียมวล	58

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	
(ก) ผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบรองพื้น (ข) ผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่รองพื้น	58
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพผิวพอกแข็ง 3 ชั้น	
(ก) ผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบรองพื้น (ข) ผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่รองพื้น	59
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุและชนิดของธาตุ ตำแหน่งที่ I.....	59
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุและชนิดของธาตุ ตำแหน่งที่ II	60
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อความแข็งแรงแบบมีการสร้างชั้นรองพื้น ...	61
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อความแข็งแรงแบบไม่มีชั้นรองพื้น	61
รูปที่ 4.15 ผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งของแบบไม่มีรองพื้นที่กระแสดเชื่อม 65-165 แอมแปร์	
(ก) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 65 A ไม่รองพื้น(ข) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 115 A ไม่รองพื้น (ค) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 140 A ไม่รองพื้น (ง) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 165 A ไม่รองพื้น.....	63
รูปที่ 4.16 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีรองพื้นที่กระแสดเชื่อม 65-165 A	
(ก) ไม่รองพื้น 65 A (ข) ไม่รองพื้น 115 A (ค) ไม่รองพื้น 140 A (ง) ไม่รองพื้น 65 A ...	64
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดเชื่อมพอกผิวแข็งกับอัตราการซึมลึกและความหนา	65
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดเชื่อม จำนวนชั้นและค่าความแข็งแรงของการเชื่อม	
พอกผิวแข็งแบบไม่มีรองพื้น	66
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่มีรองพื้นที่กระแสด	
115-165 A (ก) ชั้นที่ 3 ไม่รองพื้น 115 A (ข) ชั้นที่ 3 ไม่รองพื้น 140 A (ค) ชั้นที่ 3 ไม่รองพื้น 165 A	67
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดเชื่อมและปริมาณพื้นที่เฟส แบบไม่มีรองพื้น	68
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดและพลังงานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบ ไม่มีรองพื้น.....	69
รูปที่ 4.22 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานแบบไม่มีรองพื้นที่เชื่อมด้วยกระแสด	
115 และ 165 แอมแปร์ (ก) 115 A ไม่รองพื้น (ข) 165 A ไม่รองพื้น.....	70
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรง ปริมาณการสูญเสียมวล และกระแสดเชื่อมของชิ้น	
ทดลองแบบไม่มีรองพื้น	71

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

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



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้เครื่องจักรกลเกษตรทดแทนแรงงานคนในการทำนาได้รับความนิยอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีการที่ลดเวลาการทำงานและให้ผลผลิตสูงกว่าการใช้แรงงานคน อย่างไรก็ตามการใช้งานเครื่องจักรเหล่านี้ในช่วงระยะเวลาที่กำหนด เครื่องจักรเหล่านี้มักมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้งาน ยกตัวอย่าง เช่น ชิ้นส่วนลูกโรลเลอร์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ในการประคองการเคลื่อนที่ของดินตะขารถเกี่ยวข้าว ขณะใช้งานมีการสัมผัสขัดและถูกับดินตะขาบ ทำให้ผิวโลหะบริเวณที่เกิดการสัมผัสนั้นเกิดการสึกกร่อน (Wear) ขึ้นและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการขับเคลื่อนของรถเกี่ยวข้าว นอกจากนี้การสึกหรอแบบโลหะสัมผัสกับโลหะ (Metal to Metal) ที่มีปริมาณความเสียหายประมาณ 22 % แล้วการสึกกร่อนแบบขัดสี 52 % แบบกัดกร่อน 10 % และแบบกระแทก 22 % ตามลำดับ [1] ด้วยเหตุนี้ ชิ้นส่วนดังกล่าวจึงถูกนำมาทำการซ่อมบำรุงเพื่อให้เครื่องเกี่ยวข้าวสามารถใช้งานได้และมีประสิทธิภาพเท่าเดิม [2] กรรมวิธีการซ่อมชิ้นส่วนที่เกิดการสึกกร่อนอาจมีหลายวิธีการ แต่วิธีการเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นวิธีการที่มีความนิยมมากกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากการเชื่อมเป็นวิธีการที่มีความยุ่งยากและสลับซับซ้อนในการเตรียมเครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์การทำงานน้อยกว่า

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมอาร์กลดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน แบบไม่มีชั้นรองผิว จำนวน 3 ชั้น ด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ 3 ชนิด ผลการทดลองพบว่า ลวดเชื่อมที่มีทั้งสแตนปริมาณสูงแสดงความต้านทานการสึกกร่อนสูงสุดที่การเชื่อมเพียง 1 ชั้น [3] และการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการเชื่อมอาร์กลดหุ้มฟลักซ์โดยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของตัวประสานภายใน แผ่นเหล็กกล้าถูกนำมาทำการเชื่อมดินแนวและซ้อนทับเป็นชั้น ผลการทดลองพบว่า ตำแหน่งที่มีปริมาตรของคาร์โบไนไตรด์สูงแสดงค่าอัตราการสึกกร่อนที่ต่ำกว่า [4] และมีศึกษาการเชื่อมอาร์กลดเชื่อมหุ้ม ฟลักซ์พอกผิวแข็งเหล็กหล่อสีเทา ASTM เกรด 2500 การทดลองทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของลวดเชื่อมรองพื้น 3 ชนิด และใช้ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง 5 ชนิด ผลการทดลองพบว่า การอุ่นงาน จำนวนชั้นของการเชื่อม และอัตราส่วน Cr/C ในลวดเชื่อมพอกผิวส่งผลกระทบต่อความยาวของการแตกร้าวที่พื้นผิวต่อพื้นที่ [5]

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิว กระแสไฟเชื่อม และการเชื่อมแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ของกรรมวิธีการเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีผลต่อความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C เป็นโลหะในการผลิตลูกโรลเลอร์รถเกี่ยวข้าวเพื่อประยุกต์ใช้ในการซ่อมบำรุงในอุตสาหกรรมเกษตรต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน S50C

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้างโลหะวิทยากับสมบัติทางกลของชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน S50C

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาตัวแปรการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยลวดเชื่อมอาร์กหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW) ในการเชื่อมทดลอง

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C มีขนาดความกว้าง 150 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ความหนา 20 มิลลิเมตร

1.3.2 ใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ประเภทพอกผิวแข็ง ตามมาตรฐาน JIS Z 3251:DF2B-600-B และลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่ใช้ในการเชื่อมชั้นรองพื้น (Buffering) เป็นลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำ ตามมาตรฐาน JIS Z 3212:D5016

1.3.3 กำหนดใช้กระแสเชื่อมในชั้นรองพื้นที่ 100 แอมแปร์ และอุณหภูมิในการอุ่นชั้นทดลองก่อนเชื่อมที่ 150 องศาเซลเซียส

1.3.4 ศึกษาตัวแปรการเชื่อม

- 1) กระแสเชื่อมในชั้นพอกผิวแข็ง 65, 90, 115, 140 และ 165 แอมแปร์
- 2) การเชื่อมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท แบบมีการสร้างชั้นรองพื้น , แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น

3) จำนวนชั้นในการเชื่อมพอกผิวแข็ง 1, 2, และ 3 ชั้น

1.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและมหภาค

1.3.4 การตรวจสอบสมบัติทางกลด้วยวิธีการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน , ความแข็งแรงโมโครวิเกอร์ส์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงตัวแปรการเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดหุ้มฟลักซ์

1.4.2 เพื่อทราบถึงโครงสร้างทางโลหะวิทยาของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล

1.4.3 เพื่อให้เป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้ในการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในภาคอุตสาหกรรมเกษตร

1.4.4 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต โดยคาดว่าผลการทดลองที่ได้เป็นหนึ่งทางเลือกในการใช้ข้อมูลพิจารณาการใช้งานเชื่อมอาร์กด้วยลวดหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งในการเชื่อมซ่อมชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกษตร เพื่อลดเวลาการทำงานการเลือกใช้ตัวแปรการเชื่อมต่างๆ เพื่อให้ได้ตัวแปรที่เหมาะสมต่อไป และทำให้แนวเชื่อมประสิทธิภาพสูงที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน [6]

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ กล่าวว่า เหล็กกล้า (Steel) คือ โลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 2.11 % ขณะที่เหล็กหล่อ คือ โลหะผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนเกิน 2.11 % ในเหล็กกล้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยที่มีปริมาณคาร์บอน 0.77 % เหล็กกล้ายูเทคตอยที่มีปริมาณคาร์บอน 0.77 % และเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยที่มีปริมาณคาร์บอน 0.77-2.11 % ในแผนภาพสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ ช่วงของเหล็กกล้านี้มีเส้นอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่สำคัญ คือ

- เส้น A_0 คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแม่เหล็กของซีเมนไตท์จากพาราแมเนติก (Paramagnetic) เป็นเฟอร์โรแมเนติก (Ferromagnetic) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิประมาณ 210 องศาเซลเซียส

- เส้น A_1 คือ เส้นปฏิกิริยายูเทคตอย จุดตัดระหว่างเส้นปฏิกิริยายูเทคตอยและส่วนผสมยูเทคตอย คือ จุดยูเทคตอย ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.77 %

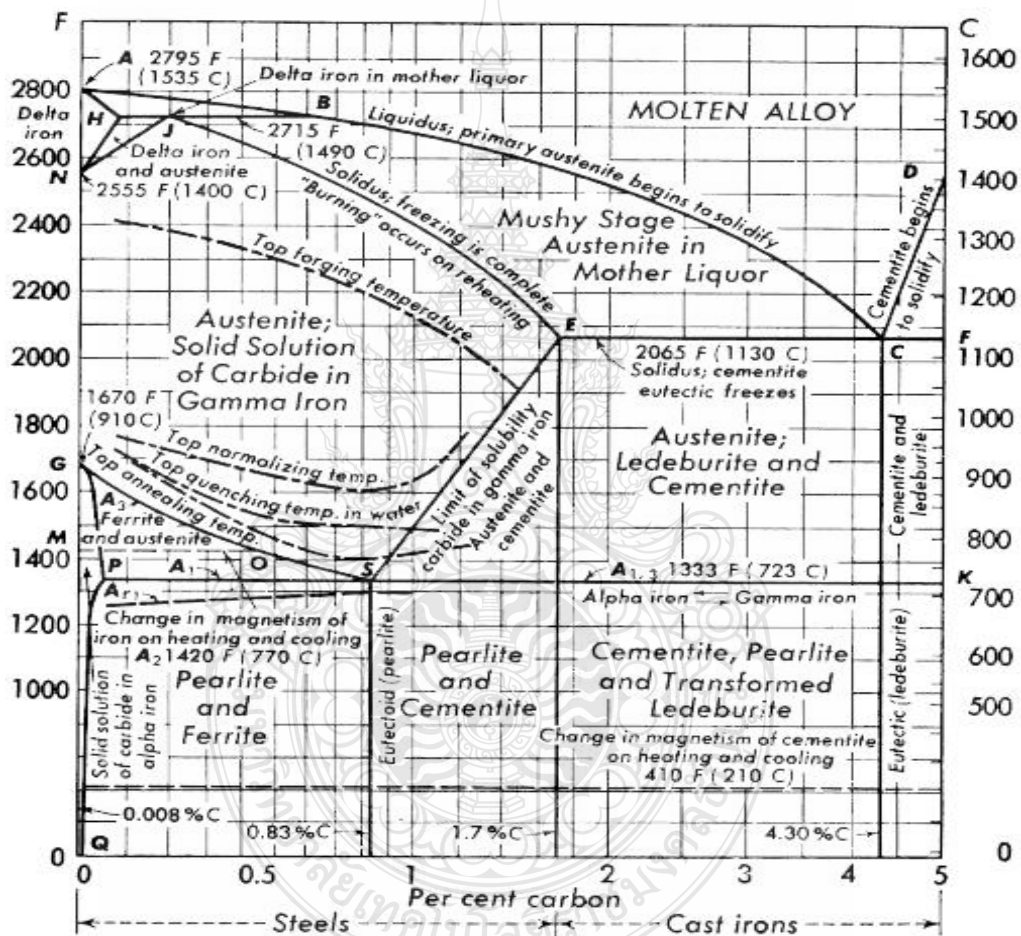
- เส้น A_2 คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแม่เหล็กของเฟอร์ไรท์จากพาราแมเนติก (Paramagnetic) เป็นเฟอร์โรแมเนติก (Ferromagnetic) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิประมาณ 760 องศาเซลเซียส

- เส้น A_3 คือ เส้นอุณหภูมิช่วง 727-910 องศาเซลเซียส คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนเฟสระหว่างออสเทนไนท์เป็นเฟอร์ไรท์ เมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

- เส้น A_{CM} คือ เส้นอุณหภูมิช่วง 727-1146 องศาเซลเซียส คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนเฟสระหว่างออสเทนไนท์เป็นซีเมนไตท์ เมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ตามการแบ่งแยกชนิดของเหล็ก โดยใช้แผนภาพสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์นั้นเป็นการแบ่งแยกโดยการยึดเอาโครงสร้างจุลภาคเป็นหลัก ซึ่งเป็นด้วยเหตุนี้สมาคมเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (American Iron and Steel Institute : AISI) และสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่ง

อเมริกา (American Society of Mechanical Engineering : ASME) จึงได้คิดค้นระบบในการแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าในการนำไปใช้งานโดยการกำหนดตัวเลขขึ้นมาใช้ในการเรียก 4 ตัว ให้ตัวเลขสองตัวแรกหมายถึงธาตุผสมหลักในเหล็กกล้า นั้น ขณะที่ตัวเลขสองตัวสุดท้ายหมายถึงปริมาณคาร์บอนในเหล็ก เช่น ตัวอย่าง เหล็กกล้า AISI1040 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 0.4 % (ตัวเลข 40) เหล็กกล้า SAE10120 คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (ตัวเลข 10) ที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 1.2 % (ตัวเลข 120) เป็นต้น ตัวอย่างของเหล็กกล้าชนิดต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบต์ [7]

นอกจากนั้นเหล็กกล้าสามารถแบ่งกลุ่มได้ตามส่วนผสมทางเคมีหรือรูปแบบการผลิตเหล็กกล้า นั้นๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้ เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณไม่เกิน 2% และประกอบไปด้วยซิลิกอนไม่เกิน 0.6% และแมงกานีสไม่เกิน

1.65% หรือเหล็กกล้าดีคาบูไรซ์ (Decarburized Steel) ที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.05% เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำพิเศษ (Ultra-Low Carbon Steel) คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณไม่เกิน 0.03% และซิลิกอนและแมงกานีสเล็กน้อย เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลักมีปริมาณ 0.04-0.15 % เป็นวัสดุในการทำตัวถังและโครงสร้างรถยนต์ และการใช้งานอื่นๆ มากมาย

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051

สัญลักษณ์	ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)				
	C	Si	Mn	P	S
S 10C	0.08-0.13	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 12C	0.10-0.15	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 15C	0.13-0.18	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 17C	0.15-0.20	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 20C	0.18-0.23	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 22C	0.20-0.25	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 25C	0.22-0.28	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 28C	0.25-0.31	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 30C	0.27-0.33	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 33C	0.30-0.36	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 35C	0.32-0.38	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.

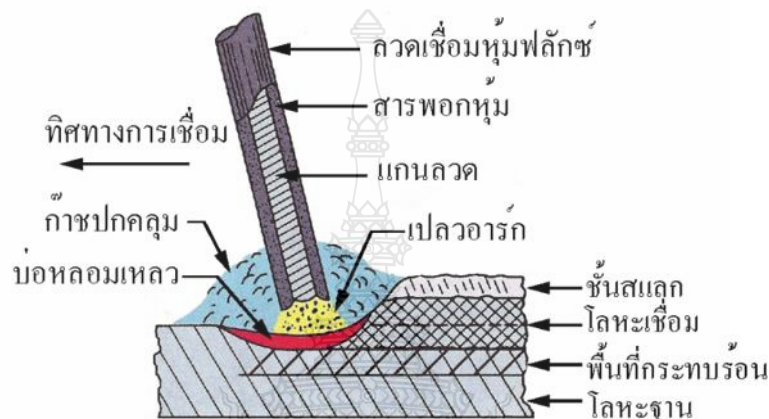
ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)				
	C	Si	Mn	P	S
S 40C	0.37-0.43	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 43C	0.40-0.46	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 45C	0.42-0.48	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 48C	0.45-0.51	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 50C	0.47-0.53	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 53C	0.50-0.56	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 55C	0.52-0.53	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 58C	0.55-0.61	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max.	0.035 max.
S 09C K	0.07-0.12	0.15-0.35	0.30-0.60	0.025 max.	0.025 max.
S 15C K	0.13-0.18	0.15-0.35	0.30-0.60	0.025 max.	0.025 max.
S 20C K	0.18-0.23	0.15-0.35	0.30-0.60	0.025 max.	0.025 max.

2.2 กระบวนการเชื่อมอาร์กเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [8]

วิทยา ทองขาว กล่าวว่า การเชื่อมโลหะ (Welding of Metal) คือการประสานโลหะเข้าด้วยกัน แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือการเชื่อมโดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว เรียก การเชื่อมหลอมเหลว (Fusion welding) และการใช้ความร้อนพร้อมกับแรงอัด เรียก การเชื่อมอัด (Press Welding)

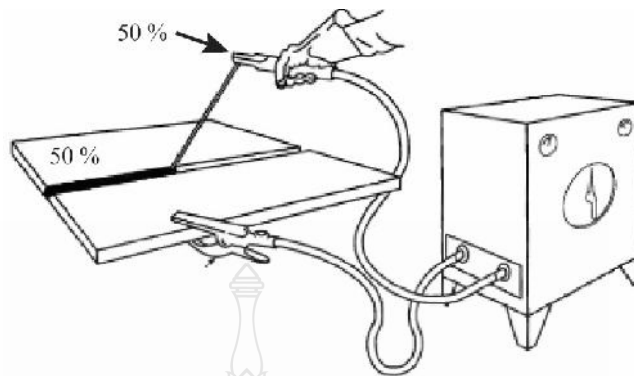
กระบวนการเชื่อมไฟฟ้า ด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding : SMAW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมเหลววิธีหนึ่ง ซึ่งใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งความร้อน โดยอาศัยหลักการอาร์กระหว่างปลายลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์กับโลหะงานความร้อนจากการอาร์กจะหลอมเหลวปลายลวดเชื่อมกับโลหะติดกัน โดยแกนของลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและเป็นโลหะเติมลงในแนวเชื่อมส่วนฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมจะได้รับความร้อนและหลอมละลายปกคลุมแนวเชื่อมเอาไว้



รูปที่ 2.2 กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [9]

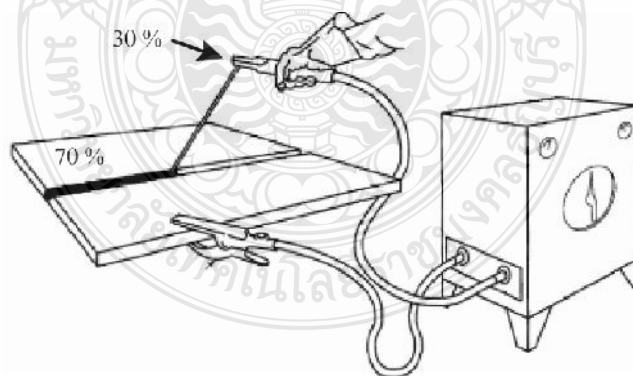
วัชรพงษ์ มุขเชิด [10] ได้อธิบายในงานวิจัยว่า วงจรพื้นฐานของการเชื่อมไฟฟ้า (Basic Arc Welding Circuit) กระแสไฟฟ้าได้ถูกจ่ายจากเครื่องเชื่อม ซึ่งเป็นต้นกำลังในการผลิตกระแสเชื่อมในวงจร โดยเครื่องเชื่อมจะจ่ายกระแสไปตามสายเชื่อมจนถึงชิ้นงานและลวดเชื่อม เพื่อให้เกิดการอาร์กขึ้นระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงาน อุณหภูมิในการอาร์กสูงประมาณ 3600 – 3870 องศาเซลเซียส การเชื่อมแบบอาร์กนี้สามารถใช้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ในการสร้างการอาร์กด้วยชนิดกระแสไฟฟ้าที่ต่างกันจะให้ผลที่แตกต่างกัน

กระแสสลับ (Alternation Current : AC) การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับในการเชื่อมจะทำให้สามารถทำการเชื่อมได้รวดเร็วกว่าการเชื่อมแบบกระแสตรง เพราะสามารถใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีข้อดีในการเชื่อมอื่น ๆ อีกเช่น การอาร์กมีกำลังสูงไม่เกิดอาร์กโบลว์ (Arc Blow) ควบคุมระยะอาร์กได้ง่าย และเกิดความร้อนสะสมที่ลวดเชื่อม 1/2 ส่วน และที่ชิ้นงานอีก 1/2 ส่วน เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าที่มีความหนาแน่นมากๆ เชื่อมบนโลหะที่มีสนิมได้ดี



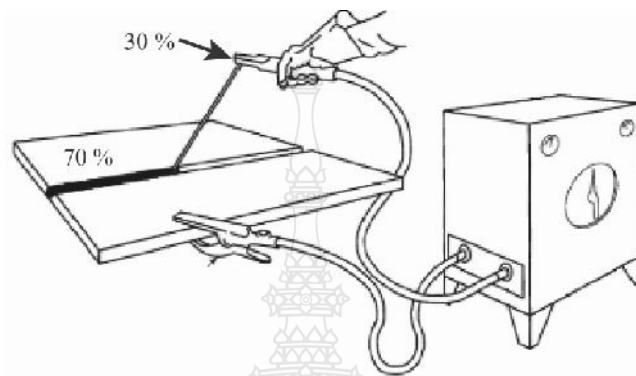
รูปที่ 2.3 สัดส่วนความร้อนที่เกิด แบบกระแสสลับ [11]

กระแสตรงต่อขั้วลบ DCEN (Direct Current Electrode Negative : DC-) การต่อขั้วไฟให้ลวดเชื่อมเป็นลบ (Direct Current Electrode Negative: DCEN) การต่อขั้วไฟลักษณะนี้อิเล็กตรอนจะไหลหรือเคลื่อนที่จากขั้วลบ (-) ของเครื่องเชื่อม ไปยังขั้วบวก (+) ดังนั้นเมื่อต่อขั้วลบเข้ากับลวดเชื่อม และขั้วบวกไว้กับชิ้นงาน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วลบผ่านลวดเชื่อมไปยังชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่ลวดเชื่อมประมาณ 1/3 ส่วน และเกิดความร้อนขึ้นที่ ชิ้นงานประมาณ 2/3 ส่วนของความร้อนเกิดขึ้นทั้งหมด การต่อขั้วไฟลักษณะนี้จะใช้กับลวดเชื่อมที่มีการหลอมละลายลึกปานกลาง



รูปที่ 2.4 สัดส่วนความร้อนที่เกิดกระแสตรงต่อขั้วลบ [11]

กระแสตรงต่อขั้วบวก DCEP (Direct Current Electrode Positive : DC+) การต่อขั้วไฟ
ลักษณะนี้อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านการอาร์กไปยังลวดเชื่อม ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่ลวด
เชื่อมประมาณ 2/3 ส่วนและเกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานประมาณ 1/3 ส่วนของ ความร้อนที่เกิดขึ้น
ทั้งหมดการต่อขั้วไฟลักษณะนี้จะใช้กับลวดเชื่อมที่มีการหลอมละลายลึกสูง



รูปที่ 2.5 สัดส่วนความร้อนที่เกิด กระแสตรงต่อขั้วบวก [11]

2.3 หน้าทีของวัสดุแกนลวดเชื่อมไฟฟ้า [8]

แกนลวดเชื่อมไฟฟ้านอกจากจะเป็นตัวหลอมละลายเติมเนื้อโลหะแก่บ่อหลอมแล้ว ยังทำ
หน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจากลวดเชื่อมไปยังชิ้นงานและเป็นตัวเขี่ยให้เกิดประกายอาร์ก ลวดเชื่อมต้องมี
สมบัติที่สำคัญคือเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าทำให้จุดประกายอาร์กได้ง่าย สะดวก และหลอมละลายได้ดี
วัสดุแกนลวดเชื่อมหลอมละลายรวมกลับวัสดุชิ้นงานในบ่อหลอม อัตราส่วนผสมของวัสดุแนวเชื่อม
จะมีเนื้อวัสดุชิ้นงาน 1 ส่วน วัสดุลวดเชื่อม 2 ส่วน สมบัติของวัสดุแนวเชื่อมต้องมีสมบัติเหมือนวัสดุ
แกนลวดเชื่อมและวัสดุชิ้นงานมากที่สุดนั่นก็คือ ธาตุที่เป็นโลหะและอโลหะที่ผสมอยู่ในลวดเชื่อม
รวมทั้งวัสดุชิ้นงานจะต้องไม่ถูกเผาไหม้ในบ่อหลอมจนทำให้เสื่อมคุณภาพ สูญเสียสมบัติ ในกรณีนี้
จะมีการสูญเสียเกิดขึ้นบ้างก็จะเป็นเพียงส่วนน้อยสารพอกหุ้มที่แกนลวดจะทำหน้าที่เพิ่มธาตุหรือ
สารประกอบขดเซซ การถูกเผาไหม้ขณะเชื่อมทำให้สมบัติของแนวเชื่อมและวัสดุชิ้นงานมีสมบัติ
เหมือนวัสดุก่อนการเชื่อมมากที่สุด

วัสดุช่วยงาน คือ วัสดุที่ใช้เติมลงไปบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อมพร้อมกับลวด
เชื่อม เพื่อให้สมบัติของโลหะภายหลังจากการเชื่อมดีขึ้น และรักษาสมบัติของโลหะเดิมไว้ วัสดุ

ช่วยงานอาจมีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ วัสดุช่วยงานบางชนิดทำให้สามารถเชื่อมได้สะดวกรวดเร็วได้แนวเชื่อมมีคุณภาพดี สวยงาม และแข็งแรงยิ่งขึ้น เช่น ผงเคมีเชื่อม (Flux) ใช้เป็นสารพอกหุ้มหรือฉีฉั่งหรือเชื้อประสาน (Flux) และแก๊สเฉื่อยคุณภาพสูงใช้เป็นแก๊สป้องกันแนวเชื่อมไม่ให้ทำปฏิกิริยากับอากาศ วัสดุช่วยงานใช้ป้อนให้แก่บ่อหลอมละลายพร้อมกับวัสดุเชื่อมในสภาพของสารพอกหุ้มลวดเชื่อมหรือสภาพของผงเคมีหรือแก๊สพ่นเข้าไปคลุมแนวเชื่อมขณะทำการเชื่อม

2.4 มาตรฐานลวดเติมที่ใช้สำหรับพอกผิวของเยอรมัน (DIN 8555 Part1 November1983) [12]

มาตรฐานลวดเชื่อมเติมประกอบด้วยลวดม้วนเติม (Filler Wire) ลวดแท่งเติม (Filler Rod) ลวดม้วนไฟฟ้า (Wire Electrodes) และลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ (Cover Electrode) ซึ่งลวดเติมทำด้วยเหล็กกล้าไม่ผสม , เหล็กกล้าผสม , โลหะผสมแข็ง , โลหะแข็งและโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็กที่ใช้สำหรับพอกผิวโลหะเหล็ก แบ่งประเภทส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และไส้ฟลักซ์ จะแบ่งประเภทตามสมบัติเคมีของเนื้อเชื่อม

2.4.1 การแบ่งประเภทลวดเติม

Rod และ Wire แบ่งประเภทส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และไส้ฟลักซ์ จะแบ่งประเภทตามสมบัติเคมีของเนื้อเชื่อม

1) โลหะเติมประเภทที่มีปริมาณเหล็กสูง

Alloy Group 1 โลหะเติมกลุ่มนี้ใช้สำหรับเชื่อมพอกผิวเหล็กกล้าไม่ผสมหรือเหล็กกล้าผสมต่ำหรือบริเวณที่ไม่ต้องการความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมเป็นพิเศษ ในกรณีนี้เนื้อเชื่อมจะไม่สามารถต้านทานการสึกหรอและเนื้อเชื่อมยังสามารถตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้อีกด้วย การนำไปใช้งาน: การเชื่อมเติมเนื้อและการเชื่อมรองพื้น

Alloy Group 2 โลหะเติมกลุ่มนี้มีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าโลหะผสมกลุ่ม 1 เพราะว่าโลหะเติมกลุ่มนี้มีโครงสร้างพื้นฐานแข็งกว่าและประกอบด้วยคาร์ไบด์ในเนื้อเชื่อม โดยปกติแล้วไม่สามารถตกแต่งเนื้อเชื่อมด้วยเครื่องจักรได้ การนำไปใช้งาน: ใช้เชื่อมพอกล้อวิ่ง

Alloy Group 3 โลหะเติมกลุ่มนี้โดยทั่วไปต้องการเนื้อเชื่อมที่มีความแข็งสูงที่อุณหภูมิสูง โดยปกติเนื้อเชื่อมจะมีธาตุ W , Cr และในบางครั้งจะผสม Mo , Ni , V และ Co อีกด้วย โดยทั่วไปเนื้อเชื่อมมีโครงสร้างเป็นมาเทนไซด์เนื้อเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนมาแล้วสามารถบดแต่งด้วยเครื่องจักรได้มีความแข็งขณะร้อน (Red Hardness) จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส การเชื่อมต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อมและให้เย็นตัวช้าๆ เพื่อป้องกันการแตกร้าว การนำไปใช้งาน : เครื่องมือใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Hot Working)

Alloy Group 4 โลหะเติมกลุ่มนี้มีส่วนผสมของธาตุคล้ายกับเหล็กกล้าไฮสปีด (High Speed Steel) เนื้อเชื่อมมีส่วนผสมของธาตุ W , Mo ,Cr และ V และในหลายกรณีจะเติมธาตุ Co ลงไปด้วย การบดแต่งด้วยเครื่องจักรจะทำได้เฉพาะเนื้อเชื่อมที่ผ่านการอบอ่อนแล้วเท่านั้น ยกเว้นแต่การบดแต่งด้วยการเจียรไน การชุบแข็งไม่มีความจำเป็น แต่ความแข็งจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการ Temper เนื้อเชื่อม 1 หรือ 2 ครั้ง การให้ความร้อนก่อนและหลังเชื่อมจะต้องทำตามคู่มือของผู้ผลิต การนำไปใช้งาน : เครื่องมือตัด , ไขมีดตัด , คมดอกเจาะ เป็นต้น

Alloy Group 5 โลหะเติมกลุ่มนี้มีส่วนผสมโครเมียมสูง 5-30% และมีคาร์บอนไม่เกิน 0.2% เนื้อเชื่อมมีความแข็งเพิ่มขึ้นด้วยการมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ การเชื่อมกระทำได้นบนโลหะที่มีส่วนผสมคล้ายกันและบนเหล็กกล้าโครงสร้างที่มีความแข็งแรงต่ำอีกด้วย โลหะเติมกลุ่มนี้ไม่อาจจะบดแต่งด้วยเครื่องจักรได้เสมอไป การให้ความร้อนก่อนและหลังเชื่อมกระทำตามคู่มือจากผู้ผลิต การนำไปใช้งาน : ใช้เชื่อมพอกผิวงานต่อต้านการเกิดสเกล (บรรยากาศแก๊สที่มีกำมะถัน) และเมื่อมีโครเมียมผสม 12 % หรือมากกว่าและยังจะป้องกันการเกิดสนิมอีกด้วย ได้แก่ งานชิ้นส่วนวาล์ว , ชิ้นส่วนของเตา

Alloy Group 6 โลหะเติมกลุ่มนี้คล้ายกับกลุ่มที่ 5 แต่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่สูง มีความแข็งสูงกว่า 500 HB และมีความต้านทานต่อการเกิดสนิมต่ำ เนื้อเชื่อมจะมีความแข็งในอากาศ (Air Hardening) และการทำงานจะทำให้เฉพาะการเจียรไนเท่านั้น การเชื่อมควรให้ความร้อนก่อนเชื่อม 200-300 องศาเซลเซียส การนำไปใช้งาน : เครื่องมือตัด , ไขมีด และลูกกรัดสำหรับการรีดเย็น

Alloy Group 7 โลหะเติมกลุ่มนี้มีเนื้อเชื่อมคล้ายเหล็กกล้าแมงกานีสและยังมีธาตุอื่นๆ เนื้อเชื่อมชนิดนี้เหมาะกับงานประเภท Work Hardening คือ จะต้องมีความแข็งแรงที่จะเกิดความแข็งหรือความแข็งแรงจากการใช้งานความแข็งเริ่มจาก 180 จนถึง 550 HB แต่ไม่เหมาะกับงานที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหรอจากการเสียดสีเนื้อเชื่อมโดยปกติจะไม่บดแต่งด้วยเครื่องจักร ถ้า

กระทำจะต้องใช้เครื่องมือที่เป็นโลหะแข็งชิ้นงานที่นำมาเชื่อมขณะเชื่อมจะต้องรักษาให้เย็นเท่าที่จะเย็นได้ เพื่อให้ได้ผลของความเหนียวหยุ่น (Toughness) เป็นที่พอใจ การนำไปใช้งาน : เชื่อมเสริมผิวในกรณีพื้นที่ใหญ่ ได้แก่ แผ่นกันสีก เป็นต้น

Alloy Group 8 โลหะเติมกลุ่มนี้ให้เนื้อเชื่อมมีความเหนียวสูงกว่ากลุ่ม 7 ทำให้แข็งโดย Work Hardening ได้ดีมีความต้านทานต่อการเกิดสนิมไม่ต้องทำการอบชุบ , ตบแต่งด้วยเครื่องจักรได้ , ไม่เป็นแม่เหล็ก การนำไปใช้งาน : ส่วนประกอบของฟินบดหินที่รับภาระไม่รุนแรง , รางรถไฟ

Alloy Group 9 โลหะเติมกลุ่มนี้มีส่วนผสมเทียบเท่าลวดเชื่อม Ni-Cr ออสเทนไนต์ สามารถใช้เชื่อมกับเหล็กกล้าชนิดเดียวกัน , เหล็กโครเมียมและเหล็กกล้าโครงสร้างทั่วไป เนื้อเชื่อมมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนดีเนื้อเชื่อมสามารถทำการขึ้นรูปเย็นและมีความเหนียวสูงยังสามารถตบแต่งด้วยเครื่องจักรได้ การนำไปใช้งาน : ใช้เชื่อมพอกงานที่ทนต่อการกัดกร่อนหรือทนความร้อน

Alloy Group 10 เนื้อเชื่อมที่ได้จากลวดเชื่อมกลุ่มนี้คล้ายกับเหล็กกล้าโครเมียมที่เพิ่มคาร์บอนและจะเกิดหรือไม่เกิดการก่อตัวของคาร์ไบด์ก็ได้ ปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ 2-7% ส่วนโครเมียมไม่เกิน 40 % เนื้อเชื่อมจะมีคาร์ไบด์แทรกอยู่ใน โครงสร้างออสเทนไนต์ความแข็งของเนื้อเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอน แต่จะไม่เพิ่มด้วยการอบชุบด้วยความร้อนเนื้อเชื่อมจะตบแต่งได้ ด้วยการเจียรในเท่านั้นถ้าให้ความร้อนก่อนเชื่อมจะช่วยลดความไวต่อการแตกร้าว เนื้อเชื่อมทนต่อการสึกหรอ การนำไปใช้งาน : ใช้สำหรับการเชื่อมซ่อมงานในเหมืองแร่และโรงงานเหล็ก เชื่อมพอกชิ้นส่วนเครื่องจักรก่อสร้าง และเครื่องจักรกลเกษตร

2) โลหะเติมที่มีปริมาณเหล็กต่ำ

Alloy Group 20 โลหะเติม Co-Cr มีความต้านทานต่อการสึกหรอ , การกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงดี คุณสมบัติเด่นอีกประการหนึ่งคือความแข็งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส การเชื่อมจะต้องใช้ความร้อนก่อนเชื่อม 400-600 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้นให้เย็นตัวช้าๆ และไม่จำเป็นต้องทำการอบชุบด้วยความร้อน การนำไปใช้งาน : งานประกอบทุกชนิด , บ่าวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์สันดาปภายใน , บ่าวาล์วเครื่องจักรไอน้ำ , เพล่าปั๊มและชิ้นส่วนที่มีการกัดกร่อนและการเซาะกร่อนรุนแรง (Erosion)

Alloy Group 21 สมบัติของเนื้อเชื่อมที่ได้จากโลหะเติมกลุ่มนี้ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของโครเมียมคาร์ไบด์และทังสเตนคาร์ไบด์ โดยปกติจะนำผงโลหะโครเมียมคาร์ไบด์และทังสเตนคาร์ไบด์ อัดขึ้นรูปเป็น Rod หรือ Core Wire เพื่อนำมาเชื่อม เนื้อเชื่อมมีความสามารถต้านทานการสึกหรอดี ส่วนความเหนียวขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของคาร์ไบด์ที่ผสมอยู่ในวัสดุพื้นที่ทำหน้าที่ยึดเกาะ การเชื่อมจะต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อม 400-600 องศาเซลเซียส และไม่ต้องทำการอบชุบด้วยความร้อน การนำไปใช้งาน : เครื่องมือและชิ้นส่วนเครื่องจักรที่นำไปใช้กับงานขุดหิน , ดอกเจาะ และสกรูอัด สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก

Alloy Group 22 เนื้อเชื่อมที่ได้จากโลหะเติม Ni-Cr-B มีความต้านทานต่อการสึกหรอที่เกิดจากการขัดสีของโลหะและมีความแข็งที่อุณหภูมิสูง ความแข็งที่อุณหภูมิห้องเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ C , Cr และ B คือความแข็งตั้งแต่ 30-60 HRc เนื้อเชื่อมสามารถงานกับอุณหภูมิสูงจนถึง 500 องศาเซลเซียส การเชื่อมจะต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อม 400 องศาเซลเซียส และไม่ต้องทำการอบชุบด้วยความร้อน การนำไปใช้งาน : วาล์ว , สกรูเกลียวหอน , เพลาปั๊มคอนกรีตเหลวและปั๊มชนิดอื่นๆ

Alloy Group 23 โลหะเติมชนิด Ni-Cr-Mo มีสมบัติในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ดี การเพิ่มความแข็งแรงกระทำได้โดยการอบชุบความร้อนที่ถูกต้อง การนำไปใช้งาน : เครื่องมือสำหรับงานขึ้นรูปร้อน , หน้าสัมผัสของบ่าวาล์วในอุตสาหกรรมเคมี , และใช้เชื่อมเสริมใบมีดตัดงานที่อุณหภูมิสูง

3) โลหะเติมนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous Filler Metals)

Alloy Group 30 โลหะเติมกลุ่มนี้เป็นโลหะผสมทองแดง-ดีบุก ประกอบไปด้วย 6-12% Sn และฟอสฟอรัส 0.5% ความแข็งของเนื้อเชื่อมพอกอยู่ระหว่าง 60-130 HB และขึ้นอยู่กับปริมาณผสมของ Sn โลหะผสมกลุ่มนี้มีความต้านทานต่อ Sliding Wear สูง , มีความต้านทานต่อการละลายเกลือและกรด การนำไปใช้งาน อาทิ : เปลือกแบร์ริง , เพลา , เกจวาล์ว , วาล์ว , เสื้อหุ้ม , เฟืองหอน และเฟืองเฉียง

Alloy Group 31 โลหะเติมกลุ่มนี้มีอลูมิเนียมผสมหลัก 5-15% สำหรับเนื้อโลหะผสม 2 ธาตุ จะมีความแข็ง 100-200 HB และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน สมบัติทางกล , ความต้านทานต่อการกัดกร่อนและสมบัติต่อการนำไปทำงาน ขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุผสมเติมลงไป ได้แก่ Fe , Ni และ Mn

Alloy Group 32 โลหะเติมกลุ่มนี้เป็นโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล ที่ประกอบด้วยนิกเกิล 5-45% , เหล็กผสมจนถึง 1.5% และแมงกานีสผสมจนถึง 3.5% ความแข็งสูงขึ้นไปจนถึง 160 HB เนื้อเชื่อมมีความต้านทาน Stress Corrosion Creking โดยเฉพาะต้านทานต่อน้ำทะเล การนำไปใช้งาน : เครื่องกลั่นน้ำ , ท่อน้ำทะเล , คอนเดนเซอร์ , เครื่องเคมีและตัวระบายความร้อน

2.4.2 รหัสอักษรที่เกี่ยวกับโลหะเติม

สัญลักษณ์ลวดเชื่อมมุ่งหวังเพื่อให้ความสะดวกในการเลือกและการใช้ลวดเติม และ ยับยั้งซึ่งคุณสมบัติของผิวเนื้อเชื่อม

1) รหัสแสดงกระบวนการเชื่อม

- G การเชื่อมแก๊ส
- E การเชื่อมอาร์คด้วยมือ MF Metal-Arc Welding ใช้ลวดใส่ฟลักซ์
- TIG การเชื่อม TIG MSG Metal Shielding Gas Welding (มิก)
- UP การเชื่อมใต้ฟลักซ์

2) รหัสแสดงกลุ่มของธาตุผสม

Alloy Group	ชนิดของโลหะเติมหรือเนื้อเชื่อม
1	เหล็กกล้าไม่ผสมมีคาร์บอนสูงขึ้นไปจนถึง 4% หรือเหล็กกล้าผสมต่ำที่มีคาร์บอนสูงจนถึง 0.4% และธาตุผสมอื่นๆ รวมกันไม่เกิน 5% ได้แก่ ธาตุ Cr , Mn , Mo และ Ni
2	เหล็กกล้าไม่ผสมมีคาร์บอนผสมมากกว่า 0.4% หรือเหล็กกล้าผสมต่ำที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.4% และธาตุผสมอื่นๆ รวมกัน ไม่เกิน 5% ได้แก่ ธาตุ Cr , Mn , Mo และ Ni
3	โลหะผสมที่มีสมบัติของเหล็กกล้าใช้งานร้อน(Hot Working)
4	โลหะผสมที่มีสมบัติของ High Speed Steel
5	โลหะผสมที่มีโครเมียมมากกว่า 5% และคาร์บอนผสมต่ำไม่เกิน 0.2%
6	โลหะผสมที่มีโครเมียมมากกว่า 5% และคาร์บอนผสมสูงประมาณ 0.2-20%

7	โลหะแมงกานีส(ออนเทนไนต์) แมงกานีส 11-18% , คาร์บอนมากกว่า 0.5% และนิเกิลไม่เกิน 3%
8	Cr - Ni -Mn (ออนเทนไนต์)
9	เหล็กกล้า Cr – Ni (มีความต้านทานต่อสนิม,กรดและความร้อน)
10	เหล็กกล้าผสมคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง โดยไม่ผสมคาร์ไบด์
20	โลหะผสมโคบอลต์หลัก , ธาตุผสม Cr-W อาจเติมหรือไม่เติม Ni และ Mo
21	โลหะผสมคาร์ไบด์ในรูปแบบต่าง ได้แก่ อัดโลหะผง , หล่อหรือแกนลวด
22	โลหะผสมนิเกิลหลัก , ธาตุผสม Cr , Cr-B
23	โลหะผสมนิเกิลหลัก , ธาตุผสม Mo อาจผสมหรือไม่ผสมโครเมียม
30	โลหะผสมทองแดงหลัก ธาตุผสมดีบุก
31	โลหะผสมทองแดงหลัก ธาตุผสมอลูมิเนียม
32	โลหะผสมทองแดงหลัก ธาตุผสมนิเกิล

3) รหัสอักษรระบุนุกรมวิธีการผลิตโลหะเติม

วิธีการผลิตโลหะเติมกำหนดด้วยสัญลักษณ์ต่อไปนี้

GW	การรีด
GO	การหล่อ
GZ	การดึงลดขนาด
GS	การอัดด้วยโลหะผง
GF	แกนลวดมีไส้
UM	แกนลวดมีฟลักซ์หุ้มภายนอก

4) หมายเลขรหัสระบุระดับความแข็ง

แสดงถึงระดับความแข็งของเนื้อเชื่อมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อน การปรับปรุงด้วยความร้อนทำตามคำแนะนำของผู้ผลิตโลหะเติมที่กำหนดให้สำหรับค่าความแข็งเป็นค่าความแข็งของเนื้อเชื่อมที่เกิดจาก ลวดเชื่อมกับฟลักซ์หรือลวดเชื่อมกับแก๊สคลุม ฟลักซ์และแก๊สคลุมต้องระบุไว้ให้แน่นอน เนื่องจากถ้ามีการเปลี่ยนฟลักซ์และแก๊สคลุมจะทำให้ค่าของความแข็งเปลี่ยนไปด้วย

5) รหัสอักษรแสดงสมบัติของเนื้อเชื่อม

ถ้าหากจำเป็นต้องใช้อักษรมากกว่า 1 ตัว ให้จัดเรียงตามลำดับอักษร

C = ความต้านทานการกัดกร่อน

G = ความต้านทานการสึกหรอจากการขัดสี

K = ความสามารถในการเพิ่มความแข็ง โดยมีแรงกระทำ (Work Hardening) จากการใช้งาน ได้แก่ แรงกด , แรงรีดหรือแรงกระแทก (ตัวอย่าง เหล็กกล้าแมงกานีสผสมสูง)

N = ไม่เป็นแม่เหล็ก

P = ต้านทานแรงกระแทก

R = ต้านทานการเกิดสนิม

S = ความสามารถในการตัด (เหล็กกล้าไฮสปีด)

T = มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ได้แก่ เหล็กกล้าเครื่องมือใช้งานอุณหภูมิ

Z = ใช้อุณหภูมิสูง (ไม่เกิดสเกล) ใช้งานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

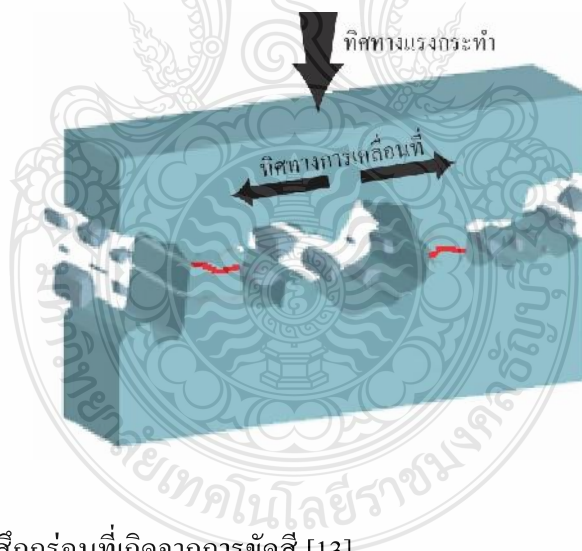
สมบัติของเนื้อเชื่อมอาจขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการปรับปรุงด้วยความร้อนที่กำหนดให้โดยผู้ผลิต

2.5 รูปแบบการเกิดการสึกกร่อน [13]

ในหลายภาคอุตสาหกรรมได้ประสบปัญหาการสึกกร่อนในพื้นที่ผิวโลหะ เนื่องจากปัญหาการสึกกร่อนเป็นปัญหาสำคัญที่จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนชิ้นส่วนที่เกิดการสึกกร่อนและเสียเวลาเนื่องจากการหยุดการทำงานของอุปกรณ์ การสึกกร่อนของพื้นผิวที่เป็นปัญหาในหลายอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลมาจาก การขัดสี , การกระแทก , การกัดเซาะและการกัดกร่อน

2.5.1 การสึกกร่อนจากการขัดสี (Adhesive Wear)

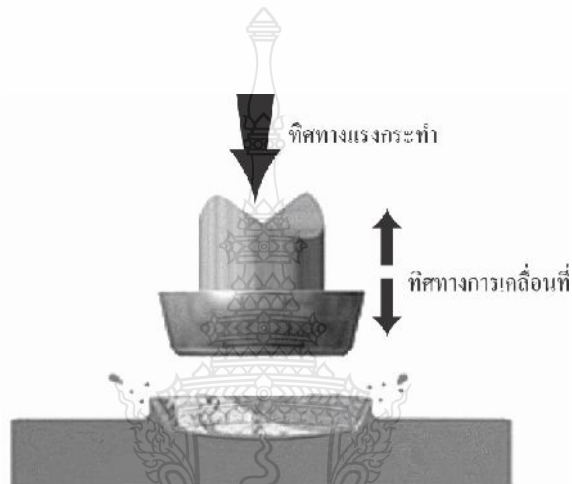
การขัดถูที่รอยต่อระหว่างสองพื้นผิวเคลื่อนที่สททางตรงข้ามกันภายใต้แรงกระทำบ่อยครั้งที่เกิดความเครียดที่มีค่าสูงกว่าพื้นผิวของตัววัสดุที่จะรองรับได้ ในกรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่น เศษวัสดุที่หลุดร่อนออกมาจะหลอมละลายไปติดกับตัววัสดุทำให้เกิดเป็นรอยขีดข่วนใหม่ กลไกการสึกกร่อนไม่เพียงแต่ทำลายพื้นผิวยังรวมไปถึงการสึกกร่อนที่ทำให้เกิดโพรงอากาศและยังสามารถนำไปสู่ข้อบกพร่องของส่วนประกอบอื่นๆ



รูปที่ 2.6 ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดจากการขัดสี [13]

2.5.2 การสึกกร่อนที่เกิดจากแรงกระแทก (Impact Wear)

เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนของเครื่องจักรอาจจะเกิดการกระทบของพื้นผิวโลหะมักจะนำไปสู่ความอ่อนล้าของวัสดุ เมื่อทั้งสองพื้นผิวสัมผัสกันสามารถทำให้เกิดข้อบกพร่อง ผลกระทบเหล่านี้จะเป็นไปตามหลักการกระทำที่ส่งผลของความเครียดในพื้นผิวด้านล่างดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดจากแรงกระแทก [13]

2.5.3 การสึกกร่อนจากการกัดเซาะ (Abrasive Wear)

การเสียดสีของพื้นผิววัสดุ โดยเกิดจากการขัดถู , การบด จะทำให้เกิดแรงเสียดทาน และเกิดการสึกกร่อน สิ่งทีกล้ำวมาเหล่านี้จะเกิดเมื่อวัสดุที่มีความแข็งสูงเสียดทานกับวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่า สาเหตุมักเกิดจากการกระทำการขัดถูของเม็ดทรายที่ตะกรันและวัสดุอื่นๆ



รูปที่ 2.8 ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดจากการกัดเซาะ[13]

2.5.4 การสึกกร่อนจากการกัดกร่อน (Erosion)

การกัดกร่อนเป็นการสึกกร่อนหรือการทำลายบนพื้นผิวโลหะและวัสดุอื่นๆ โดยเกิดจากการกระทำจากการกัดกร่อนของของเหลว, ไออน้ำ ที่มีฤทธิ์กัดกร่อน การสึกหรอประเภทนี้มักเกิดกับชิ้นส่วนปั๊มจากการกระแทกของอนุภาคของแข็งที่ปะปนในของเหลวหรือแก๊ส มักจะทำให้เกิดสิ่งที่เรียกว่าการกัดเซาะในเนื้อวัสดุและชิ้นส่วนดังแสดงในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดจากการกัดกร่อน[13]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาอิทธิพลตัวแปรในงานเชื่อม ที่มีผลต่อสมบัติ ทางโลหะวิทยา สมบัติทางกลของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งบนวัสดุต่าง ๆ เช่น

Buchanan *et.al.* [14] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการสึกกร่อน (Wear) ของรอยเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอ้อย โดยทำการเชื่อมพอกด้วยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของเหล็กกล้าผสม Fe-Cr-C ที่มีโครงสร้างไฮโปและไฮเปอยูเทคติก และทำการเชื่อมพอกผิวลงบนเหล็กหล่อสีเทาด้วยลวดเชื่อม 2 เกรด และทำการตรวจสอบพฤติกรรมการสึกกร่อนของผิวพอกแข็งโดยการออกแบบเป็นลักษณะล้อหมุนซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมการหีบอ้อย ผลการทดลองพบว่าลวดเชื่อมไฮเปอยูเทคติกให้ความต้านทานการสึกกร่อนได้ดีกว่าลวดเชื่อมไฮโปยูเทคติก ค่าความแข็งที่เหมาะสมที่สุดพบได้กับการเชื่อมในชั้นเชื่อมชั้นแรก พฤติกรรมการสึกกร่อนนั้นไม่มีความแตกต่างกันในทุกๆ สภาวะ กลไกการเกิดการสึกกร่อนเกิดจากการหลุดออกมาเป็นชั้นๆ และการแตกร้าวของผิวงาน

Selvi *et.al.* [15] ทำการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์บนวงแหวนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ A216-WCB ด้วยลวดเชื่อม E410 E430 และ Modified E340 ที่ผ่านการอบที่ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง การเชื่อมเป็นการเชื่อมข้ามแนว 3 ชั้น และไม่มีการสายแนวเชื่อม ชิ้นงานเชื่อมที่ได้ถูกนำไปทำการทดสอบการสึกกร่อน ทดสอบความแข็ง และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่าความแข็งของแนวเชื่อมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการตรวจสอบห่างออกจากผิวพอกแข็ง ปริมาณคาร์บอนในลวดเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการสึกกร่อนเพิ่มขึ้น และลวดเชื่อม Modified E340 ให้การสึกกร่อนน้อยที่สุดปริมาณ โครเมียมที่เพิ่มขึ้นทำให้เม็ดเกรนมีขนาดละเอียดเพิ่มขึ้น มีความเป็นเกรนคอลลัมนาเพิ่มขึ้น และลดปริมาณและขนาดของเกรนหยาบลง

Yang *et.al.* [4] ได้ทำการศึกษาการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์โดยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของตัวประสานภายใน แผ่นเหล็กกล้าถูกนำมาทำการเชื่อมเดินแนวและซ้อนทับเป็นชั้น ชิ้นงานถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือกลุ่มในสภาพเชื่อม และกลุ่มที่ 2 ถูกนำไปทำการอบชุบตามสภาวะที่กำหนด ชิ้นทดสอบทั้ง 2 กลุ่มถูกนำไปทำการตรวจสอบหาค่าคาร์ไบไนไตรด์ และตรวจสอบความต้านทานการสึกกร่อน ผลการทดลองพบว่า คาร์ไบไนไตรด์ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างโครเมียม ไททาเนียม และนีโอเบียมในผิวพอกแข็ง มีขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวอย่างแตกต่างกันในงานทั้งสองแบบ ในชิ้นงานสภาพเชื่อมเฟสคาร์ไบไนไตรด์มี

การตกผลึกมีขนาดประมาณ 1-3 ไมโครเมตร ขณะที่ในชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบมีขนาดผลึกที่ละเอียดกว่าในระดับนาโนและมีการกระจายเนื้อเดียวมากกว่า ตำแหน่งที่มีปริมาตรของคาร์ไบด์สูงแสดงค่าอัตราการสึกกร่อนที่ต่ำกว่า

Buchely *et.al.* [3] ทำการเชื่อมอาร์ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็งเหล็กกล้า ASTM A36 แบบไม่มีชั้นรองผิว จำนวน 3 ชั้น ด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ 3 ชนิด และทำการตรวจสอบสมบัติของรอยเชื่อม คือ การทดสอบความแข็ง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนตาม ASTM G65 ผลการทดลองพบว่า ลวดเชื่อมที่มีทั้งสะเตนปริมาณสูงแสดงความต้านทานการสึกกร่อนสูงสุดที่การเชื่อมเพียง 1 ชั้น เนื่องจากรวมตัวที่ดีของการเกิดเฟส M_6C ที่แข็งในพื้นที่หลักโครงสร้างยูเทคติก เฟส M_7C_3 คือเฟสที่เป็นตัวยับยั้งการเกิดการสึกกร่อน

Coronado *et.al.* [16] ทำการเชื่อมอาร์ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์และการเชื่อมอาร์ลวดเชื่อมที่มีตัวประสานภายใน (Flux Cored Arc Welding: FCAW) แบบเดินแนวเดียวไม่มีการส่ายลวดเชื่อมบนพื้นผิวเหล็กกล้า A36 แผ่นโลหะที่ผ่านการเชื่อมถูกนำไปทำการตรวจสอบหาอัตราการสึกกร่อนตาม ASTM G65 และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองพบว่าผิวพอกแข็งการเชื่อมอาร์ลวดเชื่อมที่มีตัวประสานภายในแสดงความต้านทานการด้านการสึกกร่อนสูงกว่าผิวพอกแข็งการเชื่อมอาร์ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ผิวพอกแข็งชนิด B การเชื่อมอาร์ลวดเชื่อมที่มีตัวประสานภายในแสดงความต้านทานการด้านการสึกกร่อนสูงสุดในการทดลองนี้ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่หลักยูเทคติกและเฟสคาร์ไบด์ที่มีปริมาณไททาเนียมสูงที่ทำหน้าที่ยับยั้งการสึกกร่อน ผิวพอกแข็งชนิด D ของการเชื่อมอาร์ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์แสดงการสึกกร่อนสูงสุด การทดลองแสดงให้เห็นว่าความแข็งและความต้านทานการสึกกร่อนไม่มีความสัมพันธ์กัน การเกิดลักษณะนี้เนื่องจากเฟสคาร์ไบด์และพื้นที่หลักมีความสำคัญต่อการสึกกร่อนมากกว่าความแข็งของผิวพอกแข็ง

การศึกษาผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษางานเชื่อมบนผิวเหล็กผสม Fe-Cr-C, เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และเหล็กหล่อสีเทา โดยทำการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของปริมาณธาตุที่ต่างกันและได้มีการศึกษาอิทธิพลตัวแปรในงานเชื่อมพอกผิวที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกล

บทที่ 3

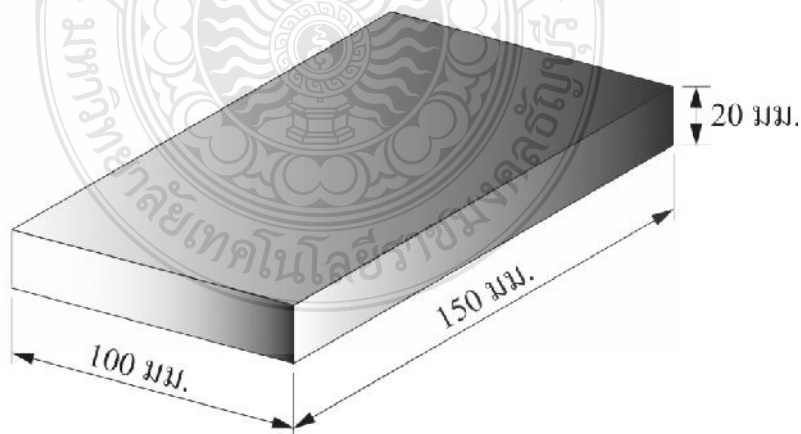
วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษากรรมวิธีการเชื่อม (Shielded Metal Arc Welding : SMAW) โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (JIS S50C) และใช้ลวดเชื่อมอาร์ก (Arc Welding Electrode) ชนิดพอกผิวแข็งโดยแบ่งออกเป็นชั้นทดลองที่มีการสร้างชั้นรองพื้นและชั้นที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น เป็นชั้นทดลองเชื่อม ลักษณะการเชื่อมจะทำการเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นจำนวน 3 ชั้น การเชื่อมจะใช้แบบ (Manual Metal Arc : MMA) จากผู้ที่มีความชำนาญในการเชื่อม หลังจากนั้นนำชั้นทดลองเชื่อมไปทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา การวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (JIS S50C) ที่มีส่วนเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนถูกตัดให้มีลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้าง 100 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตรและความหนา 20 มิลลิเมตร ดังแสดงรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลอง

3.1.2 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)

วัสดุลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยลวดเชื่อม 2 ประเภท คือ ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer Electrode) เป็นลวดประเภท ไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen Electrode) และลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็ง (Hard-Facing Layer Electrode) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั้ง 2 ชนิด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ความยาว 350 มิลลิเมตร มีส่วนผสมเคมีดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Material type	Chemical composition (%)						
	Standard	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr
Medium carbon steel	JIS G 4051 S50C	0.52	0.35	0.99	0.04	0.04	0.20
Buffer electrodes	JIS Z 3212 : D5016	0.07	0.62	1.18	0.01	-	0.01
Hardfacing electrodes	JIS Z 3251 : DF2B-600-B	0.45	0.5	1.15	0.6	-	5.0

3.1.3 เครื่องเชื่อม Gas Metal Arc Welding (GMAW)

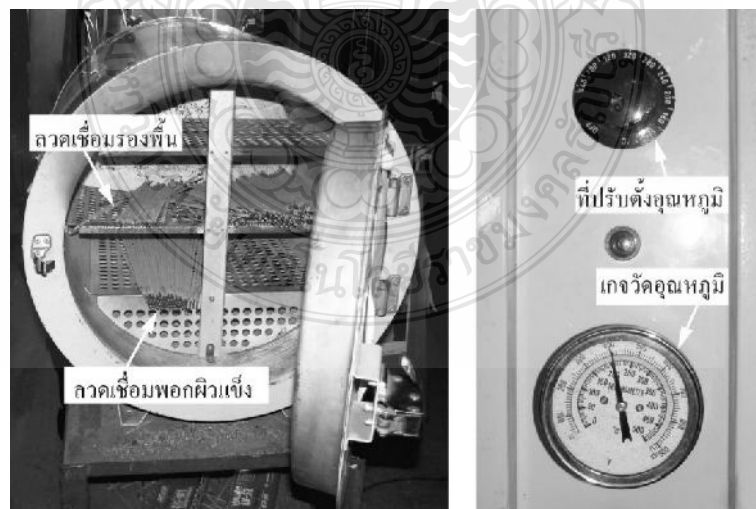
เครื่องเชื่อมชนิดกระแสคงที่ (Constants Current : CC) ที่ใช้ในการทดลองมีเครื่องหมายการค้า ยี่ห้อ KEMPPPI Master TIG AC-DC 2500 แสดงดังรูปที่ 3.2 เป็นเครื่องเชื่อมทิก (TIG) ระบบอินเวอร์เตอร์สามารถเชื่อมได้ทั้ง ระบบการเชื่อมทิก (TIG) และการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (MMA) โดยในการทดลองนี้จะเลือกใช้การเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (MMA)



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

3.14 ตู้อบลวดเชื่อม

ตู้อบที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถปรับตั้งอุณหภูมิได้ที่สวิตช์และมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 120-440 องศาเซลเซียส ลูกศรสีขาวยังอยู่ในรูปที่ 3.3 และสามารถอ่านค่าของอุณหภูมิความร้อนได้ที่เกจตรวจจับอุณหภูมิดังลูกศรสีขาวยังอยู่ในรูปที่ 3.3 สำหรับการอบแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และทำการอบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั้ง 2 ชนิด ที่อุณหภูมิ 300-350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เพื่อกำจัดความชื้นออกจากลวดเชื่อมและวัสดุทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.3



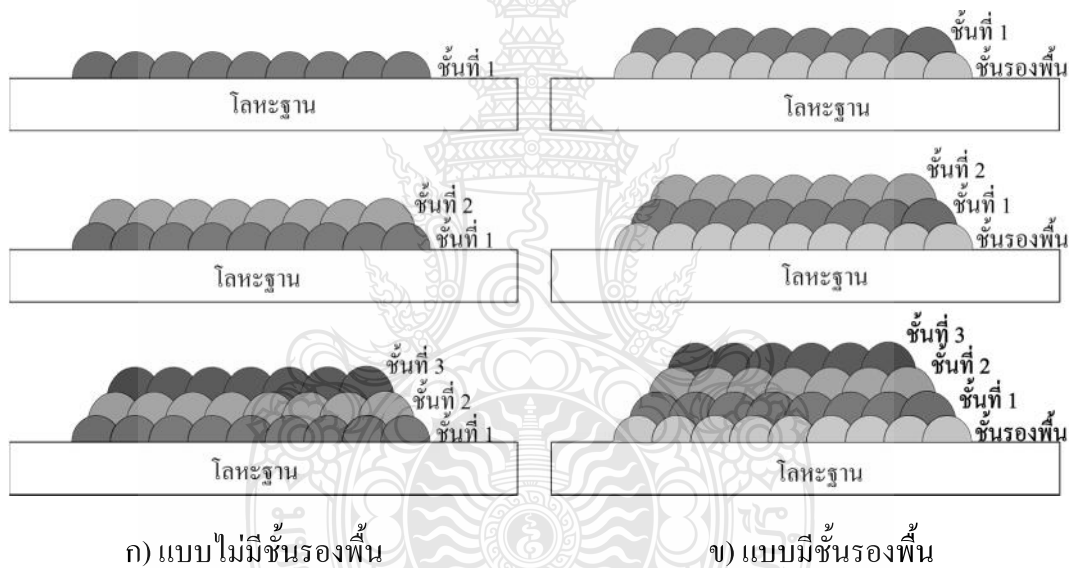
รูปที่ 3.3 ตู้อบลวดเชื่อมที่ใช้ในการวิจัย

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองการเชื่อมพอกผิวแข็งลงบนเหล็กกล้า โดยสามารถแบ่งตัวแปรในการเชื่อมและการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและดำเนินการทดลองรายละเอียดมีดังนี้

3.2.1 ตัวแปรในการทดลองการเชื่อมพอกผิวแข็ง

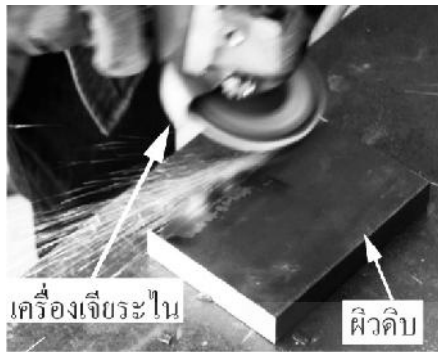
- 1) กระแสเชื่อมของชั้นพอกผิวแข็งใช้กระแสที่ 65, 90, 115, 140 และ 165 แอมแปร์
- 2) จำนวนชั้นของชั้นพอกผิวแข็ง 1, 2 และ 3 ชั้น
- 3) การเชื่อมแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ดังแสดงรูปที่ 3.4 คือแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นด้วยลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น



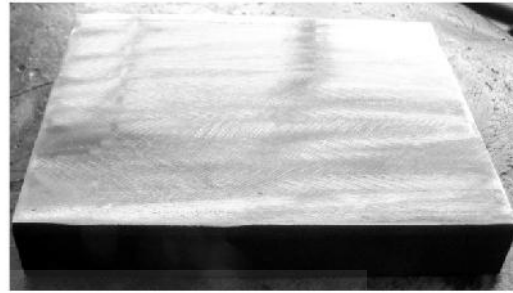
รูปที่ 3.4 การเชื่อมแบบมีรองพื้นและแบบไม่มีรองพื้น (ก) แบบไม่มีชั้นรองพื้น (ข) แบบมีชั้นรองพื้น

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดลอง

- 1) ผิวหน้าด้านบนของเหล็กกล้าคาร์บอนถูกนำมาขัดละเอียดด้วยเครื่องเจียรระโนมือเพื่อกำจัดผิวดิบของเหล็กกล้า โดยใช้เครื่องเจียรระโนมือมีเครื่องหมายการค้า MAKTEC MT958 และมีความเร็วรอบ 11,000 รอบต่อนาที และใช้ใบกระดาษทรายซ็อนเบอร์ 180 ขนาด 4 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก)



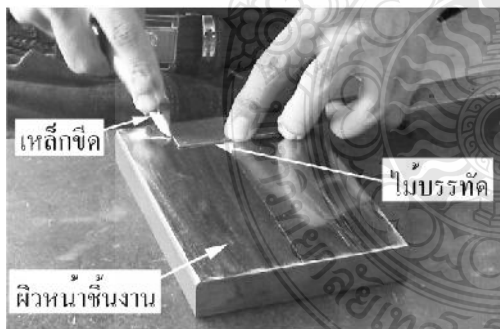
ก) การเจียรระโนผิวหน้า



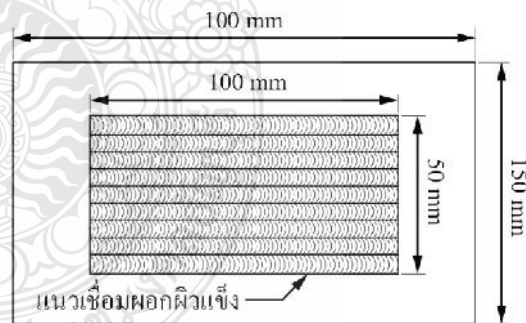
ข) ชิ้นที่ได้ทำการเจียรระโนผิวหน้า

รูปที่ 3.5 การเจียรระโนผิวดิบของแผ่นเหล็กกล้า (ก) การเจียรระโนผิวหน้า (ข) ชิ้นที่ได้ทำการเจียรระโนผิวหน้า

2) เมื่อได้ทำการเจียรระโนผิวดิบของเหล็กกล้าคาร์บอนตามขั้นตอนที่ 1 แล้วเสร็จแล้วขั้นตอนต่อไปคือ การสร้างขอบเขตบนผิวเหล็กกล้าโดยใช้เหล็กขีดทำสัญลักษณ์บนผิวของเหล็กกล้าดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) โดยให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนานกับแผ่นเหล็กกล้าโดยมีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน JIS Z3114 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ข)



ก) การสร้างขอบเขตแนวเชื่อม



ข) ระยะเวลาขอบเขตแนวเชื่อม

รูปที่ 3.6 ขอบเขตในเชื่อมผกผิวแข็ง (ก) การสร้างขอบเขตแนวเชื่อม (ข) ระยะเวลาขอบเขตแนวเชื่อม

3.2.3 ขั้นตอนการทดลองเชื่อม

ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของปริมาณกระแสเชื่อมในการสร้างชั้นรองพื้นที่ 100 แอมแปร์ และปริมาณกระแสเชื่อมในการสร้างชั้นพอกผิวแข็งที่ 65,90,115,140 และ165 แอมแปร์ ตามลำดับ กำหนดให้มีอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน (Pre-Heat Temperature) ก่อนการเชื่อมที่ 150 องศาเซลเซียส การเชื่อมเป็นแบบเดินแนว (Autogeneous Welding) บนผิวของแผ่นเหล็กกล้าโดยไม่สายลวดเชื่อม (Non waving) ทิศทางการเชื่อมขนานกับด้านความยาวของแผ่นเหล็ก โดยช่างเชื่อมที่ผ่านการสอบวัดฝีมือจากสถาบันพัฒนาฝีมือและแรงงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคมในระดับที่ 1 และใช้ท่าราบในการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.7

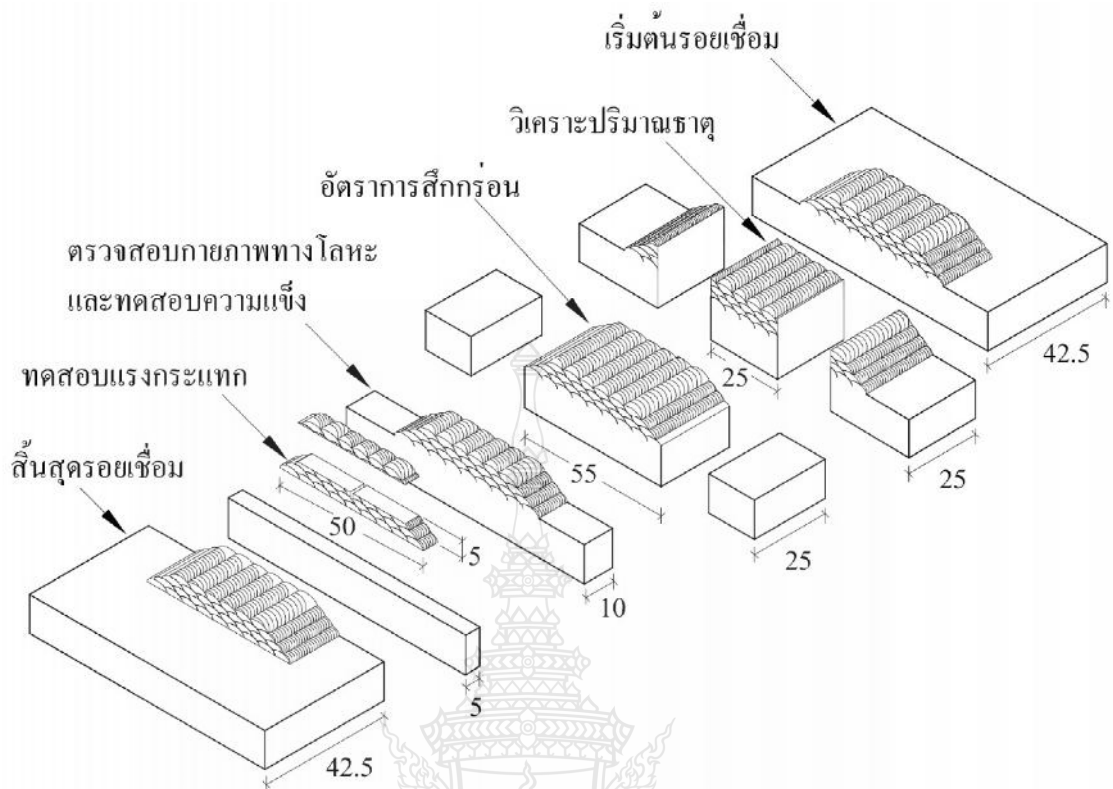


รูปที่ 3.7 การเชื่อมพอกผิวแข็งโดยการใช้ท่าราบ

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อม

3.3.1 ออกแบบการตัดชิ้นงาน

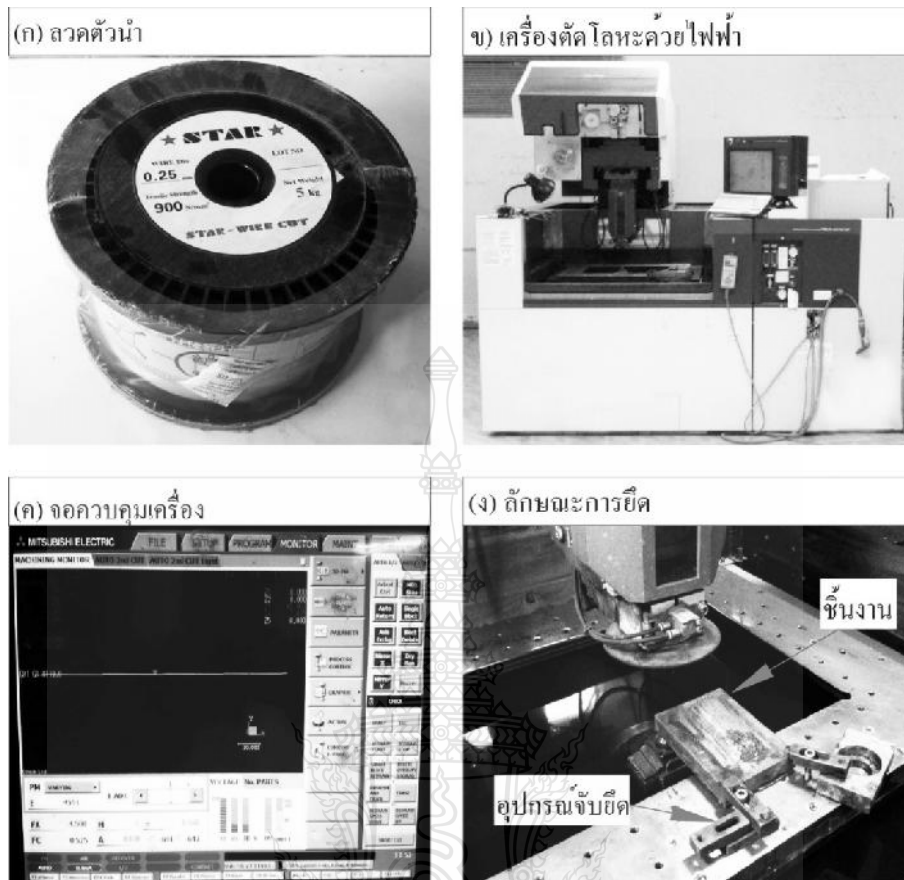
ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งตามหัวข้อ 3.2.3 ได้นำมาทำการออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อม โดยจะตัดแบ่งชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมออกเป็น 4 ส่วน โดยกระทำการวัดขนาดจากส่วนที่เริ่มต้นรอยเชื่อมเข้ามา 42.5 มิลลิเมตร และเว้นพื้นที่ไว้สำหรับชิ้นงานการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีและปริมาณธาตุจะมีขนาด 25 มิลลิเมตร และเว้นพื้นที่สำหรับชิ้นงานอัตราการสึกกร่อน 25 มิลลิเมตร ชิ้นงานตรวจสอบกายภาพทางโลหะวิทยาและความแข็งของชิ้นงานที่ได้มีขนาด 10 มิลลิเมตร และพื้นที่สำหรับชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก มีขนาด 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบ

3.3.2 กระบวนการตัดชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อม

ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ได้ผ่านขั้นตอนในรูปที่ 3.8 ได้แสดงถึงการออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมโดยกระบวนการตัดนี้ใช้เครื่อง Wire-Cut Electrical Discharge Machines เครื่องหมายการค้า Mitsubishielectric ดังแสดงในรูป 3.9 (ข) และใช้ลวดตัวนำขนาด 0.25 มิลลิเมตรที่สามารถทนแรงดึงได้ถึง 900 นิวตันต่อตารางเมตร โดยมีเครื่องหมายการค้า STAR-WIRE CUT ดังแสดงในรูป 3.9 (ก) และทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการตัดชิ้นงานที่ได้ออกแบบเอาไว้ในรูป 3.8 ที่จกควบคุมเครื่องดังแสดงในรูป 3.9 (ค) แล้วนำชิ้นงานมาทำการจับด้วยอุปกรณ์จับยึด ดังแสดงในรูป 3.9 (ง)



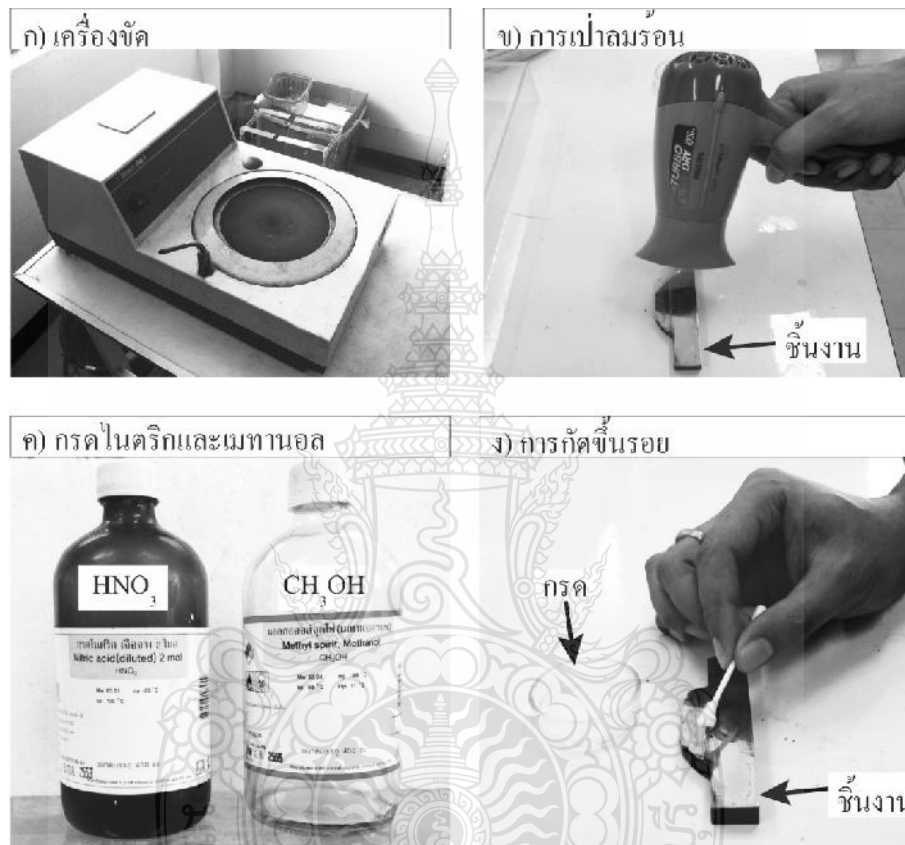
รูปที่ 3.9 เครื่อง Wire-cut Electrical Discharge Machines (ก) ลวดตัวนำ (ข) เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (ค) จอควบคุมเครื่อง (ง) ลักษณะการยึด

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างกายภาพทางโลหะวิทยา

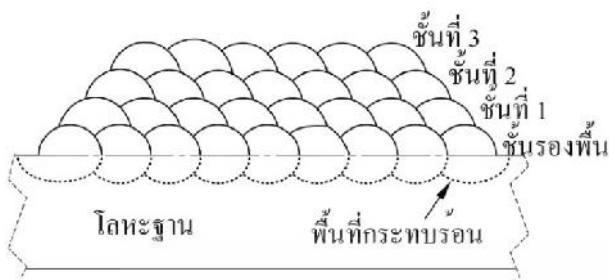
3.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

ชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่ผ่านกระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมในหัวข้อ 3.3 ซึ่งจะได้ชิ้นงานตรวจสอบกายภาพทางโลหะวิทยา ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ได้ถูกนำมาขัดหยาบด้วยกระดาษทรายน้ำโดยการใช้อุปกรณ์ขัด ดังรูปที่ 3.7 (ก) เริ่มต้นที่ เบอร์ 80 120 150 360 400 600 800 และ 1000 ตามลำดับจากนั้น นำไปขัดด้วยผงเพชร (Diamond) ที่มีขนาด 9 ไมครอน และล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์และใช้การเป่าด้วยลมร้อน แสดงดังรูปที่ 3.10 (ข) และทำการจัดเตรียมกรดไนตริกและเมทานอล แสดงในรูปที่ 3.10 (ค) แล้วทำการกัดชิ้นรอยด้วยกรดที่ประกอบด้วย เมทานอล (95%) 100 mL กรดไนตริก 1-5 mL ตามมาตรฐาน ASTM E407 โดยการใส่สาลีจุ่มลงในกรดแล้วทาบบนผิวหน้าทิ้งไว้ 15 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ง) และนำมาล้างด้วยน้ำ

สะอาดแล้วนำมาเป่าด้วยลมร้อนให้แห้งสนิท การตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคเพื่อตรวจสอบ จุดบกพร่องในโลหะเชื่อมหรือระหว่างชั้นแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ก) การตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคในงานวิจัยนี้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอแบบซุม โดยมีเครื่องหมายการค้า Shodensha ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ข)



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการกั้ดชิ้นรอย (ก) เครื่องขัด (ข) การเป่าลมร้อน (ค) กรดไนตริกและเมทานอล (ง) การกั้ดชิ้นรอย



ก) พื้นที่การตรวจสอบ

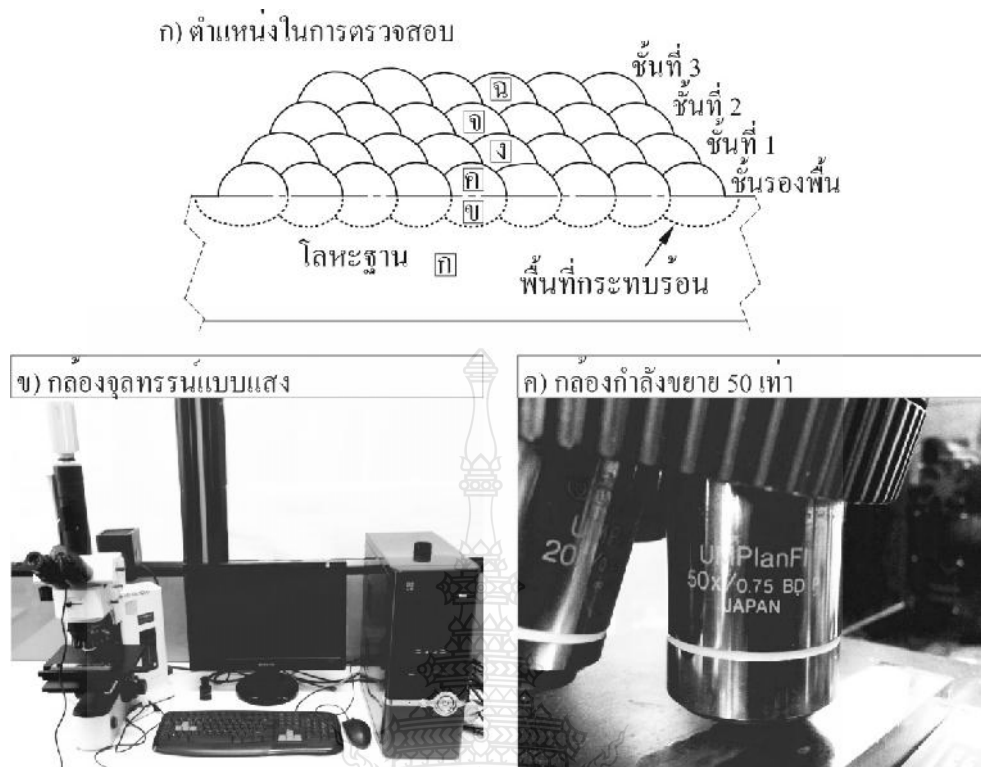


ข) กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ แบบซูม

รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (ก) พื้นที่การตรวจสอบ (ข) กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ แบบซูม

3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

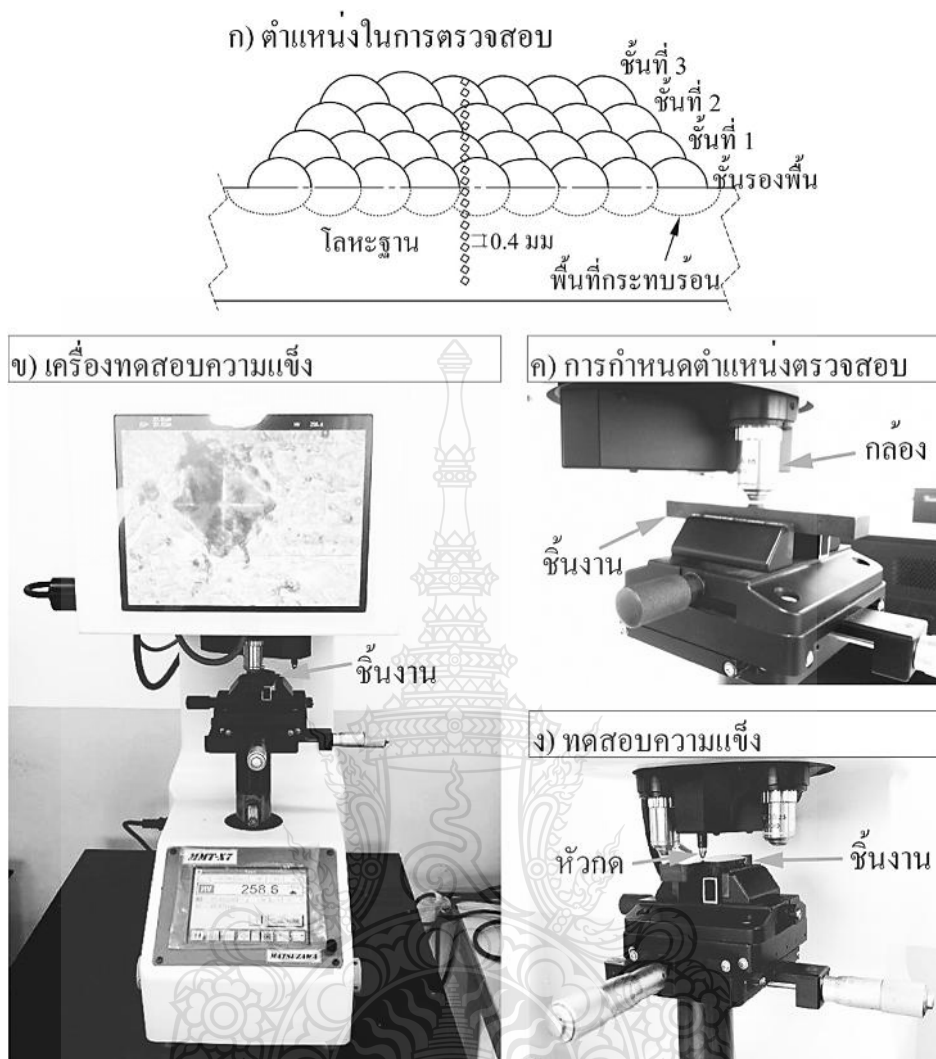
ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในหัวข้อที่ 3.4.1 ได้นำมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อแสดงเฟสขอบเกรนและรายละเอียดบริเวณโลหะเชื่อมตามตำแหน่ง (ก) โลหะฐาน (ข) บริเวณพื้นที่กระทบกระทบร้อน (ค) ชั้นแนวเชื่อมรองพื้น (ง) แนวเชื่อมพอกผิวของชั้นที่ 1 (จ) แนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 (ฉ) แนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ตามที่ได้กำหนดไว้ในรูป 3.12 (ก) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในงานวิจัยนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light Optical Microscope) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ข) โดยใช้เลนส์มีกำลังขยาย 50 เท่า ดังแสดงในรูป 3.12 (ค)



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างคุณภาพ (ก) ตำแหน่งในการตรวจสอบ (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ค) กล้องกำลังขยาย 50 เท่า

3.5 การทดสอบความแข็ง

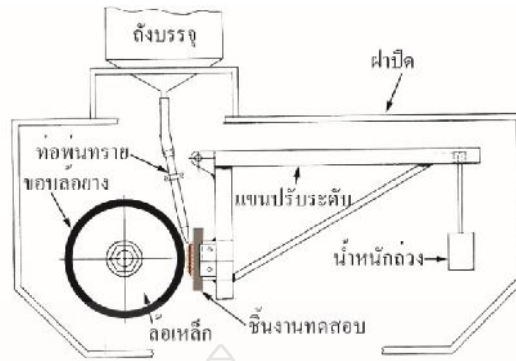
ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านการตรวจสอบ โครงสร้างคุณภาพในหัวข้อที่ 3.4.2 นำมาผ่านกระบวนการทำความสะอาดความสะอาดซ้ำดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ก) และ(ข) เพื่อเป็นการชำระสิ่งสกปรกออกและทำการกัดขึ้นรอยดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ง) และมาทำการตรวจสอบความแข็งของแนวเชื่อมทำการทดสอบตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ในรูปที่ 3.13 (ก) ในการทดสอบบริเวณหน้าตัดของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งจากตำแหน่งผิวหน้าของชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งบนสุดจนถึงโลหะฐาน (Base Metal) การตรวจสอบความแข็งนี้ โดยใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ เครื่องหมายการค้า MATSUZAWA รุ่น T-X7-LCD ดังรูปที่ 3.13 (ข) โดยการกำหนดตำแหน่งการตรวจสอบด้วยกล้องที่มีกำลังขยาย 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ค) โดยการเว้นระยะระหว่างจุด 0.4 มิลลิเมตร เมื่อกำหนดจุดการทดสอบได้แล้ว ทำการเปลี่ยนจากกล้องเป็นหัวกดทดสอบความแข็งดังแสดงรูปที่ 3.13 (ง) โดยใช้แรงกด 300 กรัม เวลาในการกด 10 วินาที [17]



รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบความแข็ง (ก) ตำแหน่งในการตรวจสอบ (ข) เครื่องทดสอบความแข็ง (ค) การกำหนดตำแหน่งตรวจสอบ (ง) ทดสอบความแข็ง

3.6 การทดสอบอัตราการสึกกร่อน

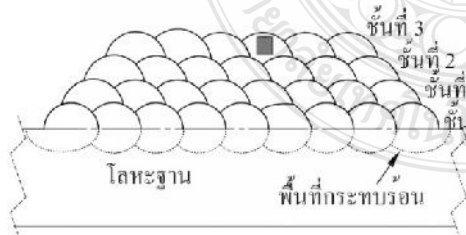
แนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่ได้ผ่านกระบวนการออกแบบในรูปที่ 3.8 และผ่านกระบวนการตัดชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ในชิ้นงานทดสอบอัตราการสึกกร่อนมีขนาดความกว้าง 55 มิลลิเมตรและความยาว 25 มิลลิเมตร และนำชิ้นงานใส่ลงในช่องจับยึดโดยการทดสอบนี้ได้กำหนดใช้ผงขัดที่มีขนาด 200-300 ไมคอน อัตราการไหล 390 กรัมต่อนาที ความเร็วรอบของล้ออย่าง 200 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 30 นาที [18]



รูปที่ 3.14 การทดสอบอัตราการสึกกร่อน

3.7 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

รูปที่ 3.8 ได้แสดงถึงขนาดของชิ้นงานการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ โดยจะมีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตรและความยาว 25 มิลลิเมตร ในตำแหน่งการตรวจสอบจะทำการตรวจสอบบริเวณพื้นที่หน้าตัดกึ่งกลางแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ดังแสดงด้วยรูปสี่เหลี่ยมในรูปที่ 3.15(ก) การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีจะแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative-Analysis) จะทำการตรวจสอบในตำแหน่งพื้นที่ ดังที่กำหนดไว้ในรูปที่ 3.15 (ก) และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) โดยทำการตรวจสอบในบริเวณพื้นที่เฟสที่มีความแตกต่างกัน การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีในงานวิจัยนี้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด เครื่องหมายการค้า JEOL โดยมีกำลังขยายตั้งแต่ 15-200,000 เท่า และเครื่องวิเคราะห์กระจายการพลังโดยมีเครื่องหมายการค้า OXFORD ดังแสดงในรูป 3.15 (ข)



ก) ตำแหน่งในการตรวจสอบ



ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

รูปที่ 3.15 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (ก) ตำแหน่งในการตรวจสอบ (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

บทที่ 4

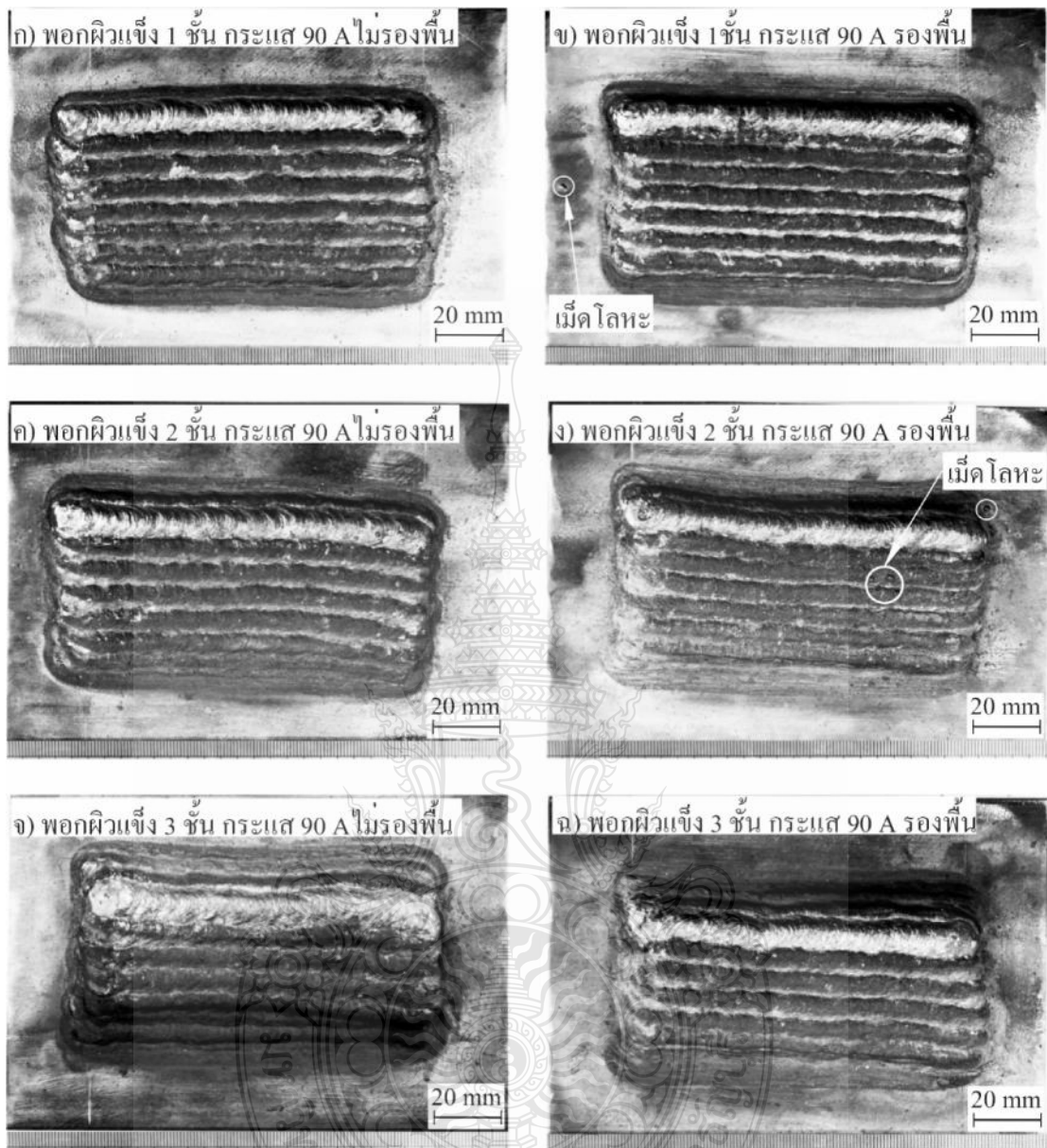
ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งแบบรองพื้นและไม่รองพื้นต่อสมบัติของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน S50C

การทดลองในการวิจัยเริ่มต้นด้วยการศึกษาตัวแปรการเชื่อม ซึ่งประกอบด้วย การเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ด้วยการเชื่อมที่มีการสร้างชั้นรองพื้นและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็ง จำนวนชั้นพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น และใช้กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.1.1 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อผิวหน้าแนวเชื่อม

รูปที่ 4.1 แสดงผิวหน้าของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยการเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์ด้วยกระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ที่มีการเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น บนชิ้นงานที่ไม่มีการเชื่อมชั้นรองพื้นและชิ้นงานที่มีการเชื่อมรองพื้นผลการตรวจสอบพบว่า ผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น บนชิ้นงานที่ไม่มีการรองพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) (ค) และ (จ) พบผิวหน้าแนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ไม่เกิดจุดบกพร่อง เช่น รู ตามค หรือความไม่สมบูรณ์ใดๆ บนผิวหน้าแนวเชื่อม ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เชื่อมรองพื้นก่อนเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) (ง) และ (ฉ) จุดบกพร่องที่เป็นรู ตามค หรือความไม่สมบูรณ์ ไม่สามารถตรวจพบเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานเชื่อมที่ได้พบว่ามีเม็ด โลหะที่กระเด็นออกจากบ่อหลอมละลายมาเกาะที่พื้นชิ้นงานดังแสดงด้วยวงกลมในรูปที่ 4.1 (ข) และ (ฉ)

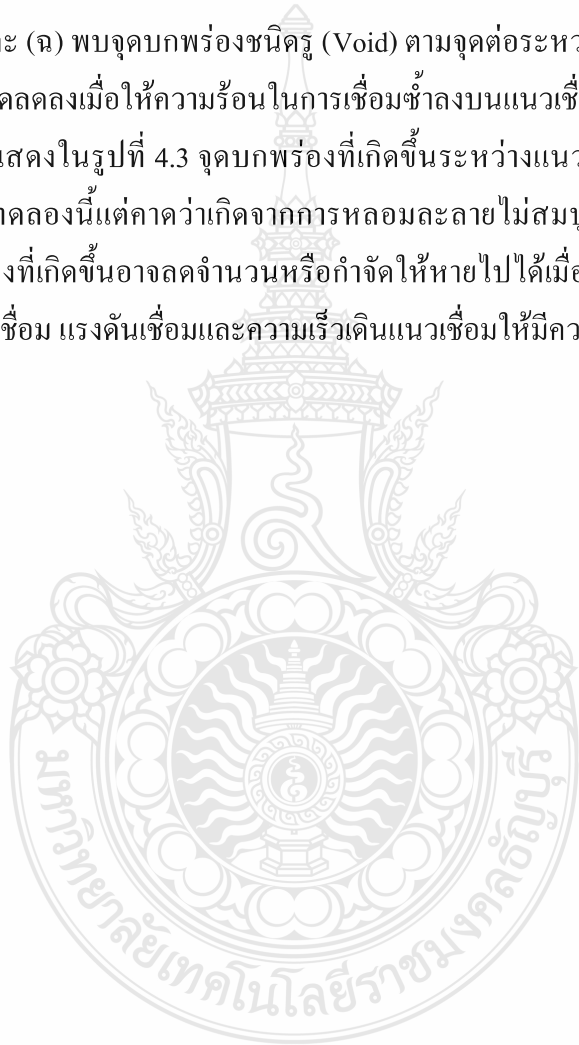


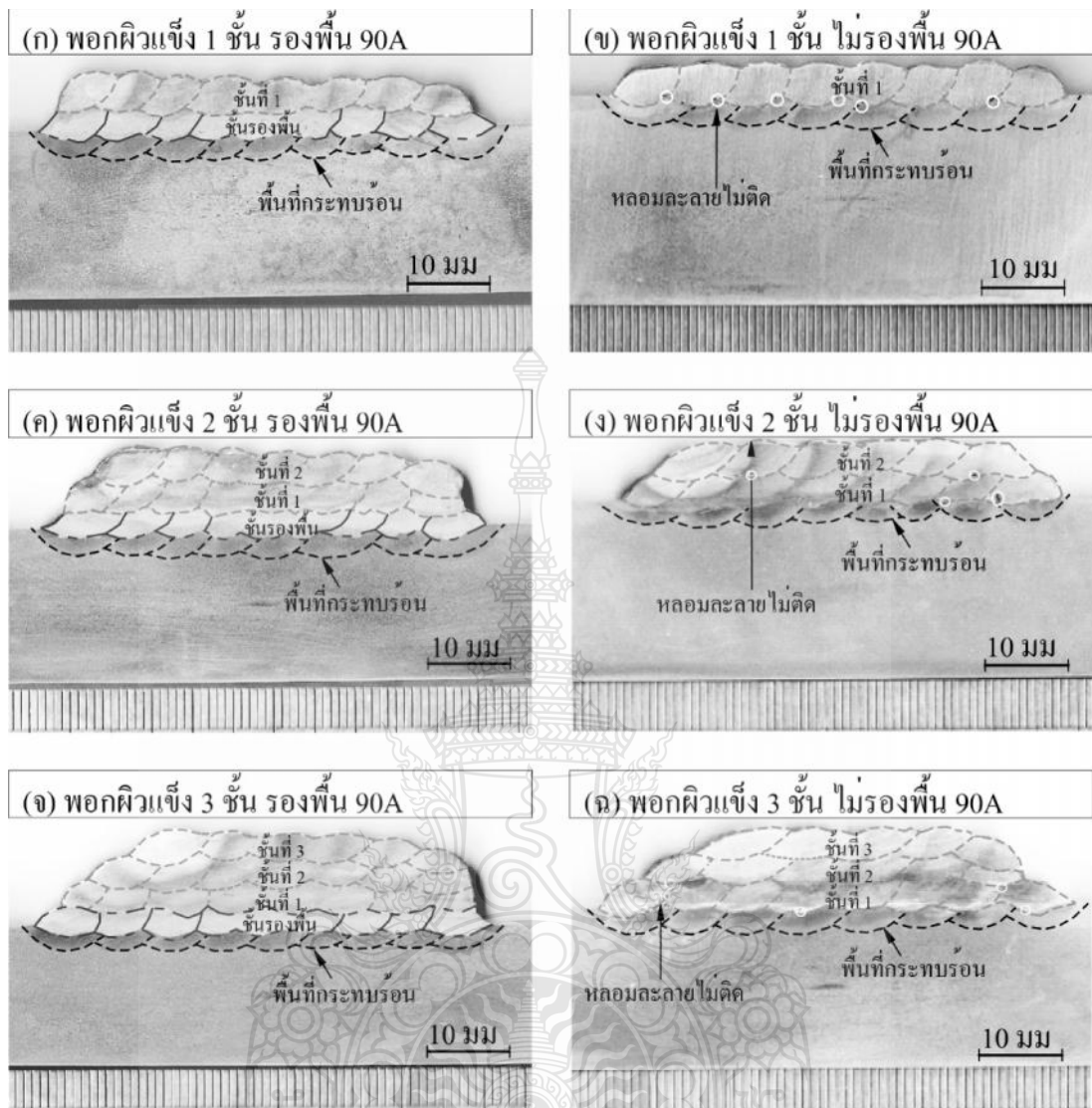
รูปที่ 4.1 ผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น แบบมีรองพื้นและไม่มีสร้างชั้นรองพื้น

- (ก) พอกผิวแข็ง 1 ชั้น กระแส 90 A ไม่รองพื้น (ข) พอกผิวแข็ง 1 ชั้น กระแส 90 A รองพื้น
 (ค) พอกผิวแข็ง 2 ชั้น กระแส 90 A ไม่รองพื้น (ง) พอกผิวแข็ง 2 ชั้น กระแส 90 A รองพื้น
 (จ) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 90 A ไม่รองพื้น (ฉ) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 90 A รองพื้น

4.1.2 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อโครงสร้างมหภาคและจุลภาค โลหะเชื่อม

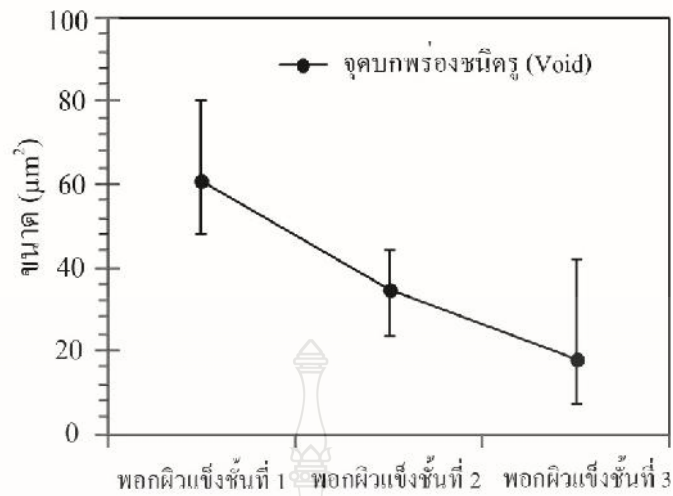
ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 4.2 แสดงการเชื่อมทั้งแบบการสร้างชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็งและแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) (ค) และ(จ) พบโลหะเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ปราศจากจุดบกพร่องใดๆ ในโลหะเชื่อมหรือระหว่างชั้นแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) (ง) และ (ฉ) พบจุดบกพร่องชนิดรู (Void) ตามจุดต่อระหว่างแนวเชื่อม จุดบกพร่องที่พบมีแนวโน้มที่มีขนาดลดลงเมื่อให้ความร้อนในการเชื่อมซ้ำลงบนแนวเชื่อมเดิมในการเชื่อมแนวที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นระหว่างแนวเชื่อมนี้ไม่ได้ทำการศึกษากลไกการเกิดในการทดลองนี้แต่คาดว่าเกิดจากการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of Fusion) ของโลหะเชื่อมจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นอาจลดจำนวนหรือกำจัดให้หายไปได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม เช่น กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อมและความเร็วเดินแนวเชื่อมให้มีความเหมาะสม [19]





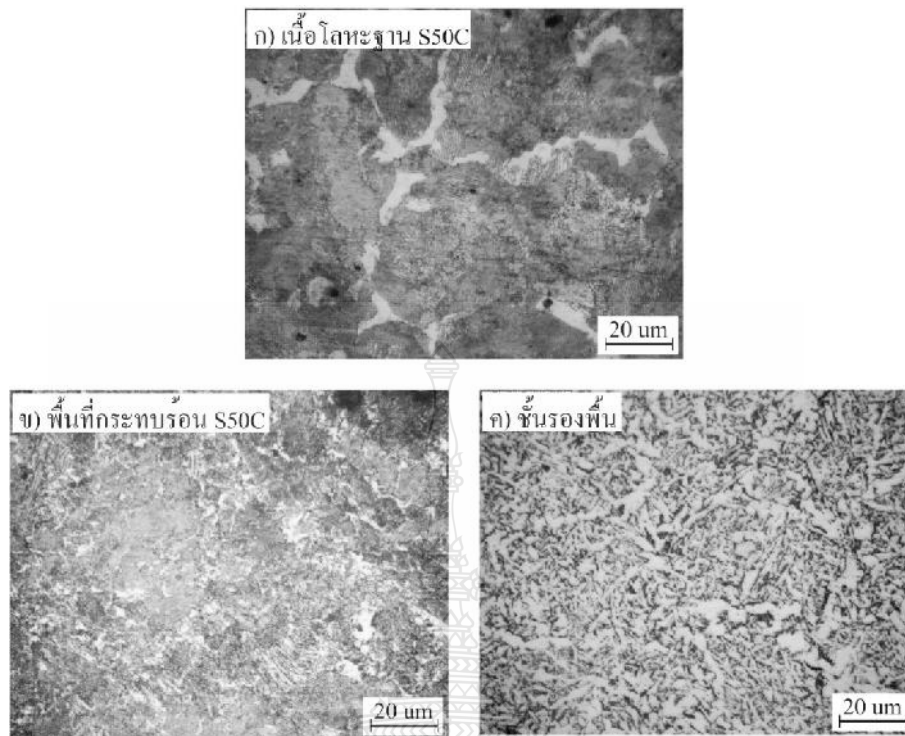
รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมปอกแข็ง 1-3 ชั้น แบบมีรองพื้นและไม่มีรองพื้น

- (ก) ปอกผิวแข็ง 1 ชั้น รองพื้น 90 A (ข) ปอกผิวแข็ง 1 ชั้น ไม่รองพื้น 90 A
 (ค) ปอกผิวแข็ง 2 ชั้น รองพื้น 90 A (ง) ปอกผิวแข็ง 2 ชั้น ไม่รองพื้น 90 A
 (จ) ปอกผิวแข็ง 3 ชั้น รองพื้น 90 A (ฉ) ปอกผิวแข็ง 3 ชั้น ไม่รองพื้น 90 A



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวและขนาดจุดบกพร่องในชิ้นงานแบบไม่มีการสร้างร่องพื้น

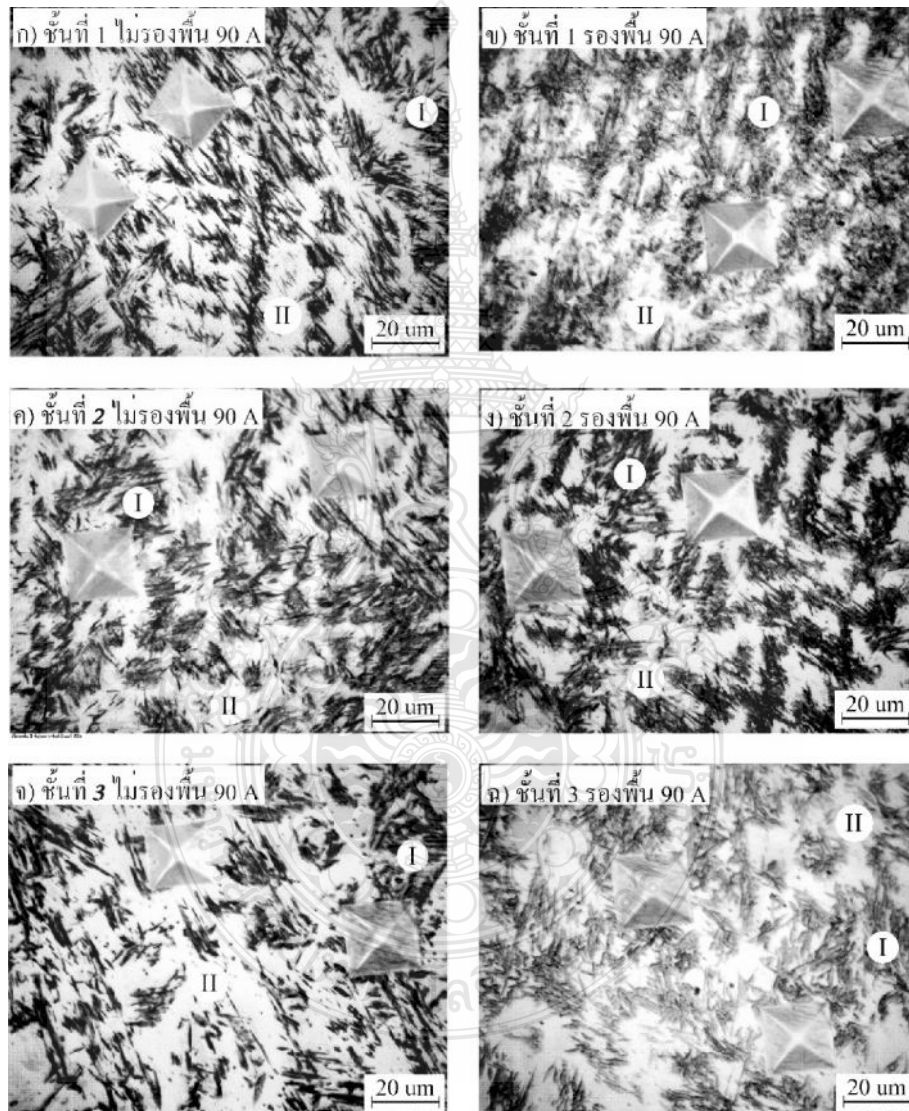
รูปที่ 4.2 ในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งและโลหะฐานของชิ้นงานที่ทำการสร้างชั้นเชื่อมร่องพื้น และไม่มีการสร้างชั้นร่องพื้น ถูกนำมาทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคและแสดงให้เห็น รายละเอียดดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ในตำแหน่งโลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ประกอบด้วยโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 เฟส คือ พื้นทีสีขาวและพื้นที่สีเข้ม เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุคาร์บอน 0.52 % กับแผนภาพสมดุลเฟสระหว่าง เหล็ก-เหล็ก คาร์ไบด์ พบว่าเฟสของเหล็กกล้าที่แสดงในรูปที่ 4.4(ก) คือ เฟสของเฟอร์ไรต์ (สีขาว) และ เฟสซีเมนไทต์ (สีเข้ม) นอกจากนั้นลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานยังแสดง โครงสร้างแบบเดียวกันกับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1015 ที่เกิดการขึ้นตอนหล่อแบบต่อเนื่อง [20] เฟสเฟอร์ไรต์ (สีขาว) และเฟสซีเมนไทต์ (สีเข้ม) มีขนาดเล็กลงในพื้นที่ที่กระทบ ร้อนของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข) นอกจากนั้นความร้อนที่ได้จากการเชื่อมส่งผลให้ขนาด และรูปร่างของเฟสเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ ในพื้นที่ที่กระทบร้อนเล็กน้อยและกระจายตัวทั่วทั้ง พื้นที่ที่กระทบร้อน โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมชั้นร่องพื้นในรูปที่ 4.4(ค) โครงสร้างส่วนใหญ่ ประกอบด้วยโครงสร้างรูปร่างคล้ายไม้ระแนงและมีขอบเขตของเกรนเฟอร์ไรต์ที่ขนาดเล็กมาก มี ลักษณะพิเศษเป็นกลุ่มสีเข้ม [21]



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะฐาน (ก) เนื้อโลหะฐาน S50C (ข) พื้นที่กระทบร้อน S50C (ค) ชั้นรองพื้น

ในโครงสร้างชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 1-3 ของทั้งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นและแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น มีเฟสที่ลักษณะเรียวยาวจับตัวเป็นกลุ่มสี่เหลี่ยมจัดเรียงแถวสลับกับพื้นขาว (พื้นที่เฟสสี่เหลี่ยมใช้สัญลักษณ์ I และในพื้นที่เฟสสีขาวจะใช้สัญลักษณ์ II) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีลักษณะเป็นเฟส I ลักษณะเรียวยาวเล็กจับตัวเป็นกลุ่มและจัดเรียงเป็นแถวสลับกับพื้นที่เฟส II และได้การทดลองสอบค่าความแข็งที่พื้นที่มีความแตกต่างกันในรูปที่ 4.5(ก) ได้ค่าพื้นที่เฟส I เท่ากับ 681.4 HV พื้นที่เฟส II 747.8 HV ซึ่งในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นในรูปที่ 4.5(ข) มีลักษณะเฟส I ที่จับตัวกันเป็นกลุ่มหนาแน่นมากกว่าในเฟส I แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นในรูปที่ 4.5(ก) และมีค่าความแข็งของพื้นที่เฟส I 668.1 HV และพื้นที่เฟส II 681.1 HV และในผิวพอกแข็งชั้นที่ 2 แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นในรูปที่ 4.5(ค) มีลักษณะคล้ายกับแนวเชื่อมชั้นที่ 1 แต่บริเวณเฟส II มีปริมาณเพิ่มขึ้นและมีค่าความแข็งของพื้นที่เฟส I 718.7 HV และพื้นที่เฟส II 775.4 HV ซึ่งในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 2 แบบมีการสร้างชั้นรองพื้นมีลักษณะพื้นเฟส I มีสี่เหลี่ยมมากกว่าและมีการกระจายตัวน้อยกว่า ดังรูปที่ 4.5(ข) และมีค่า

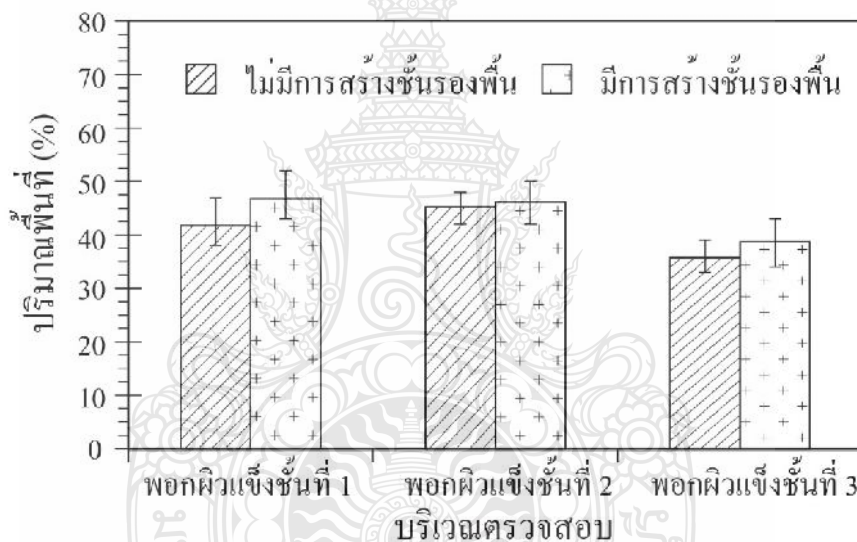
ความแข็งของพื้นที่เฟส I 691.1 HV พื้นที่เฟส II 711.5 HV และในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นในรูปที่ 4.5 (ก) มีการกระจายตัวของพื้นที่เฟส I ค่อนข้างสูงและมีค่าความแข็งของเฟส I 755.5 HV และในพื้นที่ II 843 HV ซึ่งในพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบมีการสร้างชั้นรองพื้น รูปที่ 4.5 (ข) มีการจับตัวรวมกันเป็นกลุ่มของเฟส I มากกว่าพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น รูปที่ 4.5 (จ) และมีค่าความแข็ง พื้นที่เฟส I 767.3 HV และพื้นที่เฟส II 787.2 HV



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของจำนวนชั้นแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (ก) ชั้นที่ 1 ไม่รองพื้น 90 A (ข) ชั้นที่ 1 รองพื้น 90 A (ค) ชั้นที่ 2 ไม่รองพื้น 90 A (ง) ชั้นที่ 2 รองพื้น 90 A (จ) ชั้นที่ 3 ไม่รองพื้น 90 A (ฉ) ชั้นที่ 3 รองพื้น 90 A

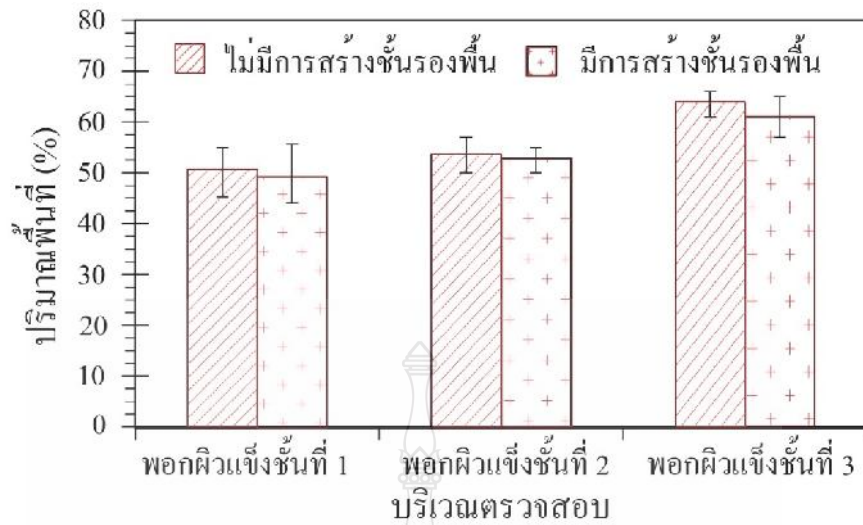
4.1.3 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อปริมาณพื้นที่เฟส

ในการตรวจสอบความแข็งของพื้นที่เฟสที่มีความแตกต่างกันในรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความแข็งของทั้งสองเฟสมีความแตกต่างกัน พบพื้นที่เฟส II มีค่าความแข็งที่สูงกว่าในเฟสที่ I จึงทำการตรวจสอบปริมาณพื้นที่เฟสของชั้นพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น ทั้งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นและแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ด้วยโปรแกรม Material Plus ตามมาตรฐาน ASTM E 562 พบว่า ปริมาณพื้นที่เฟส I มีแนวโน้มลดลงในชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 ถึง พอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ดังแสดงในรูป 4.6 และปริมาณพื้นที่เฟส I มีปริมาณมากที่สุดที่บริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 แบบมีการสร้างชั้นรองพื้นมีปริมาณพื้นที่ 46.78 (%) และพบปริมาณพื้นที่เฟส I มีปริมาณน้อยที่สุด บริเวณพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีปริมาณพื้นที่ 35.71 (%)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อปริมาณพื้นที่เฟสที่ I

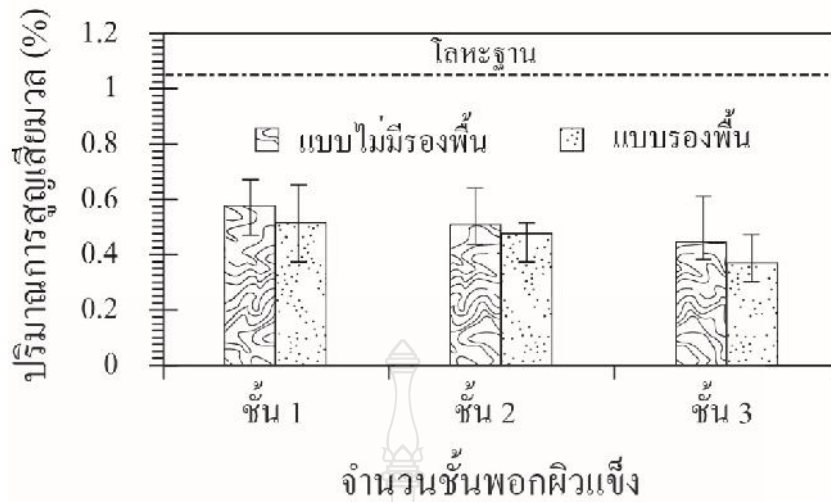
ในการตรวจสอบปริมาณพื้นที่เฟส II ดังแสดงในรูปที่ 4.7 มีแนวโน้มของปริมาณพื้นที่เฟส II สูงมาขึ้นตั้งแต่บริเวณผิวพอกแข็งชั้น 1 ถึงบริเวณผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 และมีปริมาณพื้นที่เฟส II มีมากที่สุดบริเวณผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น มีปริมาณพื้นที่ 63.95 (%) และมีปริมาณพื้นที่เฟส II น้อยที่สุดบริเวณผิวพอกแข็งชั้นที่ 1 แบบมีการสร้างชั้นรองพื้น มีปริมาณพื้นที่ 49.2 (%) แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้นปริมาณพื้นที่ขามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและพื้นที่สาคามีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ชั้นพอกผิวแข็งที่ 3 มีค่าความแข็งที่สูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ที่แสดงค่าทดสอบความแข็งของแนวเชื่อม



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อปริมาณพื้นที่เฟสที่ II

4.1.4 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่ออัตราการสึกกร่อน

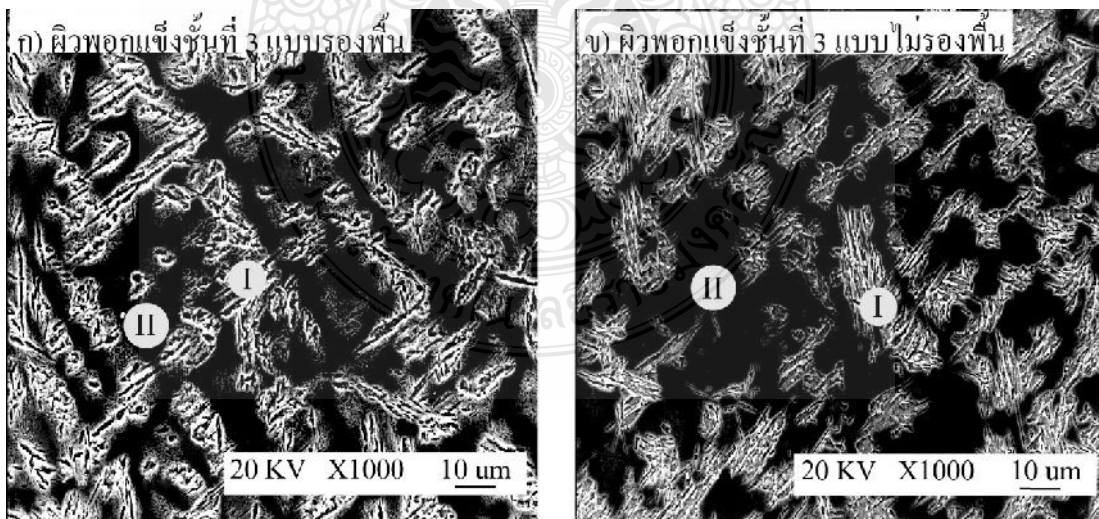
การทดสอบอัตราการสึกกร่อนนี้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM G65 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 พบว่า ชิ้นงานเนื้อโลหะฐานมีอัตราการสึกกร่อน 1.231 % และในชิ้นงานทดสอบที่เชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น เกิดอัตราการสึกกร่อนสูงที่สุด โดยการเชื่อมแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นมีการสูญเสียมวล 0.578 % โดยการเชื่อมแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีการสูญเสียมวล 0.515 % อัตราการสึกกร่อนมีแนวโน้มลดต่ำลงตามจำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งที่เพิ่มขึ้น และอัตราการสึกกร่อนต่ำที่สุดในชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมพอกผิวแข็งจำนวน 3 ชั้น แบบมีการสร้างชั้นรองพื้นมีการสูญเสียมวล 0.446 % และการเชื่อมแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีการสูญเสียมวล 0.369 % ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งในงานวิจัยของ Lin and Chang [22] ได้อธิบายถึงโครงสร้างจุลภาคในพื้นที่เฟสที่ความแข็งมีความสามารถยับยั้งการเปลี่ยนรูปของชั้นพอกผิวแข็ง และมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Coronado, Caicedo *et al.* [16] ที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบอัตราการสึกกร่อนแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น และแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น พบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งส่งผลต่อการต้านทานการสึกกร่อน เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 เป็นแหล่งสะสมที่ประกอบด้วยพื้นที่เฟสที่มีความแข็ง แต่อย่างไรก็ตามในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 มีระดับการเงาของปริมาณธาตุสูงจึงส่งผลให้การต้านทานการสึกกร่อนลดต่ำลง



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อปริมาณการสูญเสียคาร์บอน

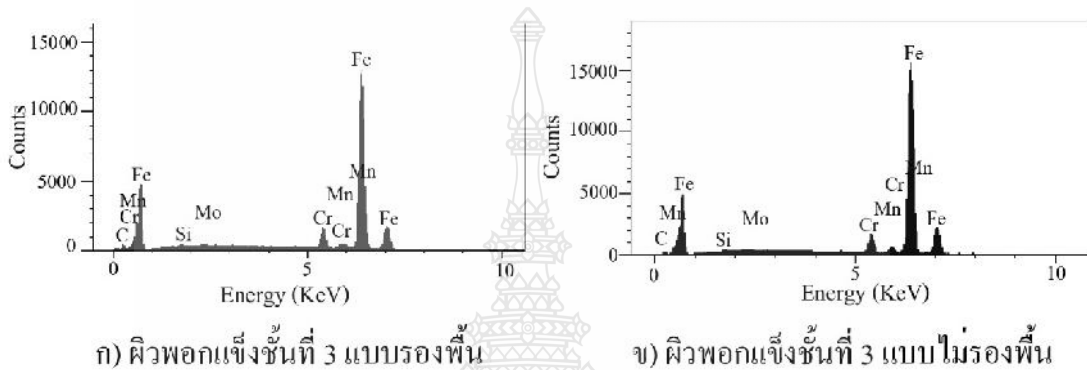
4.1.4 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

การตรวจการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเฟสโลหะเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในผิวแนวเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบมีการสร้างชั้นร่องพื้นและไม่มีการสร้างชั้นร่องพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่า มีกลุ่มเฟสที่มีความสำคัญ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเฟสที่มีลักษณะเรียวยาวจับตัวเป็นกลุ่มและกลุ่มเฟสที่มีลักษณะเป็นพื้นสีดำ



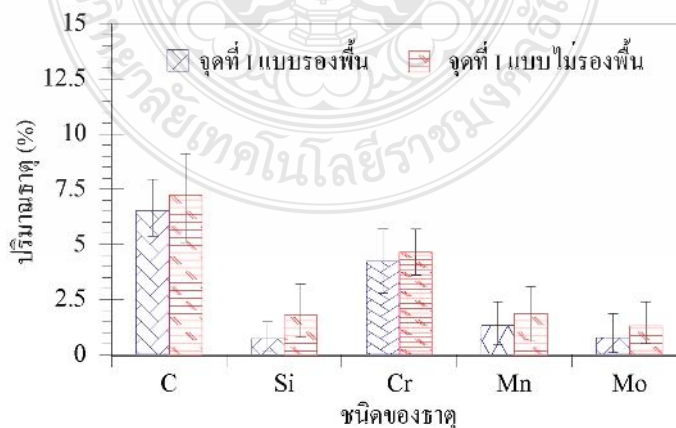
รูปที่ 4.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ก) ผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบร่องพื้น (ข) ผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่มีร่องพื้น

เพื่อทำความเข้าใจพื้นที่เฟสทั้งสองจึงทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเฟสทั้งสองด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลัง (Energy dispersive spectrometry : EDS) วิเคราะห์แบบเชิงคุณภาพ (Qualitative) ในบริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 พบว่าธาตุหลักในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 จำนวน 6 ธาตุคือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) โมลิบดีนัม (Mo) ซิลิกอน (Si) ทั้งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10



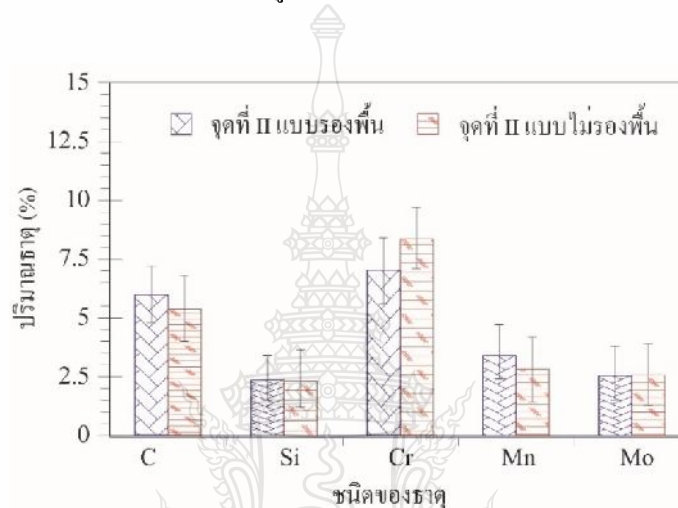
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพผิวพอกแข็ง 3 ชั้น (ก) ผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบรองพื้น (ข) ผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่รองพื้น

การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) บริเวณกลุ่มเฟสที่มีลักษณะต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่า ในตำแหน่งที่ 1 ของชิ้นงานแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีแนวโน้มของปริมาณของธาตุที่สูงกว่าในแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุและชนิดของธาตุ ตำแหน่งที่ 1

และในตำแหน่งที่ II พบว่า ในชิ้นงานที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีปริมาณของธาตุ โครเมียม (Cr) 8.36 % และ โมลิบดีนัม (Mo) 1.26 % ซึ่งสูงกว่าตำแหน่งที่ II ในชิ้นงานที่มีการสร้างชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้มีอิทธิพลสูงในการเพิ่มความแข็งให้กับเนื้อเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ได้แสดงการทดสอบความแข็งของเฟสพื้นสีขาวมีค่าความแข็งที่มากกว่าและได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srinivasan, Muthupandi *et.al.* [23] ที่ได้กล่าวว่าการเพิ่มขึ้นของธาตุ โครเมียม (Cr) และ โมลิบดีนัม (Mo) ส่งผลต่อความความแข็งที่สูงขึ้นของแนวเชื่อม

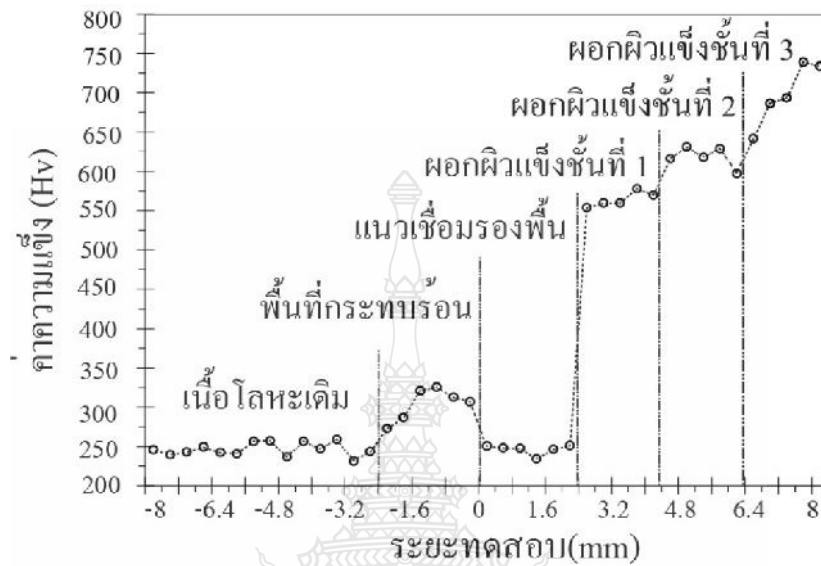


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุและชนิดของธาตุ ตำแหน่งที่ II

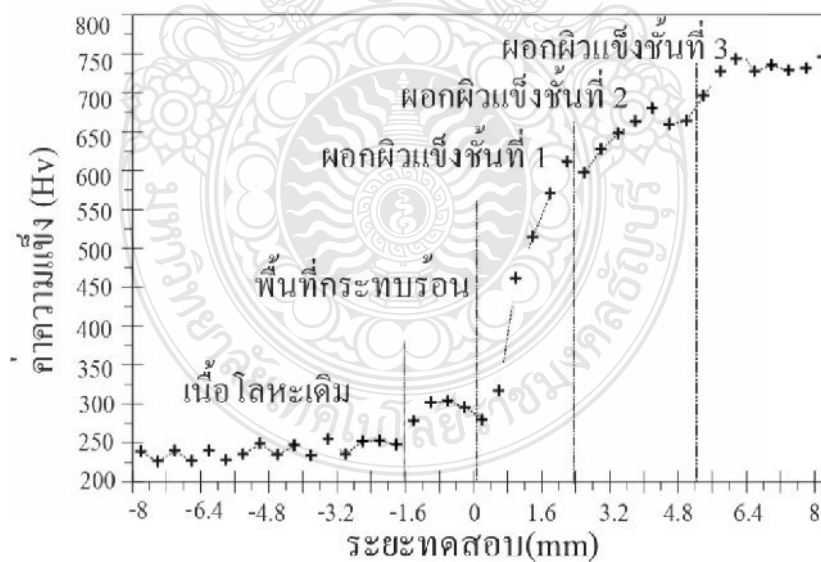
4.1.5 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อความแข็ง

ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมแบบรองพื้นและแบบไม่รองพื้นพบว่า พื้นผิวโลหะฐาน ทั้งสองแบบเริ่มต้นที่ตำแหน่ง -8 ถึง -2.4 มีค่าความแข็งประมาณ 250 HV และค่าความแข็งของพื้นที่กระแทกร้อนทั้งสองแบบ เริ่มต้นตั้งแต่จุด -2.4 ถึงจุด 0 มีค่าประมาณ 310 HV และค่าความแข็งของแนวเชื่อมพอกผิว ชั้นที่ 1-3 พบว่าชิ้นงานที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.14 มีแนวโน้มของค่าความแข็งที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีการสร้างชั้นรองพื้นในรูปที่ 4.13 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลกระทบขั้นตอนการเชื่อมต่อสมบัติของผิวพอกแข็งบนโลหะฐาน เหล็กหล่อที่พบว่าความแข็งของชั้นพอกผิวแข็งที่มีการรองพื้นมีความแข็งต่ำกว่าชั้น พอกผิวแข็งที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น [5] การลดค่าความแข็งที่ได้เกิดจากการให้ความร้อนซ้ำต่อชั้นรองพื้นคล้ายกับการอบอ่อนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม [24] นอกจากนั้นหากพิจารณาส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่ใช้ในการรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็ง พบว่ามีปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ต่ำกว่า ดังนั้นอาจเป็น

สาเหตุสำคัญที่ทำให้ความแข็งแรงลดลงเนื่องจากการเกิดการเจือจาง (% Dilution) ของโลหะเชื่อมพอกผิว
 แข็งได้



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อความแข็งแรงแบบมีชั้นรองพื้น



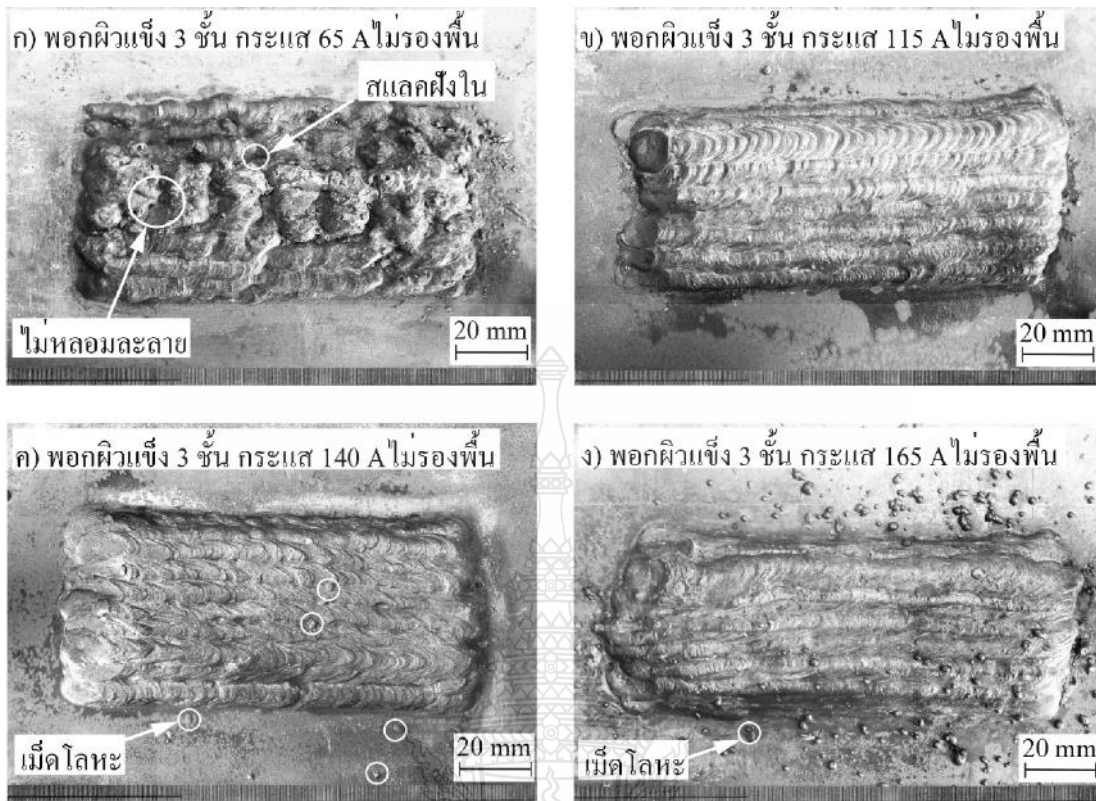
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นพอกผิวแข็งต่อความแข็งแรงแบบไม่มีชั้นรองพื้น

4.2 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่รองรับชั้นต่อสมบัติของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน S50C

การทดลองในหัวข้อ 4.1 เริ่มต้นด้วยการศึกษาตัวแปรการเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีการสร้างชั้นรองรับและไม่มีการสร้างชั้นรองรับ ก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้นและใช้กระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ ได้ตัวแปรที่ดีที่สุดคือ การเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น แบบไม่มีการสร้างชั้นรองรับ ในหัวข้อที่ 4.2 นี้จึงทำการทดลองเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งที่ 65,115,140 และ 165 แอมแปร์ ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

4.2.1 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่อผิวหน้าแนวเชื่อม

ผลการตรวจสอบผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยการเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์แบบไม่มีการสร้างชั้นรองรับด้วยกระแสเชื่อม 65 115 140 และ 165 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ผลการตรวจสอบพบว่าในกระแสเชื่อมพอกผิวแข็ง 65 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15(ก) พบจุดบกพร่องในแนวเชื่อม เช่น รูตามค สแลคฝังใน บริเวณผิวหน้าโลหะเชื่อมดังวงกลมในรูปที่ 4.13 และแนวเชื่อมไม่เกิดการหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.14(ก) ในขณะที่ชิ้นงานเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแส 115 แอมแปร์ บนผิวหน้าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่เกิดจุดบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ข) และในชิ้นงานที่กระแสเชื่อม 140 แอมแปร์ พบว่ามีเม็ดโลหะที่กระเด็นออกจากบ่อหลอมละลายมาเกาะที่ชิ้นงานมาเกาะบนแนวเชื่อมเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.15(ค) อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแส 165 แอมแปร์ พบว่ามีเม็ดโลหะกระเด็นออกจากบ่อหลอมละลายมาเกาะที่ชิ้นงานและบนแนวเชื่อมกระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 4.15(ง) ซึ่งมีส่วนคล้ายกับงานวิจัยของ Molleda, Mora *et.al.* [25] ซึ่งได้ทำการศึกษาการเกิดเม็ดโลหะในการเชื่อมอาร์กถวดหุ้มฟลักซ์ E6016 ที่กระแสเชื่อม 110 แอมแปร์ บนเหล็กกล้าคาร์บอน พบว่า ขนาดของหยดน้ำโลหะที่มีการถ่ายโอนจากถวดเชื่อมไปยังบ่อหลอมละลายมีผลกระทบต่อกระบวนการเกิดเม็ดโลหะ



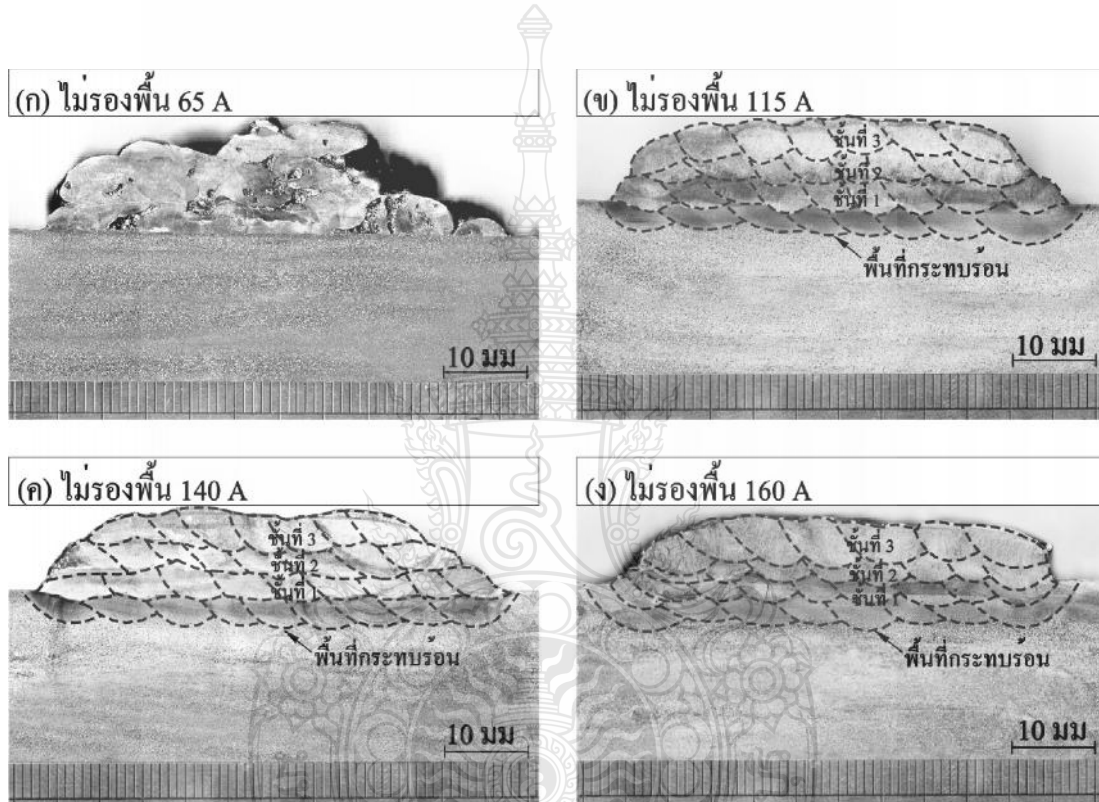
รูปที่ 4.15 ผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งของแบบไม่มีร่องพื้นที่กระแสมือ 65-165 แอมแปร์

(ก) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 65 A ไม่มีร่องพื้น (ข) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 115 A ไม่มีร่องพื้น (ค) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 140 A ไม่มีร่องพื้น (ง) พอกผิวแข็ง 3 ชั้น กระแส 165 A ไม่มีร่องพื้น

4.2.2 อิทธิพลของกระแสมือพอกผิวแข็งต่อโครงสร้างมหภาค

รูปที่ 4.15 แสดงถึงการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มี การสร้างชั้นรองที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสที่ 65, 115, 140 และ 165 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16(ก-ง) พบว่าในกระแสมือพอกผิวแข็งที่ 65 แอมแปร์ มีจุดบกพร่องเกิดขึ้น เช่น สแลกฝังใน (Slag Inclusion) ในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง ดังในรูปที่ 4.16(ก) และเกิดการซึมลึกไม่ เพียงพอ (Incomplete penetration) คาดว่าเกิดจากกระแสมือที่ต่ำเกินไปทำให้ไม่เกิดการหลอม ละลายและตรวจสอบแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่กระแสมือ 115 และ 140 แอมแปร์ ไม่พบจุดบกพร่อง ใดๆในโลหะเชื่อมหรือระหว่างชั้น ดังรูปที่ 4.16(ข) และ(ค) และในชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่เชื่อม ด้วยกระแสที่ 165 แอมแปร์ ดังรูปที่ 4.16(ง) พบว่าบริเวณพื้นที่กระทบร้อนมีลักษณะที่กว้างและ

ลึกกว่าแล้วในส่วนบริเวณพื้นที่โลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 มีความสูงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมที่กระแสนั้นๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Lu, Fujii *et.al.*[26] ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกระแสเชื่อมที่มีผลต่อรูปร่างแนวเชื่อม ได้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสเชื่อมจะส่งผลโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนและการกระจายของความร้อนซึ่งเป็นเรื่องสังเกตว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสเชื่อมมีผลต่อขนาดการกระจายตัวของความร้อนในพื้นที่ที่กระทบ



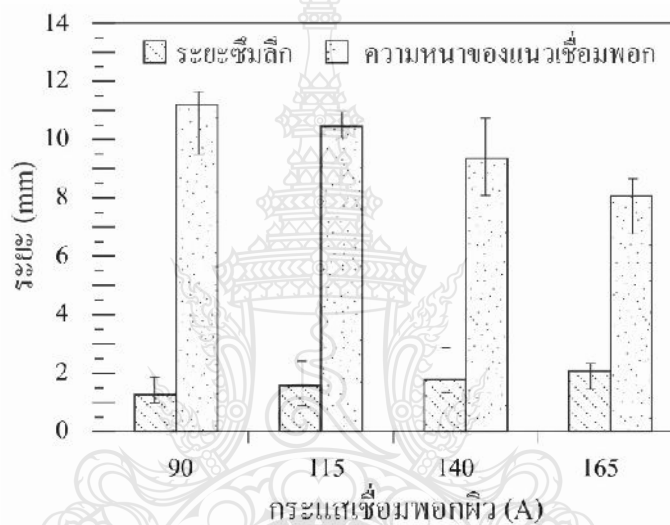
รูปที่ 4.16 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีร่องพื้นที่กระแสนเชื่อม 65-165 A

(ก) ไม่มีร่องพื้น 65 A (ข) ไม่มีร่องพื้น 115 A (ค) ไม่มีร่องพื้น 140 A (ง) ไม่มีร่องพื้น 165 A

4.2.3 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่ออัตราการซึมลึก

รูปที่ 4.16 ได้แสดงถึงผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 115 140 และ 165 แอมแปร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งและการซึมลึกที่มีความแตกต่างกันในแต่ละกระแสเชื่อม จึงได้ทำการตรวจสอบอัตราการซึมลึกและความหนาของชั้นแนว ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งได้แสดงอัตราการซึมลึกและความหนาของ

ชั้นแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 90 115 140 และ 165 แอมแปร์ พบว่าในกระแสเชื่อมพอกผิวแข็ง 90 แอมแปร์ มีอัตราซึมลึกต่ำที่สุดมีค่าประมาณ 1.73 มิลลิเมตร และมีความหนาของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งมีค่าสูงที่สุดประมาณ 11.31 มิลลิเมตร และมีแนวโน้มอัตราการซึมลึกที่สูงที่สุดในกระแสเชื่อมที่ 165 แอมแปร์ มีค่าประมาณ 2.40 มิลลิเมตร และมีความหนาของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งต่ำที่สุดมีค่าประมาณ 8.31 มิลลิเมตร ซึ่งมีส่วนคล้ายกับงานวิจัย Crespo, Scotti *et.al.* [27] ที่พบกับโลหะเชื่อมที่มีการแทรกซึมที่ต่ำ เนื่องจากการใช้กระแสเชื่อมที่ต่ำ ซึ่งได้อธิบายสำหรับพฤติกรรมกรเชื่อมกระแสต่ำไว้ว่าแรงเคลื่อนของสนามแม่เหล็กจะทำหน้าที่ต่อต้านต่อการถ่ายโอนของน้ำโลหะ

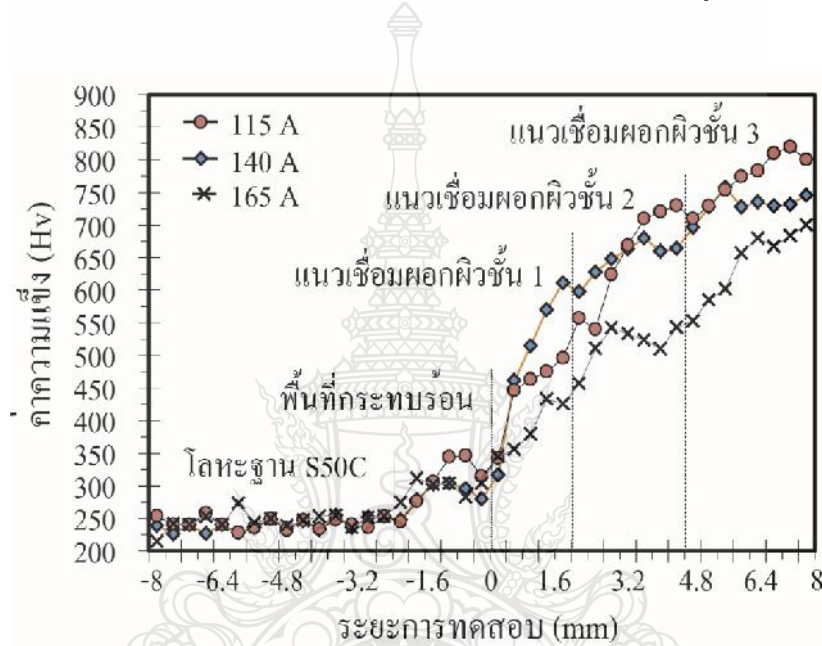


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งกับอัตราการซึมลึกและความหนา

4.2.4 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่อความแข็ง

ผลการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคในหัวข้อที่ 4.2.3 แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยกระแสเชื่อม 65 แอมแปร์ ไม่เกิดหลอมละลายและเกิดจุดบกพร่องในแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง ดังแสดงในรูป 4.16 (ก) การตรวจสอบความแข็งจึงไม่นำชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่เชื่อมด้วยกระแส 65 แอมแปร์ ไปทำการตรวจสอบ รูปที่ 4.18 แสดงถึงผลการทดสอบความแข็งพบว่า บนพื้นผิวโลหะฐานเริ่มต้นที่ตำแหน่ง -8 ถึง -2.4 มีค่าความแข็งประมาณ 250 HV และในพื้นที่กระทบร้อนเริ่มต้นที่ตำแหน่ง -2.4 ถึง 0 มีค่าความแข็งประมาณ 340 HV และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งในแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น ที่กระแสเชื่อม 115, 140 และ 165 แอมแปร์ พบว่า ค่าความแข็งของชั้นแนวเชื่อมพอกผิวแข็งมีแนวโน้มของค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนชั้นพอกผิวแข็งที่เพิ่มขึ้น แสดงการ

ทดสอบดังรูปที่ 4.18 ซึ่งมีส่วนคล้ายกับงานวิจัยของ Winarto and Priadi [28] ซึ่งได้อธิบายค่าความแข็งแรงของชั้นแนวเชื่อมที่แตกต่างคือเกิดจากการเงาของส่วนผสมทางเคมีมีผลต่อค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของกระแสเชื่อม พบว่า กระแสเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด คือกระแสเชื่อม 115 แอมแปร์ มีค่าความแข็งแรงประมาณ 825 HV ของแนวเชื่อมชั้นพอกผิวแข็งแรงชั้นที่ 3 และ ค่าความแข็งแรงที่ต่ำที่สุดอยู่ที่กระแสเชื่อมที่ 165 แอมแปร์ ซึ่งเป็นมาจากผลการตรวจสอบค่าแข็งแรงของเฟสสีขาวมีมากกว่าเฟสเข้ม ในกระแสเชื่อม 115 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ก)

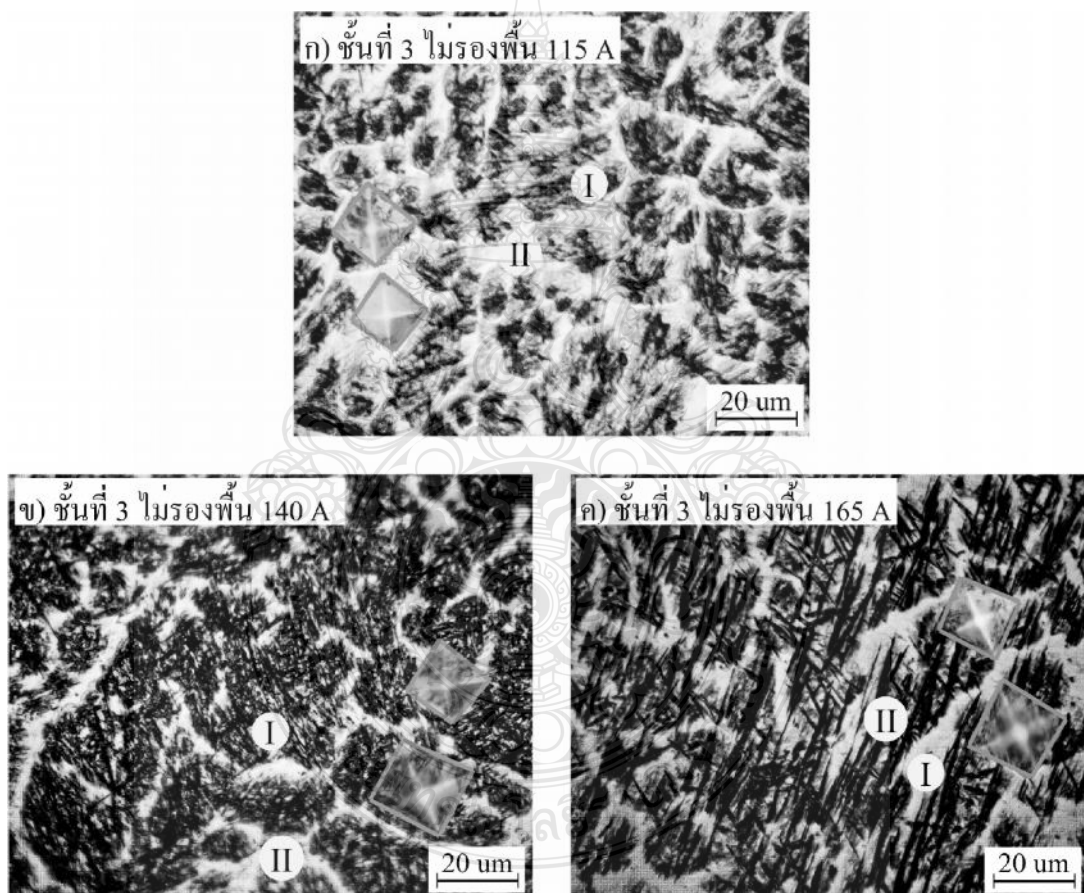


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อม จำนวนชั้นและค่าความแข็งแรงของการเชื่อมพอกผิวแข็งแรงแบบไม่มีร่องพื้น

4.2.5 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งแรงต่อ โครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคในโครงสร้างแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแรงชั้นที่ 3 มีลักษณะเรียวยาวจับตัวเป็นกลุ่มสี่เหลี่ยมจัดเรียงสลับกับพื้นที่สีขาว (พื้นที่เฟสที่เข้มจะใช้สัญลักษณ์ I และในพื้นที่เฟสสีขาวจะใช้สัญลักษณ์ II) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ก-ค) ผลพบว่าโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแรงชั้นที่ 3 ที่กระแสเชื่อม 115 แอมแปร์ มีลักษณะของเฟส I ลักษณะเรียวยาวจับตัวเป็นกลุ่มกระจายตัวสลับกับพื้นที่เฟส II และได้ทำการทดสอบค่าความแข็งแรงของเฟส I และ II ในรูปที่ 4.19 (ก) มีค่าความแข็งแรงของเฟส I เท่ากับ 749 HV และเฟส II มีค่าความแข็งแรงประมาณ 828 HV ซึ่งสังเกตจากรอยกดทดสอบความแข็งแรงมีขนาดเล็ก ขณะที่แนวเชื่อมพอกผิวแข็งแรงชั้นที่ 3 ที่กระแส 140

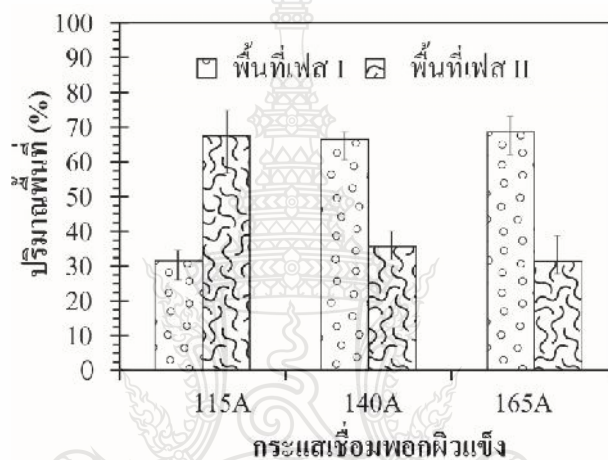
แอมแปร์ แสดงดังรูปที่ 4.19 (ข) มีลักษณะคล้ายคลึงกับแนวเชื่อมชั้นที่ 3 ของกระแส 115 แอมแปร์ ดังรูปที่ 4.19(ก) มีค่าความแข็งของพื้นที่เฟส I ประมาณ 571 HV และค่าความแข็งของพื้นที่เฟสของ II ประมาณ 685 HV และแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ที่กระแสเชื่อม 165 แอมแปร์ แสดงดังรูปที่ 4.19 (ค) มีลักษณะของเฟส I ที่เรียกว่าวอกว่าในกระแสเชื่อม 115 และ 140 แอมแปร์ ดังรูป 4.19 (ก-ข) มีค่าความแข็งของพื้นที่เฟส I ประมาณ 525 HV และพื้นที่ของเฟสที่ II มีค่าความแข็งประมาณ 622 HV ซึ่งเมื่อเปรียบรอยกดทดสอบความแข็งของพื้นที่เฟสพบว่าที่กระแสเชื่อม 165 แอมแปร์ มีขนาดรอยกดทดสอบขนาดใหญ่ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบค่าความแข็งกระแสเชื่อม 165 แอมแปร์ ในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่มีร่องพื้นที่กระแส 115-165 A
 (ก) ชั้นที่ 3 ไม่ร่องพื้น 115 A (ข) ชั้นที่ 3 ไม่ร่องพื้น 140 A (ค) ชั้นที่ 3 ไม่ร่องพื้น 165 A

4.2.6 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่อปริมาณพื้นที่เฟส

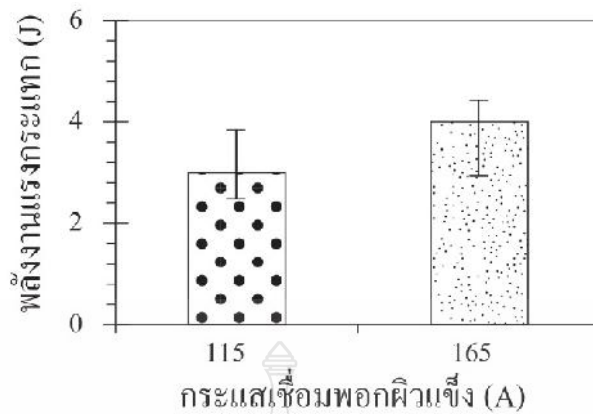
รูปที่ 4.19 แสดงถึงการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ที่พบว่า มีพื้นที่เฟสที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน จึงได้ทำการตรวจสอบปริมาณพื้นที่เฟสด้วยโปรแกรม Material Plus ตามมาตรฐาน ASTM E562 ที่มีความแตกต่างกันของชั้นพอกผิวแข็งชั้น 3 แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่า ในกระแสเชื่อมที่ 115 แอมแปร์ มีปริมาณพื้นที่เฟส I 31.2 % และในเฟส II 68 % และเมื่อเพิ่มกระแสเชื่อมสูงขึ้นไป 140 และ 165 แอมแปร์ พบว่าพื้นที่ของเฟส I มีแนวโน้มสูงขึ้นตามกระแสเชื่อมที่สูงและปริมาณของพื้นที่เฟส II มีแนวโน้มลดลงตามเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมและปริมาณพื้นที่เฟส แบบไม่มีชั้นรองพื้น

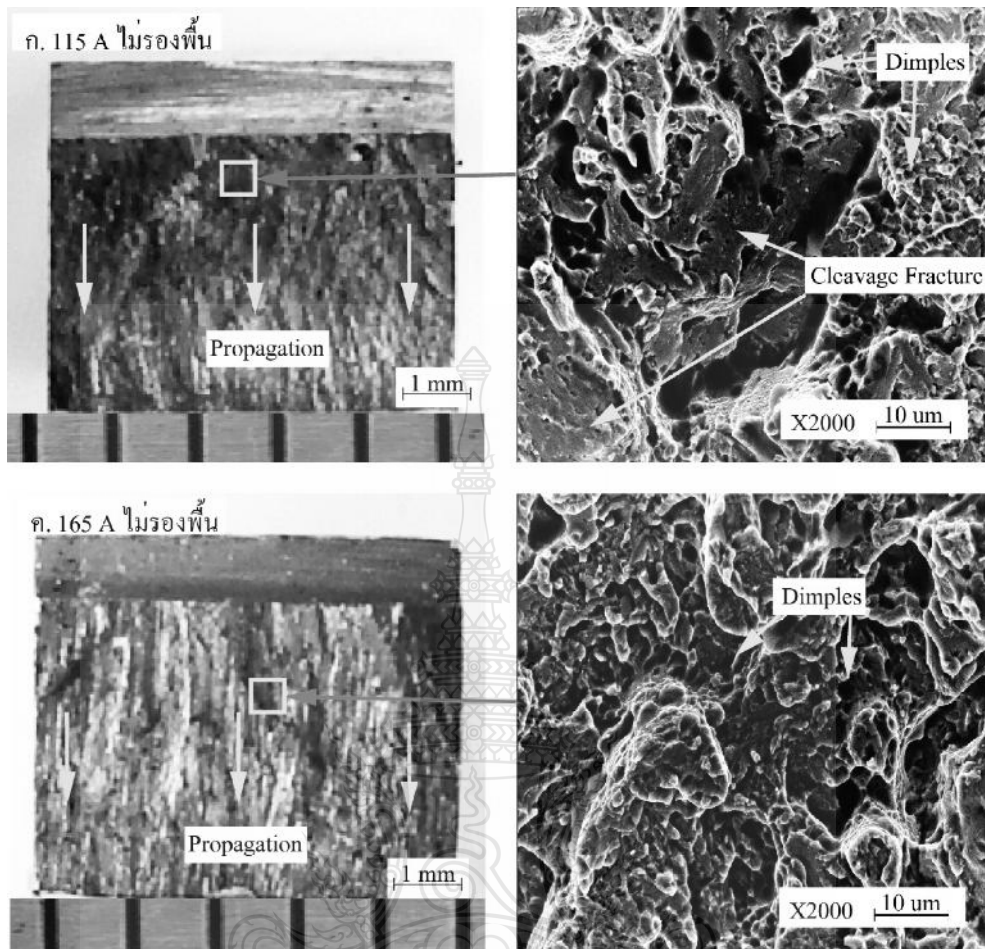
4.2.7 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่อแรงกระแทก

รูปที่ 4.18 ได้แสดงถึงค่าความแข็งของชั้นพอกผิวแข็งของกระแสเชื่อม 115 140 และ 165 แอมแปร์ พบแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีความแข็งสูงสุดในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแส 115 แอมแปร์ และแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีความแข็งต่ำที่สุดในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแส 165 แอมแปร์ จึงได้นำชิ้นงานทั้ง 2 กระแส นำมาทำการทดสอบแรงกระแทกในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งดังรูปที่ 4.21 พบว่าแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่เชื่อมด้วยกระแส 165 แอมแปร์ ได้ค่าพลังงานดูดซับแรงกระแทกเท่ากับ 3 จูล ในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่เชื่อมด้วยกระแส 165 แอมแปร์ ได้ค่าพลังงานดูดซับแรงกระแทกเท่ากับ 4 จูล ดังแสดงในรูป 4.21



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนวมและพลังงานแรงกระแทก แบบไม่รองรับพื้น

และได้นำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบแรงกระแทกมาทำการตรวจสอบแรงกระแทก มาตรวจสอบลักษณะการพังทลาย ของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสนวม 115 และ 165 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าลักษณะการพังทลายของชิ้นงานทดสอบทั้ง 2 กระแสนวมมีลักษณะการพังทลายเริ่มต้นที่บริเวณล่างรอยบากและมีการแพร่กระจายเป็นเส้นตรงจนถึงบริเวณด้านล่างของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก [29] ดังแสดงด้วยลูกศรในรูปที่ 4.22(ก) และ(ค) ได้ทำการตรวจสอบโดยละเอียดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดที่บริเวณพื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ 4.22(ก) และ(ค) พบว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสนวม 115 แอมแปร์ มีลักษณะการพังทลายแบบราบเรียบและมีรูพรุนขนาดเล็กและมีรูขนาดเล็กดังแสดงด้วยลูกศร 4.22(ข) และในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสนวม 165 แอมแปร์ มีลักษณะการพังทลายแบบรูพรุนที่มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ดังแสดงด้วยลูกศรในรูป 4.22(ง) ซึ่งมีส่วนคล้ายในงานวิจัยของ Tsay, Jiang *et.al.* [30] ที่ได้กล่าวถึงชิ้นงานเชื่อมที่ได้ถูกทดสอบแรงกระแทกพบว่าชิ้นงานเชื่อมที่มีค่าความแข็งสูงจะมีลักษณะการพังทลายแบบรูพรุนที่มีขนาดเล็กและพื้นที่ราบเรียบซึ่งลักษณะการพังทลายได้รับผลกระทบมาจากการดูดซับพลังงานที่ต่ำ

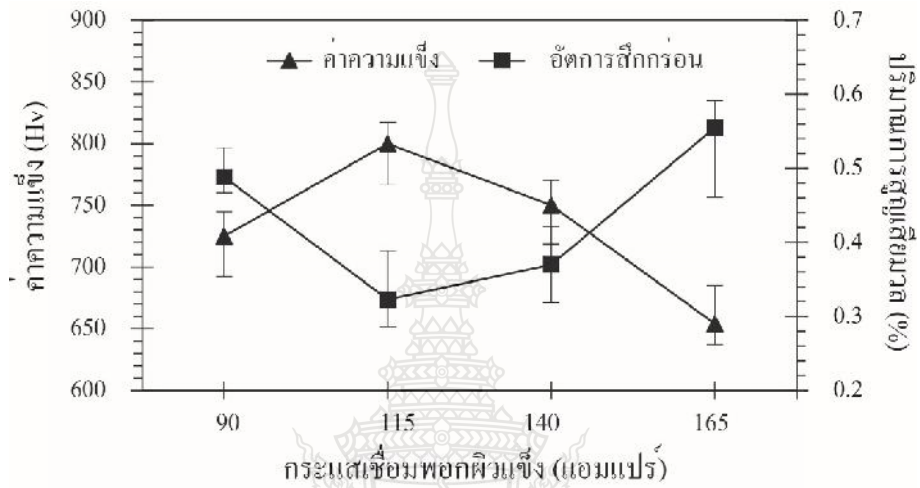


รูปที่ 4.22 ลักษณะการพังทลายของชิ้นงานแบบไม้มองพื้นที่เชื่อมด้วยกระแส 115 และ 165 แอมแปร์
 (ก) 115 A ไม้มองพื้น (ข) 165 A ไม้มองพื้น

4.2.8 อิทธิพลของกระแสเชื่อมพอกผิวแข็งต่ออัตราการสึกกร่อน

การทดสอบอัตราสึกกร่อนจะใช้ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 90, 115, 140 และ 165 แอมแปร์ พบว่า ในกระแสเชื่อม 90 แอมแปร์ มีค่าความแข็งชั้นที่ 3 เฉลี่ย 725 HV และอัตราการสึกกร่อนที่ 0.488 % อัตราการสึกกร่อนน้อยที่สุดอยู่ในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแส 115 แอมแปร์ มีค่าความแข็งชั้นที่ 3 เฉลี่ย 800 HV และอัตราการสึกกร่อน 0.323 % อัตราการสึกกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ค่าความแข็งลดลง และมีอัตราการสึกกร่อนสูงมากที่สุด คือ ชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 165 แอมแปร์ มีค่าความแข็งชั้นที่ 3 เฉลี่ย 654 HV และอัตราการสึกกร่อน 0.556 % ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งมีส่วนคล้ายกับงานวิจัยของ Yüksel and Sahin [31] ที่ได้ทำการทดสอบอัตราสึกกร่อนในชั้นพอกผิวแข็ง ได้กล่าวว่า โครงสร้างจุลภาคบทบาทความสำคัญในการ

ด้านทานอัตราการสึกกร่อนและนอกเหนือไปจากผลกระทบความแข็งของชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง และงานวิจัยของ Chatterjee and Pal [5] กล่าวว่า ค่าความแข็งอาจจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและการสูญเสียน้ำหนักในรูปแบบของอัตราสึกหรือ ที่แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งของชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งสามารถประเมินคร่าวๆ ของความต้านทานการสึกกร่อน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง ปริมาณการสูญเสียมวล และกระแสเชื่อมของชั้น ทดลองแบบไม่มีรองพื้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบจากการเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS S50C โดยการใช้ตัวแปร กระแสไฟเชื่อม 65-165 แอมแปร์ จำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น และการเชื่อมแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น , แบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่ส่งผลต่อ โครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกลสามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น

5.1.2 ค่าความแข็งสูงสุดของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งพบได้ที่ผิวนอกของชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งที่ 3 และค่าความแข็งต่ำที่สุดพบได้ที่บริเวณ โคนฐาน

5.1.3 พื้นที่เฟสที่มีความแข็งสูงกว่าคือ พื้นที่เฟสที่มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุโครเมียม และโมลิบดีนัม สูงกว่า

5.1.4 การเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นส่งผลต่อค่าความแข็งลดลงของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเนื่องจากการละลายของโลหะเชื่อมและปริมาณธาตุผสมที่ลดลงในแนวเชื่อม

5.1.5 การเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้นแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นที่เชื่อมด้วยกระแสไฟ 115 แอมแปร์ มีค่าความแข็งสูงที่สุดมีค่าประมาณ 800 HV ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการต่อต้านอัตราการสึกกร่อนสูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์ที่มีผลต่อสมบัติพอกผิวแข็งเหล็กกล้า JIS S50C เกิดปัญหาในระหว่างการทดลองจึงต้องมีการปรับปรุงหรือใช้ในการทดลองครั้งต่อไปโดยมีข้อเสนอแนะไว้ในวิจัยดังนี้

5.2.1 ในการทดสอบการดูดซับพลังงาน เกิดปัญหาในการเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดตรงตามมาตรฐาน เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งที่สูง

5.2.2 ในระหว่างการเชื่อมเกิดกระแสไฟไม่คงที่เนื่องจากลักษณะการใช้ไฟของโรงงานไม่สมดุลย์ เกิดไฟตก ทำให้การอาร์กของชิ้นงานเกิดข้อขัดข้องของกระแสไฟส่งผลต่อการหลอมละลายในระหว่างการอาร์กในการเชื่อม

รายการอ้างอิง


- [1] สุพร ฤทธิภักดี, "พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็ก AISI 1020," presented at the การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, โรงแรมแอมบาสเตอร์ซิตี จอมเทียน, 2554.
- [2] สุรธยา ลิ้มนา, "การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอกของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4340 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรรมวิธีการเชื่อมมิก/แมก และกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์," วิทยานิพนธ์ปริญญา มหบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหะวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2553.
- [3] M. F. Buchely, J. C. Gutierrez, L. M. León, and A. Toro, "The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys," *Wear*, vol. 259, pp. 52-61, 7// 2005.
- [4] K. Yang, S. Yu, Y. Li, and C. Li, "Effect of carbonitride precipitates on the abrasive wear behaviour of hardfacing alloy," *Applied Surface Science*, vol. 254, pp. 5023-5027, 6/15/ 2008.
- [5] 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.
- [6] กิติพงษ์ กิมะพงษ์ สิริชัย ต่อสกุล อนินท์ มีมนต์ นรพร กลั่นประชา, วิศวกรรม, vol. 1. กรุงเทพฯ: เซนเกจเอนิ่ง, 2550.
- [7] A. Yudiarto. *extractivemetallurgy(onlines)*, 2 0 1 3 . Available: http://extractivemetallurgy.blogspot.com/2013_10_01_archive.html (13 May 2015).
- [8] วิทยา ทองขาว, งานเชื่อม ไฟฟ้า, vol. 1. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2521.
- [9] P. D. Edward Dalder. *Shielded Metal Arc Fusion Welding (onlines)*, 2 0 1 1 . Available: <http://www.daldermaterialsconsulting.com/html/welding-engineering.html> (30 May 2015)
- [10] วัชรพงษ์ มุขเชิด, "การศึกษาการเชื่อมพอกผิวแข็งทนแรงกระแทกสูงในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน " วิทยานิพนธ์ปริญญา มหบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมการเชื่อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, 2551.

- [11] S. Kulikov. *Agricultural Mechanics Graphics(online)*, 2 0 0 6 . Available: <http://www.agedweb.org/agmech/TOC.htm>, (12 May 2015)
- [12] สมบูรณ์ เต็งหงษ์เจริญ, ลวดเชื่อม, vol. ม.ป.ป. กทม.: ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ.
- [13] V. Shibe and V. Chawla, "ENHANCEMENT IN WEAR RESISTANCE BY HARDFACING: A REVIEW " *Mechanica Confab* vol. 2, pp. 2320-2491, 2013.
- [14] 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.
- [15] S. Selvi, S. P. Sankaran, and R. Srivatsavan, "Comparative study of hardfacing of valve seat ring using MMAW process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 207, pp. 356-362, 10/16/ 2008.
- [16] J. J. Coronado, H. F. Caicedo, and A. L. Gómez, "The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits," *Tribology International*, vol. 42, pp. 745-749, 5// 2009.
- [17] Y. C. Lin and K. Y. Chang, "Elucidating the microstructure and wear behavior of tungsten carbide multi-pass cladding on AISI 1 0 5 0 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 219-225, 1/19/ 2010.
- [18] S. Gao, H. Nakashin, M. Yamamoto, K. Shinozaki, K. Kadoi, H. Watanabe, *et al.*, "Development of WC Hard-facing Welding Process using Pulse Heated Hot-wire Gas Tungsten Arc Welding System," *QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY*, vol. 31, pp. 57s-60s, 2013.
- [19] M. JOVANOVIC, Gabriel RIHAR, W. Institute, S. Ljubljana, and J. GRUM, "Analysis of Ultrasonic Indications in Lack of Fusion Occurring in Welds," *ECNDT*, p. 213, 2006.
- [20] K. Schafer, B. Ruchte, and R. Pithadia, "Segregation, Banding, and Inclusions in AISI 1050 Carbon Steel," *Materials Processing and Design*, pp. 430-440, 2010.
- [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," *Journal of Materials Science*, vol. 43, pp. 12-22, 2008/01/01 2008.

- [22] Y. C. Lin and K. Y. Chang, "Elucidating the microstructure and erosive wear of ceramic powder alloying on AISI 1050 steel," *Surface and Coatings Technology*, vol. 207, pp. 493-502, 8/25/ 2012.
- [23] 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.
- [24] Q. Wu, F. Lu, H. Cui, X. Liu, P. Wang, and X. Tang, "Role of butter layer in low-cycle fatigue behavior of modified 9Cr and CrMoV dissimilar rotor welded joint," *Materials & Design*, vol. 59, pp. 165-175, 7// 2014.
- [25] F. Molleda, J. Mora, J. R. Molleda, E. Mora, and y. B. G. Mellor, "The importance of spatter formed in shielded metal arc welding," *Materials Characterization*, vol. 58, pp. 936-940, 10// 2007.
- [26] S. Lu, H. Fujii, and K. Nogi, "Sensitivity of Marangoni convection and weld shape variations to welding parameters in O₂-Ar shielded GTA welding," *Scripta Materialia*, vol. 51, pp. 271-277, 8// 2004.
- [27] A. C. Crespo, A. Scotti, and M. R. Pérez, "Operational behavior assesment of coated tubular electrodes for SMAW hardfacing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 199, pp. 265-273, 4/1/ 2008.
- [28] 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.
- [29] A. R. Galvis E and W. Hormaza, "Characterization of failure modes for different welding processes of AISI/SAE 304 stainless steels," *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, pp. 1791-1799, 10// 2011.
- [30] L.-W. Tsay, Y.-C. Jiang, and C. Chen, "The Effect of Preheating on Notched Tensile Strength and Impact Toughness of Ti-6 Al-6 V-2 Sn Laser Welds," *MATERIALS TRANSACTIONS*, vol. 52, pp. 406-411, 2011.

- [31] N. Yüksel and S. Sahin, "Wear behavior–hardness–microstructure relation of Fe–Cr–C and Fe–Cr–C–B based hardfacing alloys," *Materials & Design*, vol. 58, pp. 491-498, 6// 2014.



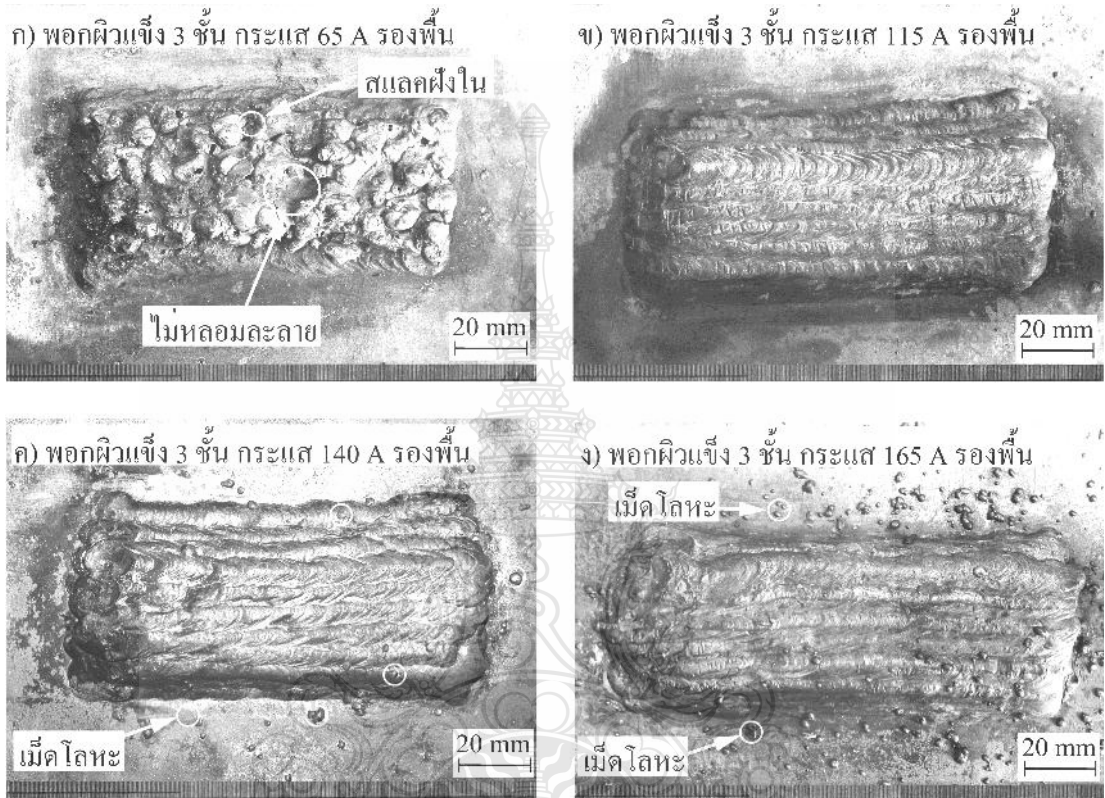


ภาคผนวก ก

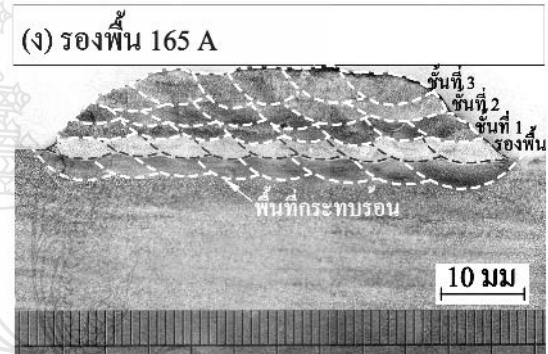
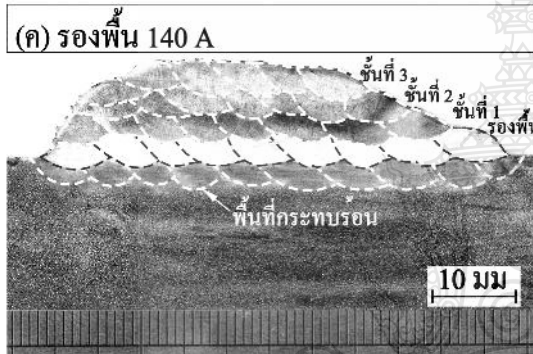
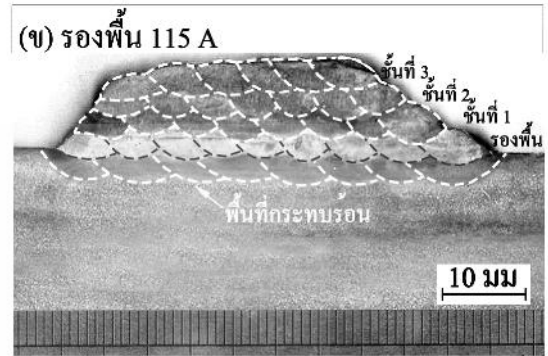
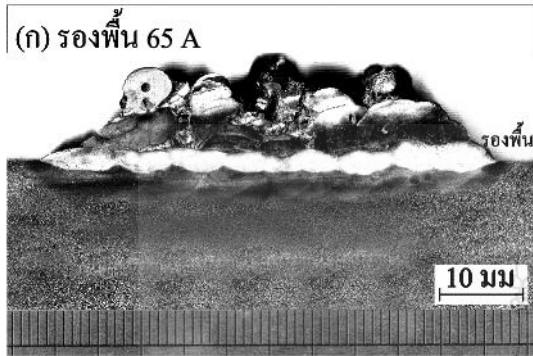
ลักษณะโครงสร้างมหาภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

ก.1 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อม

รูปที่ ก.1.1 ลักษณะผิวหน้าของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่กระแสเชื่อม 65,115,140และ165 A



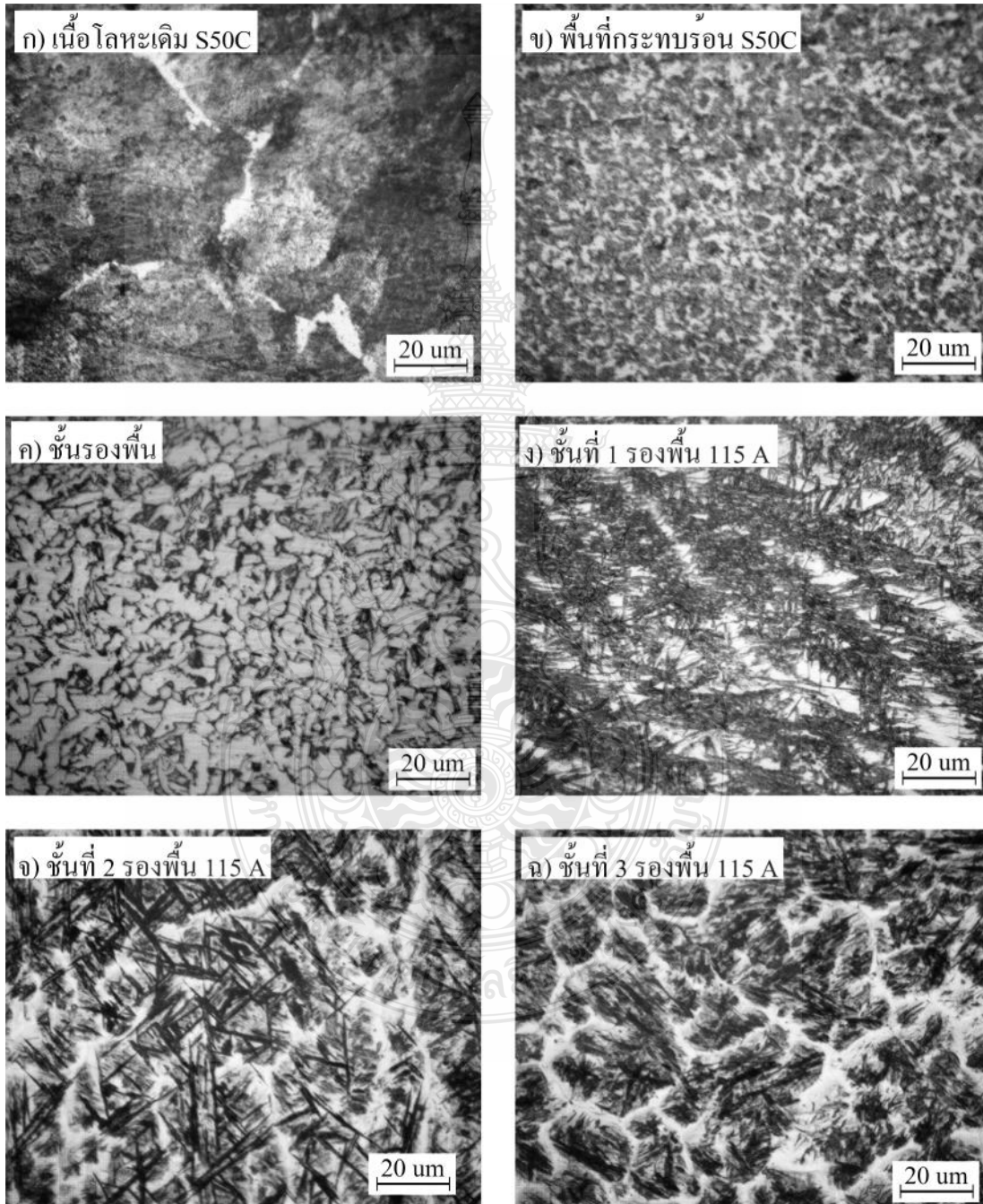
รูปที่ ก.1.2 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่กระแทกเชื่อม 65,115,140และ165 A



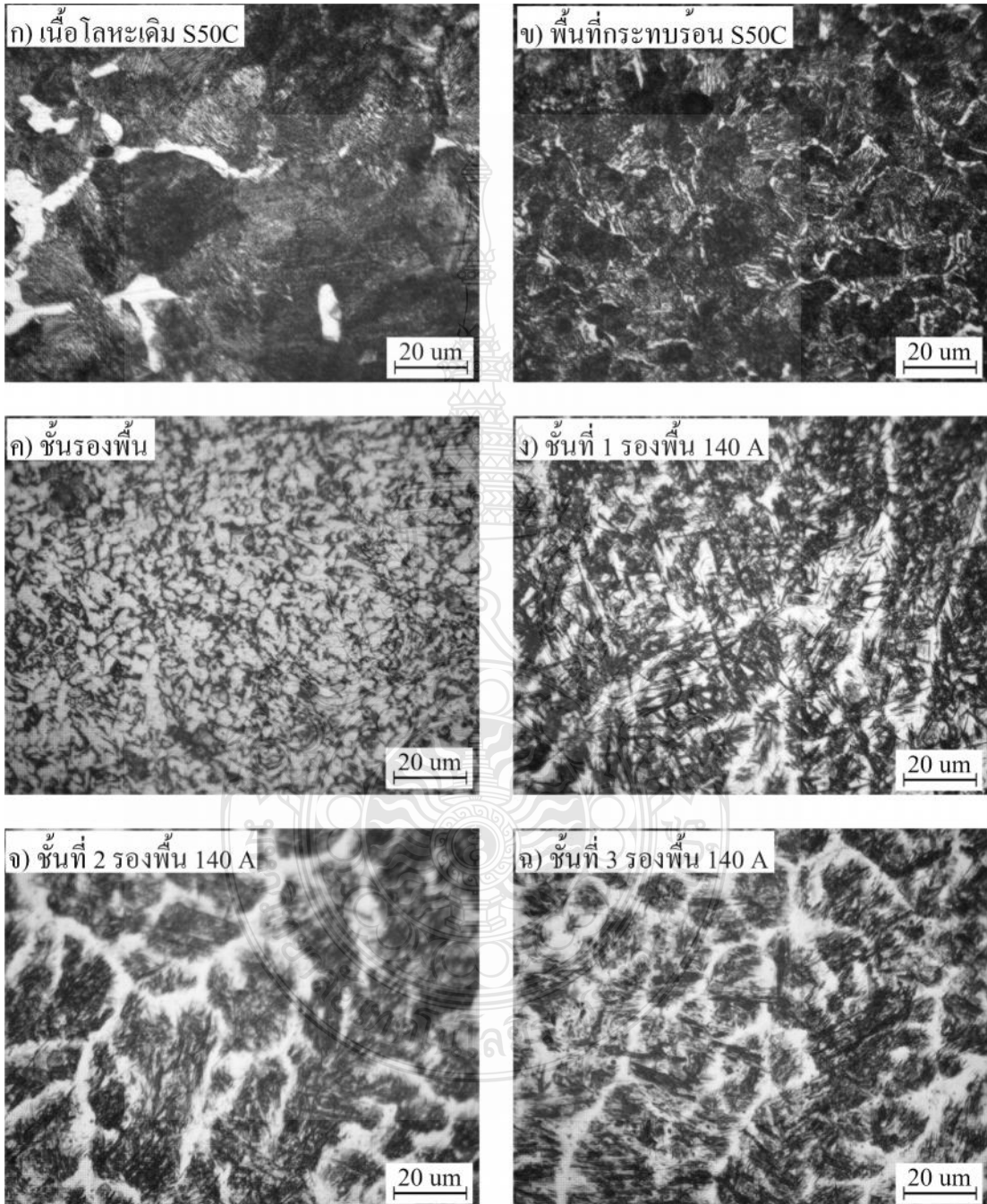
ก.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

รูปที่ ก.2.1 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมผอคว้างแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่กระแสรอง

115 A

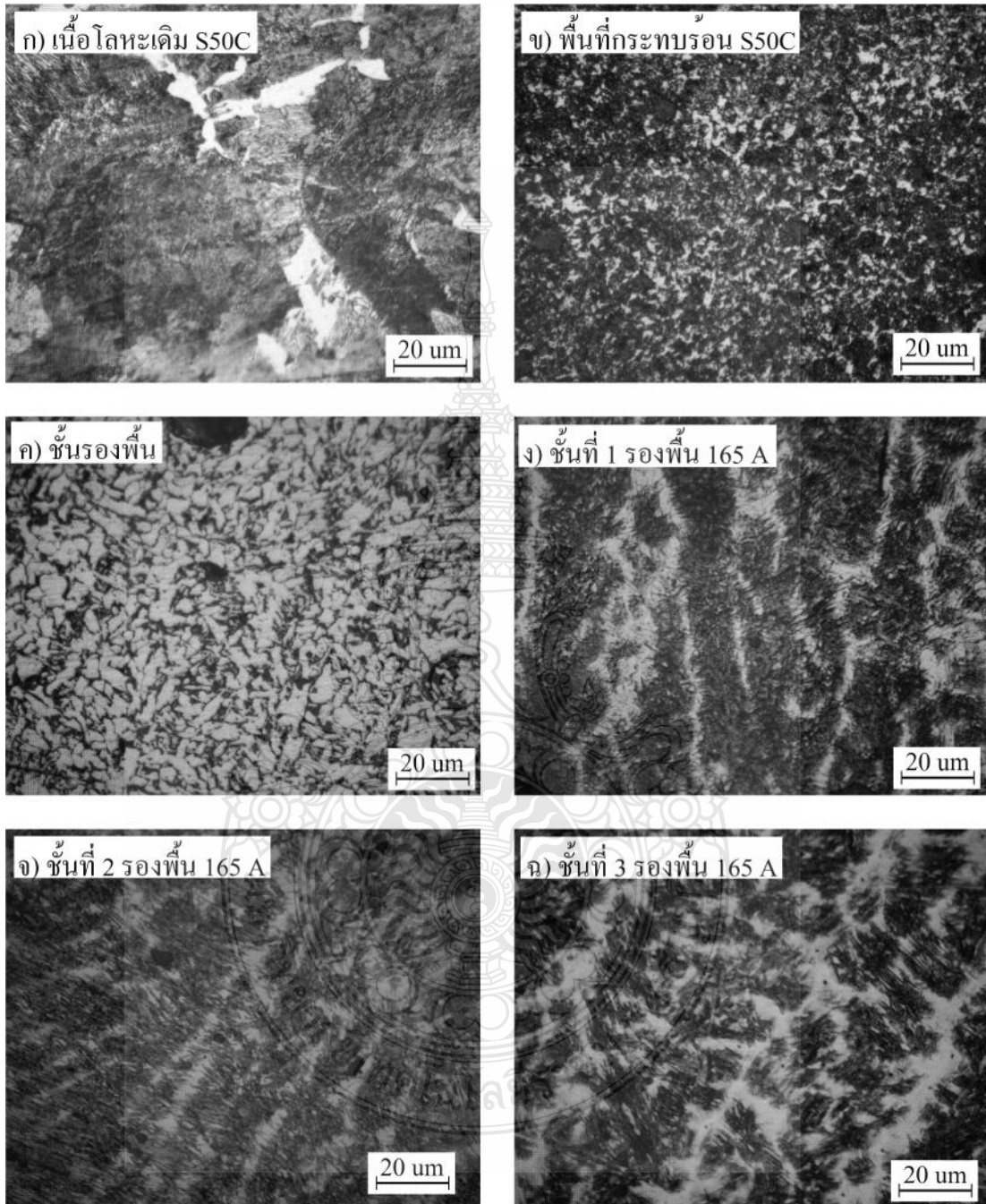


รูปที่ ก.2.2 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่กระแสเชื่อม
140 A

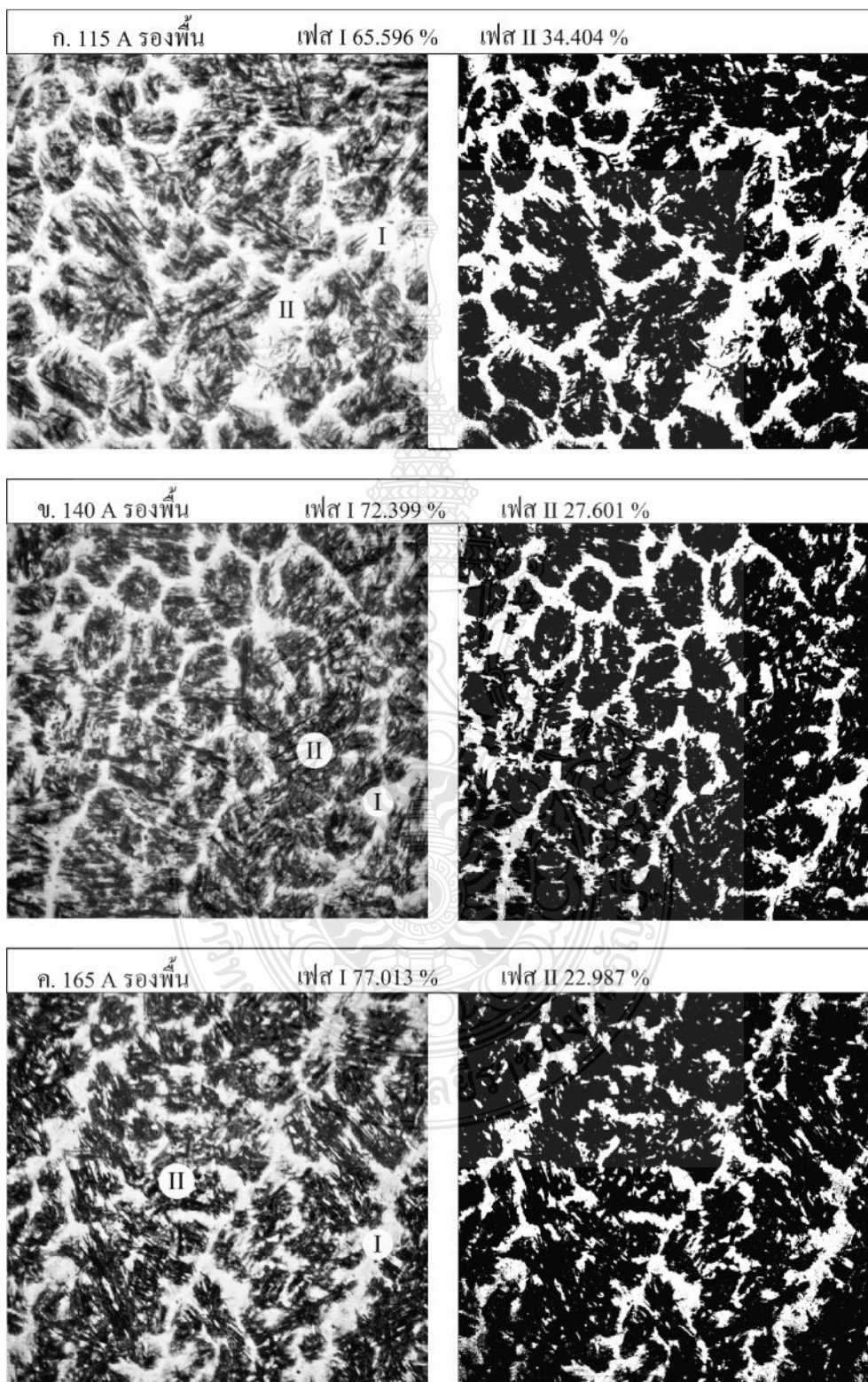


รูปที่ ก.2.3 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่กระแสเชื่อม

140 A



รูปที่ ก.2.4 การตรวจสอบปริมาณพื้นที่เฟสในบริเวณ โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 แบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่กระแสเชื่อม 115,140 และ 165 A



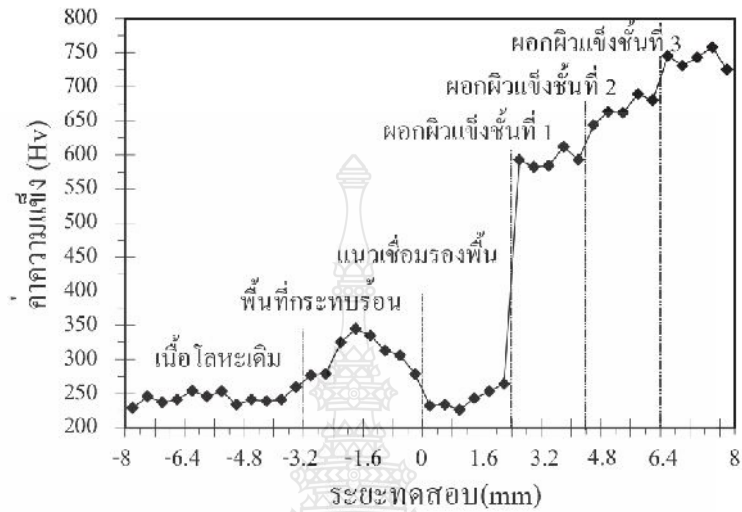


ภาคผนวก ข

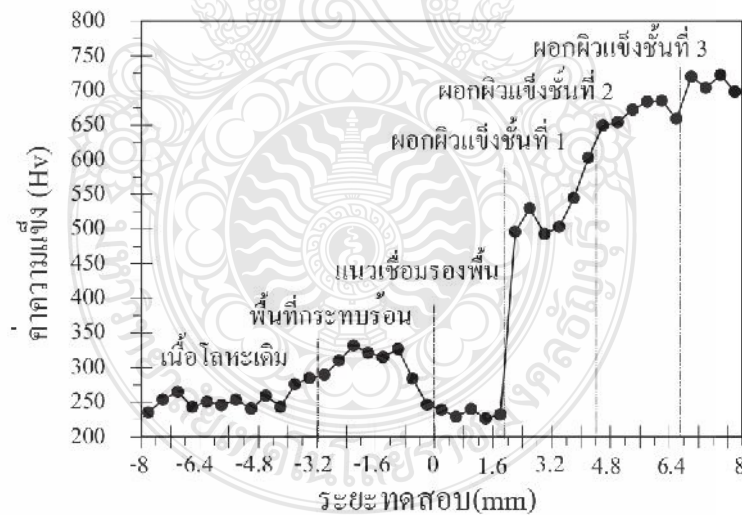
ผลการทดสอบสมบัติทางกล

ข.1 ค่าทดสอบความแข็ง

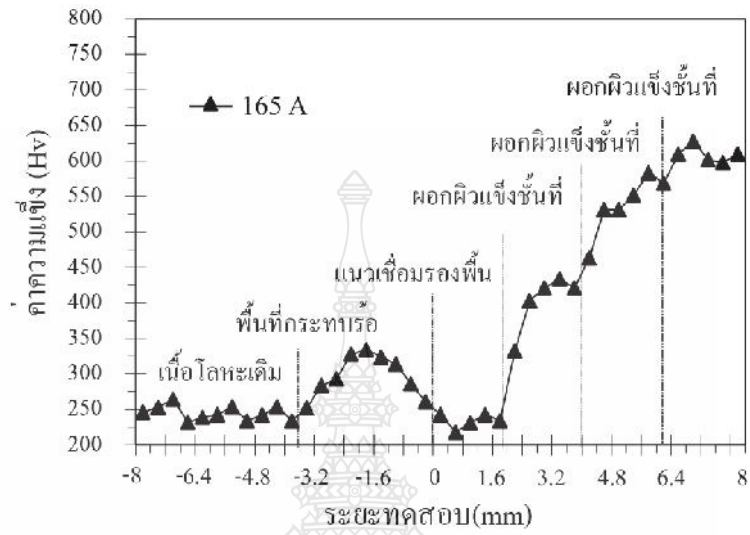
รูปที่ ข.1.1 ค่าความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมผอควแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่กระแสเชื่อม 115 A



รูปที่ ข.1.1 ค่าความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมผอควแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่กระแสเชื่อม 140 A



รูปที่ ข.1.1 ค่าความแข็งแรงกระแทกของแนวเชื่อมผอควแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นที่กระแสะเชื่อม 165 A





ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



บทคัดย่อการประชุมทางวิชาการระดับชาติ หอบ.วิจัย ครั้งที่ 9

การพัฒนาห้องถิ่นสู่ภูมิภาคอาเซียน : ความหลากหลายบนพื้นที่ชายแดน

2 - 3 กรกฎาคม 2558

ณ อาคารเทพรัตนสิริปภา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี





ประชุมวิชาการ มอบ. วิจัย ครั้งที่ 9

การพัฒนาท้องถิ่นสู่ภูมิภาคอาเซียน : ความหลากหลายบนพื้นที่ชายแดน

2 – 3 กรกฎาคม 2558

อาคารเทพรัตนสิริปภ มหาวิทยาลัยออบราชธานี

สารบัญ

	หน้า
<ul style="list-style-type: none"> • การผสมผสานภูมิปัญญาท้องถิ่นกับองค์ความรู้สากลในการเพาะพันธุ์และอนุบาลพันธุ์ปลาน้ำจืดของชุมชนโพรงมะเดื่อ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม นางสาวรัชณี ลีมีปฐมชัยชาญ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 	181
<ul style="list-style-type: none"> • ผลของ 17 beta estradiol ต่อการแปลงเพศปลาหมอ นายธนภัทร วรปัสสุ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ 	183
<ul style="list-style-type: none"> • การพัฒนาผลิตภัณฑ์กุนเชียงปลาเพื่อสุขภาพ ผศ.ประภาพรณ เพียรชอบ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 	185
<ul style="list-style-type: none"> • การใช้สารทดแทนสารประกอบฟอสเฟตในการปรับปรุงคุณภาพเต้าหู้ปลา ดร.พุดิยา 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.สุทธินาด หนูทองแก้ว คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 	189
<ul style="list-style-type: none"> • การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงขึ้นพอกผิวแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C โดยการเชื่อมอาร์กคลวดหุ้มฟลักซ์ นายอรรถกร จันทร์ชนะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 	191
<ul style="list-style-type: none"> • อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS-SKD11 ต่ออัตราการสึกหรอของผิวโลหะเชื่อมอาร์คคลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ นายคณิต สิทธิพันธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 	193
<ul style="list-style-type: none"> • ผลการฝึกรักษาหัวใจเบื้องต้นต่อความเครียดในมารดาหลังคลอดที่บุตรได้รับการรักษาด้วยการส่องไฟ นางสาวนันท์พร สายเมฆ คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชธานี 	195
<ul style="list-style-type: none"> • ผลของการสอนรายวิชาจิตวิทยาสำหรับพยาบาลต่อพฤติกรรมการเรียนรู้ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาแห่งชาติ ดร.สมจิตต์ ลูประสงค์ คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 	197

การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงชั้นพอกผิวแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน
JIS-S50C โดยการเชื่อมอาร์กลดอุณหภูมิ

อรรถกร จันทร์ชนะ^{1*} ดำรงค์มิตร เขียนขุนทด² อรจิตร แจ่มแสง³ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์¹ และ ชัยยะ ปราณีตพลกรัง¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

²แผนกวิชา ช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี

³สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

วิทยาเขตวังไกลกังวล

*E-mail : Atthakorn1989@gmail.com

บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นหนึ่งในวิธีการซ่อมแซมเพื่อเพิ่มโลหะที่มีความแข็งแรงบนผิวของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกษตรซึ่งหลุดหายไป เนื่องจากกลไกการสึกหรอในเครื่องจักร ดังนั้น การพัฒนาตัวแปรกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชั้นพอกแข็งที่มีความแข็งแรงและอัตราการสึกหรอต่ำจึงมีการกระทำอย่างต่อเนื่องบทความนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นการเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของผิวพอกแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยการเชื่อมอาร์กลดอุณหภูมิ ผลการทดลองโดยสรุปพบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นส่งผลต่อค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมแสดงถึงความแข็งแรงสูงสุด 750 HV ที่ผิวบนของชั้นพอกแข็งที่ 3 และแสดงค่าความแข็งแรงต่ำสุด 225 HV ที่โลหะฐาน การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่า การเพิ่มปริมาณของโครเมียมและโมลิบดีนัมส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มความแข็งแรงของชั้นพอกผิวแข็ง

คำสำคัญ : การเชื่อมพอกผิวแข็ง ชั้นพอกผิวแข็ง



Comparative Study of Hard-faced Layer Hardness on JIS-S50C Carbon Steel by Shielded Metal Arc

Atthakorn Chanchana^{1*}, Damronkmitr Hiankhunthod², Orarit Jaemsang³
Kittipong Kimapong¹ and Chaiya Praneetpongpan¹

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

² Department of Welding Technology of Saraburi Technical College

³ Industrial Technology Engineering Faculty of Industrial of Technology Rajamangala University of Technology of Technology
Rattanakosin, Wang Klai Kang Wong Campus

*E-mail : Atthakorn1989@gmail.com

Abstract

Hard-faced welding is one of repairing methods for raising the hard metal on the agricultural machine part surfaces that were removed by the wear mechanism in the machine. So, investigation of an optimized welding process parameter that produces hard and low wear rate of the hard-face layer is still performed. This paper aims to effect study of hard-facing layer amount on microstructure and hardness of JIS-50C carbon steel by shielded metal arc welding. The summarized results are as follows. An increase of hard-facing layer amount affected to increase the hardness of the layer. The hardness of the welds showed a maximum hardness of about 750 HV at a top surface of 3rd layers of the welds and showed a minimum hardness of about 225 HV at a base metal. Microstructure investigation showed that an increase of chromium and molybdenum amount affected directly to increase the hardness of hard-facing layer

Keywords : Hard-faced , hard-face layer





ประกาศมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
เรื่อง แต่งตั้งกองบรรณาธิการการประชุมวิชาการ 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 จึงแต่งตั้งกองบรรณาธิการการประชุมวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 9 ดังมีรายชื่อต่อไปนี้

1. หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพันธกิจสังคม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

มีหน้าที่ ดูแลการบริหารและการดำเนินการจัดทำหนังสือประมวลบทความในการประชุมทางวิชาการ มอบ.วิจัย ครั้งที่ 9 (Proceedings) และพิจารณาความเหมาะสมในการตีพิมพ์

2. กองบรรณาธิการ

- | | |
|---|--|
| 1) รองศาสตราจารย์สุวัฒน์ วีระพงษ์ธนากร | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 2) รองศาสตราจารย์ณัฐจาพร พิชัยณรงค์ | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 3) รองศาสตราจารย์ชาญณรงค์ สายแก้ว | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 4) ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิเศษกาญจนา ทองหัว | มูลนิธิประชาชนสังคม จังหวัดอุบลราชธานี |
| 5) ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรทัย เลียงจินดาถาวร | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 6) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชมพูนุท ธาตรีเชียร | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 7) ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุ่งจีมี บุญดาว | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 8) ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรุณญา พิมพ์มงคล | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 9) ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิริยา พรหมกอง | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 10) ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมบัติ สิ้นสุขวาน | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 11) ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุมนา นีระ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 12) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรชญา มณีเนตร | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |

- | | |
|--|------------------------------|
| 13) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาติรี ฝ่ายคำตา | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 14) ผู้ช่วยศาสตราจารย์กองพล อารีรักษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 15) ผู้ช่วยศาสตราจารย์กตัญญู แก้วหานาม | มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์ |
| 16) อาจารย์ชญาดา ตานวงศ์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี |
| 17) อาจารย์วัชรีย์ เกษพิชัยณรงค์ | มหาวิทยาลัยมหิดล |

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

3. ฝ่ายจัดการ

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1) นางสาวปัญจิรา สุกดล | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 2) นายสุภวัฒน์ โสวรรณิ | 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 ชีระวัฒน์สุข-
อธิการบดีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

รองศาสตราจารย์ ดร.ดำรงค์ วัฒนา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.เอมอัชฌา วัฒนบูรานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย อัครลาภสกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ณรงค์ สิงห์ปุระอุดม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลธิป สมานิติโต	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมาภรณ์ พิมพ์ทอง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรธิภา องค์คุณารักษ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี ฝ้ายคำดา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.จักรกริช พฤษการ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.พิจิตรว แก้วสอน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.อรพรรณ บุตรกัตติญญ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.เอกภูมิ จันทระขันตี	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 ตันตระกูลบัณฑิตย์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จินตนา สมสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรัชญา มณีเนตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกาดี แก้วกันเนตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวิชัย ศรีโกคังกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชองคณา แดงกัณฑ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมานา นิระ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ณอมพร เลหาจรัสแสง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิ่งฟ้า แสงลี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดวงหทัย กาศวิบูลย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฤตินันท์ สมทรัพย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีระพงษ์ แสงชูโต	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ดร.กรिता แก้วคง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล อารีรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ทิรา เจียรณีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา 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 ปัญญาวศตระกูล	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรินภา กิจเกื้อกุล	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจมาศ จันทะภา ไทบูลย์กิจกุล	มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี
ดร.วศิน ยูวนะเดมีย์	มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กรรณก ทิพรส	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.กัญญารัตน์ โคจร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.มนตรี วงษ์สะพาน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐจาพร พิชัยณรงค์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนวัฒน์ ไชยรัตน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทียนทอง ทองพันธ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑา เก่งการพานิช	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ เกษมผลกุล	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพกร ภูระยา	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปองรัตน์ รัตนปัญญาวงศ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.วัชรวิ เกษพิชัยณรงค์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กตัญญู แก้วหานาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ วัชรวิ กาญจน์ศิริดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรกร โพธิ์งาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุบิน ยูระรัช	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทัศนีย์ นະແສ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชิตชนก เข็มขาว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
ดร.ณรงค์ศักดิ์ ครอบคอบ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริชวัลย์ ธีรสติยาพิทักษ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต
ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ วงศ์พิเชษฐ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ ธีระพงษ์นาร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ สมหมาย ชินนาค	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา พุทธิยะ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา รุ่งรัชกานนท์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรา สิงห์ทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท ธารีเสียร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชริตา ปุกหุด	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ จึงวัฒน์ตระกูล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาทิพย์ แผลมคม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาภรณ์ เจริญบุตร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งรัศมี บุญดาว	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริยา พรหมกอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเขาวน	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ สีบุตร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุระ ภูมิพรหม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวดี กงเพชร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แสวง วัชรชนกิจ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรทัย เลียงจินดาถาวร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรัญญา พิมพ์มงคล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ อ่อนสอาด	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจัน มณีนิล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประชาสันติ ไตรยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร.ท.ดร.สมญา ภูษะยา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศรีประไพ ธรรมแสง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.กิตติ เหลาสุภาพ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.จิตติมาพร ภูมิพรพงษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ณรุจน์ วศินปิยมงคล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ณัฐชวัล โกคาพานิชวงษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ทรงสุภา พุ่มชุมพล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ธามินทร์ เครือโสม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ธารชุตตา พันธน์กุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ประทีป ม่วงอ่อน	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ศุภชัย วรรณเลิศสกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.สุมาลี เจริญจิตร	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.สุวภัทร ศรีจงแสง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.เหมวรรณ เหมะนัต	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.อนิรุทธ สืบสิงห์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ชุกาศิรี อภินันท์เดชา	วิทยาลัยนครราชสีมา

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอรรถกร จันทร์ชนะ
วัน เดือน ปีเกิด	29 มิถุนายน 2532
ที่อยู่	2/4 ถนน ลำลูกกา ตำบลลาดสวาย อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
การศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรออกแบบเครื่องจักร บริษัท กรุงเทพอาหาร จำกัด (มหาชน) แผนกวิจัยและพัฒนา พ.ศ.2554 - พ.ศ.2555
พ.ศ. 2554-2555	วิศวกรซ่อมบำรุงเครื่องจักร บริษัท สุนทร จำกัด แผนกซ่อมบำรุงเครื่องจักร พ.ศ.2555 - พ.ศ.2557
พ.ศ. 2555-2557	