

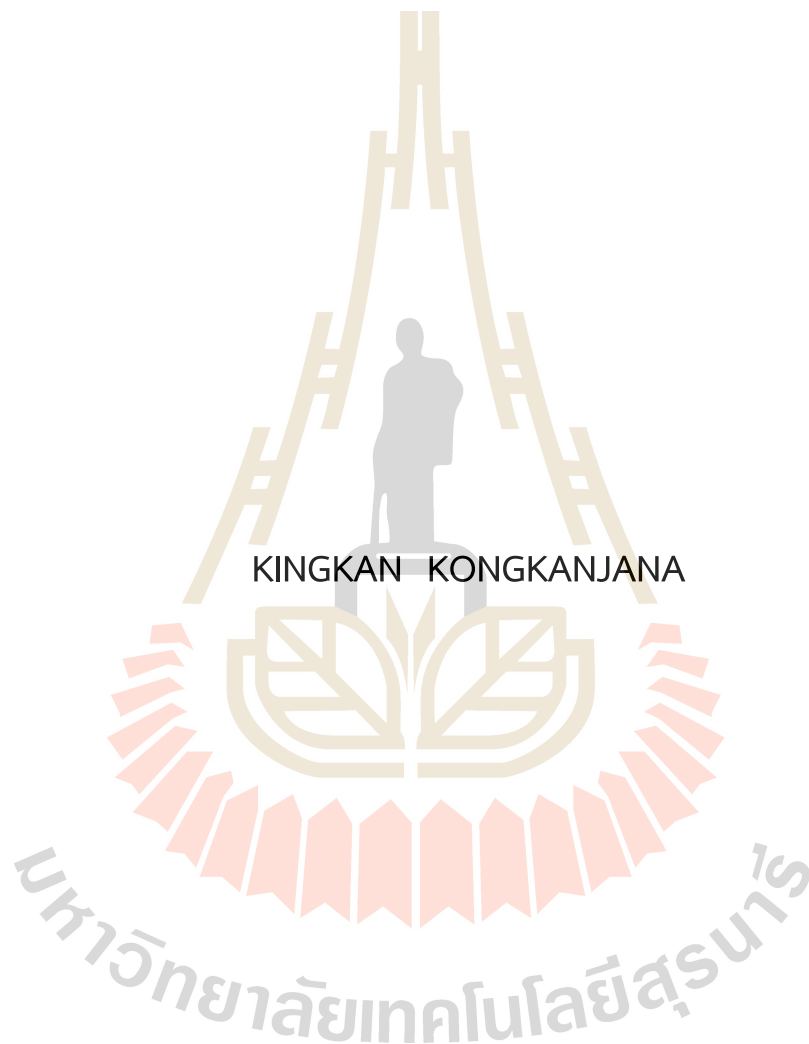
การศึกษาการเชื่อมซ่อมมีดลับอ้อยเพื่อยืดอายุการใช้งานด้วยกระบวนการ
เชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน



นางสาวกิ่งกาญจน์ กองกาญจนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

THE STUDY OF SUGAR CANE SHREDDER REPAIRING FOR LIFE
EXTENSION BY USING HOT-WIRE TIG WELDING PROCESS

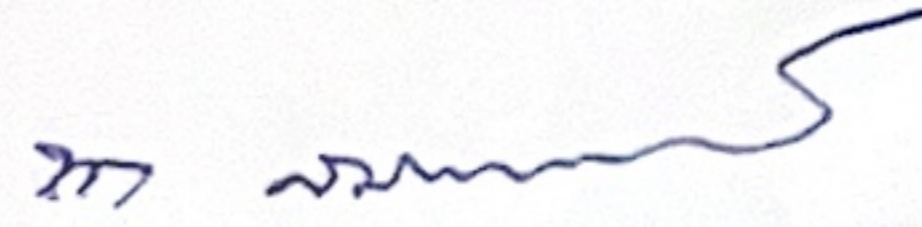


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Industrial System and Environmental Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022


การศึกษาการเชื่อมข้อมมีดสับอ้อยเพื่อยืดอายุการใช้งานด้วยกระบวนการ
เชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรา สมัตถภาพงค์)
ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จंगล ศรีธรร)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รองศาสตราจารย์ ดร.อิสรทัต พังอัน)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร. พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กึ่งกาญจน์ กองกาญจน์ : การศึกษาการเชื่อมซ่อมมีดสับอ้อยเพื่อยืดอายุการใช้งานด้วย
กระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (THE STUDY OF SUGAR CANE SHREDDER
REPAIRING FOR LIFE EXTENSION BY USING HOT-WIRE TIG WELDING PROCESS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงกล ศรีธร, 112 หน้า.

คำสำคัญ: การเชื่อมซ่อม/ การเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน/ โครงสร้างจุลภาค/ โครงสร้างมหภาค

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลในประเทศไทยมีการเติบโตเพิ่มขึ้นทุกปี โดยใน
อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลนี้มีลักษณะพิเศษ คือ ในหนึ่งปีจะสามารถดำเนินการเดินเครื่องจักรเพื่อ
ผลิตน้ำตาลได้เพียง 3-4 เดือนต่อปีเท่านั้น เนื่องจากเป็นช่วงของการเก็บเกี่ยวผลผลิตอ้อย ในช่วงเวลา
ดังกล่าวโรงงานจึงต้องทำการเดินเครื่องจักรผลิตตลอดเวลา เพื่อรองรับผลผลิตที่เข้าสู่โรงงานใน
ปริมาณมาก ส่งผลให้โรงงานอยู่ในภาวะกำลังการผลิตส่วนเกิน รวมไปถึงชิ้นงานและอุปกรณ์ใน
เครื่องจักรมีการทำงานตลอดเวลาจึงเกิดการสึกหรอเสียหายได้ง่าย โดยมีดสับอ้อยเป็นชิ้นส่วนที่มีการ
สึกหรออยู่บ่อยครั้ง จึงมีความจำเป็นต้องหยุดเครื่องเพื่อซ่อมแซมหรือเปลี่ยนใบมีด ส่งผลให้กำลังการผลิต
ลดลง และเกิดค่าเสียโอกาสในการหยุดเครื่องจักรในการซ่อมบำรุงเป็นอย่างมาก

ในการศึกษานี้ได้มีการใช้กระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน เพื่อเป็นแนวทางใหม่ในการ
ยืดอายุการใช้งานของใบมีดสับอ้อยซึ่งจะช่วยให้สามารถสร้างชิ้นเชื่อมพอกผิวแข็งได้สะดวก รวดเร็ว
และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผ่านการเพิ่มกระแสที่ใช้ในการเชื่อมและการทำให้ลวดมีอุณหภูมิความร้อน
ใกล้เคียงบ่อหลอมก่อนทำการเชื่อม อีกทั้งยังสามารถควบคุมพลังงานความร้อนให้เข้าสู่ชิ้นงานได้ให้มี
ความร้อนที่ไม่สูงจนเกินไป เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานหลอมละลายและเกิดการเงื้อง่า กับชิ้นเชื่อมพอก
ผิวแข็งจนสูญเสียคุณสมบัติที่ดีของชั้นพอกผิวแข็งไป โดยในการศึกษามุ่งเน้นในการหาค่าตัวแปรใน
การเชื่อมซ่อมมีดสับอ้อยให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน

ผลการทดลองพบว่าการเลือกใช้ค่าตัวแปรกระแสไฟในการเชื่อมที่ 140A กระแสไฟในการอุ่น
ลวดเชื่อม 120A ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 70 มม./นาที และความเร็วในการป้อนลวด 1 ม./นาที
จะทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีขนาดแนวเชื่อมที่เหมาะสม มีความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 731.60 HV และมีการ
ต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมอยู่ที่ 0.0850 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการนำไป
ประยุกต์ใช้ในการเชื่อมซ่อมมีดสับอ้อย

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา ก้องกมล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา จ.

KINGKAN KONGKANJANA : THE STUDY OF SUGAR CANE SHREDDER REPAIRING FOR LIFE EXTENSION BY USING HOT-WIRE TIG WELDING PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JONGKOL SRITHORN, Ph. D., 112PP.

Keyword: Repair Welding/Hot-Wire TIG Welding/ Microstructure/ Macrostructure

Thailand's sugar industry is currently expanding annually. This has a distinctive feature in the sugar industry. It can only produce for three to four months a year. Because of sugar cane harvesting is in season. The factory had to run the production equipment continuously at that time to facilitate the manufacturing process that runs heavily throughout the factory. As a result, the factory was in a state of overcapacity. The workpieces and equipment in the machine are working all the time, so it is easy to wear and damage. The sugarcane shredder is a piece that wears out often. In order to fix or replace the sugarcane shredder, the machine must be stopped. result in decreasing the production capacity Additionally, pausing the machine for maintenance has a significant opportunity cost.

A hot-wire TIG welding process was employed in this study. It will be easier, more quickly, and more effective to produce a hard-facing layer with this new approach of extending the life span of the sugar cane shredder. Through increasing the welding current and heating the wire to a temperature close to the melting pool before welding. In order to prevent the workpiece from becoming overheated, it can also regulate the heat energy entering it. to stop the workpiece from melting and blending with the hard-faced welding layer until the hard-faced layer's beneficial characteristics are lost. The goal of the study is to identify the factors that can be used to modify the sugar cane shredder to have the necessary properties using hot wire TIG welding.

According to the studying results, using arc current variables of 140A, hot wire current 120A, 70mm/min for travel speed, and 1m/min for wire feeding speed was the most appropriate approach. Obtain a welding line with an appropriate weld line.

The best value for use in welding for sugarcane shredder repair is its average hardness of 731.60 HV and wear resistance of the weld bead of 0.0850 g



School of Industrial Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature ก้องเกียรติ
Advisor's Signature ก.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความอนุเคราะห์ในการแนะนำและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการและในด้านการดำเนินงานวิจัยจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงกล ศรีธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.อิศรทัต พึ่งอ้น หัวหน้าศูนย์เทคโนโลยีซ่อมบำรุง สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาให้คำแนะนำปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง รวมไปถึงแนวทางในการดำเนินงานที่ถูกต้อง ทำให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำในการทำงาน การดำเนินชีวิต รวมไปถึงกำลังใจที่ได้รับตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน รุ่นน้อง นักศึกษาปริญญาโทและเอก สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยช่วยเหลือในขั้นตอนการทดลองงานวิจัย ช่วยให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างรวดเร็วและราบรื่นมากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน และสนับสนุนในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงมาโดยตลอด

กิงกาญจน์ กองกาญจนะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	4
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3. สมมติฐานการวิจัย.....	4
1.4. ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5. ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และสถานที่ทำการวิจัย.....	4
1.6. แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2. ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของกระบวนการเชื่อมโลหะ.....	8
2.1.1. การเชื่อมพอกผิวโลหะ.....	8
2.2. หลักการของกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่ม (TIG).....	9
2.3. หลักการของกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่ม แบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG)	10
2.4. ข้อมูลพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400.....	11
2.5. ข้อมูลพื้นฐานของลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W FLUX CORE WIRE.....	12

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.6.	การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test).....	13
2.6.1.	การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....	13
2.7.	การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallography Examination)	15
2.7.1.	การตรวจสอบระดับมหภาค (Macro-scopic examination).....	15
2.7.2.	การตรวจสอบระดับจุลภาค (Micro-scopic examination).....	15
2.8.	การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65.....	16
2.9.	ความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input)	17
2.10.	การเจือจางของโลหะ (Dilution rate)	18
2.11.	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3.	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1.	เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.2.	ขั้นตอนการดำเนินงานเชื่อม.....	32
3.3.	การกำหนดปัจจัยและการออกแบบการทดลอง.....	33
3.3.1.	ปัจจัยคงที่ในการทดลอง.....	33
3.3.2.	ปัจจัยที่ต้องการศึกษาในการทดลอง.....	33
3.4.	ขั้นตอนการดำเนินงานเชื่อมชิ้นงาน.....	34
3.4.1.	การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง.....	34
3.4.2.	การเชื่อมชิ้นงานในการทดลอง.....	35
3.4.3.	การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	36
3.4.4.	การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65.....	37
3.5.	การออกแบบการทดลองเชื่อม.....	38

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.5.1.	การทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด (Arc Current and Hot Wire Current)	38
3.5.2.	การทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed)	40
3.5.3.	การทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed).....	41
3.5.4.	การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน (Hard facing).....	42
3.5.5.	การทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM G65.....	43
4.	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
4.1.	การศึกษาโครงสร้างทางมหภาค (Macrostructure Investigation).....	44
4.1.1.	ผลการทดลองการศึกษาโครงสร้างทางมหภาค.....	44
4.1.2.	สรุปผลการวิเคราะห์การศึกษาโครงสร้างทางมหภาค.....	56
4.2.	การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Investigation)	58
4.2.1.	ผลการทดลองการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค.....	58
4.2.2.	การศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค.....	63
4.2.3.	การวิเคราะห์การศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค.....	64
4.3.	การวัดค่าความแข็งชิ้นงาน (Hardness testing).....	66
4.3.1.	การวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers hardness test).....	66
4.3.2.	การวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test).....	73
4.4.	การศึกษาการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65.....	78
4.4.1.	การทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานปรับตัวแปรเชื่อม.....	78
4.4.2.	การทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมพอก.....	80
5.	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	82
5.1.	สรุปผลการวิจัย.....	82

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.1.การศึกษาโครงสร้างทางมหภาค (Macro structure)	82
5.1.2.การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (Micro structure)	82
5.1.3.การศึกษาสมบัติทางกล (Mechanical properties)	82
5.1.4.การศึกษาการทดสอบการต้านทานการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65.....	84
5.1.5.การสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อม.....	85
5.2. ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง	
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวกภาค ก รูปโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาค.....	88
ภาคผนวกภาค ข ตารางค่าความแข็งของชิ้นงาน.....	94
ภาคผนวกภาค ค บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	106

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า SS400.....	11
2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400.....	11
2.3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W.....	12
2.4 คำแนะนำในการเชื่อม (Welding Instructions).....	12
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเชื่อม.....	33
3.2 ตารางการออกแบบการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด.....	38
3.3 ตารางการออกแบบการทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม.....	40
3.4 ตารางการออกแบบการทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม.....	41
3.5 ตารางการออกแบบการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน.....	42
3.6 ตารางชิ้นงานเชื่อมพอกสำหรับทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน.....	43
3.7 ตารางชิ้นงานเชื่อมสำหรับทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน.....	43
4.1 ตารางภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด.....	45
4.2 ตารางภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม.....	50
4.3 ตารางภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม.....	52
4.4 ตารางภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน.....	54
4.5 ตารางภาพอันดับความกว้างของแนวเชื่อมที่มากที่สุด.....	56
4.6 ตารางวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ในการทดลองกระแสไฟเชื่อมและการอุ่นลวด.....	73
4.7 ตารางวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ในการทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม.....	75
4.8 ตารางวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ในการทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม.....	76
4.9 ตารางค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน.....	77
4.10 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานปรับตัวแปรเชื่อม.....	78
4.11 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมพอก.....	80
5.1 การสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมพอก.....	85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ใบมีดสับอ้อยที่ผ่านการเชื่อมซ่อมด้วยกระบวนการเชื่อม MIG.....3
2.1	ชั้นการพอกผิวโลหะ.....9
2.2	ส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการเชื่อม TIG.....10
2.3	การทำงานของ การเชื่อม TIG แบบอุ่นลวดร้อน.....11
2.4	การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell).....14
2.5	การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส.....15
2.6	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope).....16
2.7	เครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65.....17
2.8	ความเจือจางของโลหะ (Dilution).....19
3.1	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....24
3.2	เครื่องเชื่อมไฟฟ้าด้วยกระบวนการ TIG Hot-wire.....25
3.3	ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W.....25
3.4	เครื่องควบคุมความเร็วในการเดินแนวเชื่อม.....26
3.5	เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400.....26
3.6	เครื่องตัด Wire cut.....27
3.7	เครื่องอัดตัวเรือนโลหวิทยาแบบร้อน.....27
3.8	เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน.....28
3.9	เครื่องขัดเงาผงอะลูมินา (Al ₂ O ₃)28
3.10	ภาพกรด Nital ความเข้มข้น 5%.....29
3.11	ภาพกรด Vilella's reagent.....29
3.12	กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพโครงสร้างมหภาค.....30
3.13	กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค.....30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 เครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์.....	31
3.15 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส.....	31
3.16 เครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65.....	32
3.17 ขั้นตอนในการดำเนินงานในงานวิจัย.....	33
3.18 ชิ้นงานในการทดลอง.....	35
3.19 การกำหนดระยะในการทดลองเชื่อม.....	35
3.20 งานเชื่อมในรูปแบบ 1 แนวเชื่อม.....	36
3.21 ชิ้นงานในรูปแบบการเชื่อมพอก.....	36
3.22 ชิ้นงานที่เจาะด้วยเครื่องเจาะแนวตั้ง.....	37
3.23 ชิ้นงานที่ตัดและขึ้นเรือนชิ้นงาน.....	37
3.24 บริเวณในการตัดชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G65.....	38
3.25 ชิ้นงานที่ตัดเพื่อการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G65.....	38
3.26 ตัวอย่างชิ้นงานในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นสวด.....	40
3.27 ตัวอย่างชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม.....	41
3.28 ตัวอย่างชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการป้อนสวดเชื่อม.....	42
3.29 ชิ้นงานเชื่อมพอก 1 ชั้น.....	43
3.30 ชิ้นงานเชื่อมพอก 2 ชั้น.....	43
3.31 ชิ้นงานเชื่อมพอก 3 ชั้น.....	43
3.32 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน.....	44
4.1 กราฟการเปรียบเทียบลักษณะแนวเชื่อมที่ตัวแปรกระแสเชื่อมต่างกัน.....	49
4.2 กราฟการเปรียบเทียบลักษณะแนวเชื่อมที่ตัวแปรกระแสอุ่นสวดต่างกัน.....	50
4.3 กราฟการเปรียบเทียบลักษณะแนวเชื่อมที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่างกัน.....	52
4.4 กราฟการเปรียบเทียบลักษณะแนวเชื่อมที่ความเร็วในการป้อนสวดเชื่อมต่างกัน.....	54
4.5 ลักษณะแนวเชื่อมพอก 1 ชั้น.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	ลักษณะแนวเชื่อมพอก 2 ชั้น.....56
4.7	ลักษณะแนวเชื่อมพอก 3 ชั้น.....56
4.8	พื้นที่ของแนวเชื่อม.....58
4.9	บริเวณในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน.....59
4.10	โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal).....60
4.11	โครงสร้างบริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุโลหะฐาน (Fusion zone).....61
4.12	โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ).....62
4.13	โครงสร้างจุลภาคของโลหะฐาน (Base metal) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400.....63
4.14	โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) กระแสไฟเชื่อม 120 และ 150 แอมแปร์.....65
4.15	โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) ของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟ 130 และ 140 แอมแปร์.....66
4.16	กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมกระแสเชื่อม 120A.....68
4.17	กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมกระแสเชื่อม 130A.....68
4.18	กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมกระแสเชื่อม 140A.....69
4.19	กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมกระแสเชื่อม 150A.....69
4.20	กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่างกัน.....71
4.21	กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานที่ความเร็วในการป้อนลวดต่างกัน.....72
4.22	กราฟค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมพอก.....73
4.23	กราฟค่าความแข็งร็อคเวลล์ที่การทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด.....75
4.24	กราฟค่าความแข็งร็อคเวลล์ของชิ้นงานที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่างกัน.....76
4.25	กราฟค่าความแข็งร็อคเวลล์ของชิ้นงานที่การทดลองการป้อนลวดเชื่อม.....77
4.26	กราฟค่าความแข็งร็อคเวลล์ของชิ้นงานที่การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน.....78
4.27	อัตราน้ำหนักที่หายไปจากการทดสอบการสึกหรอ ASTM G65.....80
4.28	อัตราน้ำหนักที่หายไปจากการทดสอบการสึกหรอชิ้นงานเชื่อมพอก.....81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลมีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 4% ต่อปี โดยในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นแหล่งในการผลิตอ้อยส่งให้แก่โรงงานน้ำตาลมากที่สุดในประเทศไทย ซึ่งลักษณะพิเศษของโรงงานผลิตน้ำตาล คือ ในหนึ่งปีจะสามารถดำเนินการเดินเครื่องจักรเพื่อผลิตน้ำตาลได้เพียง 3-4 เดือนต่อปีเท่านั้น เนื่องจากเป็นช่วงของการเก็บเกี่ยวผลผลิตอ้อย โดยปกติแล้วโรงงานจะเริ่มเปิดหีบน้ำตาลในธันวาคมและปิดหีบน้ำตาลในเดือนเมษายน (สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, 2561) ในช่วงเวลาดังกล่าวโรงงานผลิตน้ำตาลต้องทำการเดินเครื่องจักรผลิตน้ำตาลตลอดเวลา เพื่อรองรับผลผลิตอ้อยที่จะเข้าสู่โรงงานในปริมาณมาก ส่งผลให้โรงงานอยู่ในภาวะกำลังการผลิตส่วนเกิน (Overcapacity) (ถนอม ตรีตระกูล, 2555) ดังนั้นโรงงานผลิตน้ำตาลจึงจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเครื่องจักรในการผลิตอย่างรวดเร็วและให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อให้ทันต่อการผลิตน้ำตาลในช่วงเร่งการผลิต โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการขั้นตอนของการผลิตน้ำตาลที่จำเป็นต้องบำรุงรักษาและเปลี่ยนอยู่บ่อยครั้งคือ ใบมีดสำหรับสับอ้อย เนื่องจากมีดสับอ้อยเป็นเครื่องมือหลักในการทำหน้าที่ตัดอ้อย ให้มีขนาดเล็กกลง ก่อนเข้าสู่กระบวนการหีบอ้อยเพื่อแยกกากและน้ำอ้อยออกจากกัน ซึ่งการเปลี่ยนมีดสับอ้อยในแต่ละครั้งจำเป็นต้องหยุดการทำงานของเครื่องจักรเพื่อเปลี่ยนใบมีด ส่งผลให้กำลังการผลิตของอุตสาหกรรมน้ำตาลลดลง และเกิดค่าเสียโอกาสในการหยุดเครื่องจักรในการซ่อมบำรุงเป็นอย่างมาก

ใบมีดสับอ้อยในกระบวนการสับอ้อยในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล โดยส่วนมากผลิตจากวัสดุที่ทำจากเกรด SS400 เนื่องจากเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาไม่สูง (Rosyadi Et al. , 2022) แต่เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของเหล็กวัสดุ SS400 ที่ประกอบไปด้วยคาร์บอน 0.15% นั้นมีความแข็งที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานในรูปแบบที่จำเป็นต้องรับแรงกระแทกตลอดเวลาและรวมไปถึงเศษดินหรือหินที่ติดปนมากับผลผลิตอ้อยที่เก็บเกี่ยว ซึ่งเป็นรูปแบบการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wears) อันเนื่องมาจากผิวสัมผัสที่แข็งและขรุขระ หรืออนุภาคที่มีความแข็งเคลื่อนที่ผ่านไปบนผิววัสดุอีกชิ้นที่มีความแข็งน้อยกว่า ทำให้เกิดความเสียหายของผิววัสดุ (Gwidon W Stachowiak, 2005) ซึ่งโดยส่วนมากแล้ววัสดุที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อย่างใบมีดสับอ้อย นิยมนำมาเพิ่มความแข็ง

ของวัสดุโดยวิธีการเพิ่มคาร์บอนที่ผิวของเหล็ก เช่น การนำมิดสับอ้อยมาผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิ่ง ซึ่งเป็นวิธีการชุบแข็งที่ผิว โดยใช้หลักการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้บริเวณผิวของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้ชิ้นงานมีความแข็งและสามารถต้านทานการสึกหรอได้มากขึ้น แต่เนื่องจากกระบวนการคาร์บูไรซิ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาในการทำงานที่นาน โดยในแต่ละครั้งจะใช้เวลาในการทำกระบวนการคาร์บูไรซิ่งประมาณ 8-10 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของชิ้นงาน แต่ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลที่เป็นกระบวนการอัตโนมัติและทำงานอย่างต่อเนื่องนั้น ไบมีดสับอ้อยที่ทำจากวัสดุเหล็กเกรด SS400 ที่ผ่านการเพิ่มปริมาณคาร์บอนที่ผิวของไบมีดยังไม่สามารถยืดอายุการใช้งานให้แก่ไบมีดสับอ้อยได้มากเพียงพอต่อความต้องการ ส่งผลให้ยังต้องมีการหยุดเครื่องจักรเพื่อเปลี่ยนไบมีดบ่อยครั้ง โดยในการหยุดเครื่องจักรหนึ่งครั้งจะมีค่าใช้จ่ายและค่าเสียโอกาสเกิดขึ้นเพื่อลดความต้องการในการเปลี่ยนไบมีดสับอ้อย การยืดอายุการใช้งานของมิดสับอ้อยให้มากขึ้นจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการลดค่าใช้จ่ายที่อาจจะเกิดขึ้นจากการหยุดเครื่องจักรเพื่อเปลี่ยนไบมีด

อีกกระบวนการที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของมิดสับอ้อยคือการนำไบมีดมาเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hard facing) ซึ่งกระบวนการเชื่อมพอกนี้เป็นกระบวนการที่สามารถเพิ่มอายุการใช้งานและป้องกันการสึกหรอของชิ้นงานได้ โดยการเชื่อมพอกเป็นการป้องกันไม่ให้เนื้อโลหะฐานของวัสดุเกิดการสึกหรอโดยการให้เนื้อโลหะของวัสดุลวดเชื่อมมีการหลอมละลายและเคลือบพอกผิวชิ้นงานเอาไว้ โดยใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติทางกลของวัสดุลวดเชื่อม โดยส่วนมากจึงนิยมมีการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีค่าความแข็งสูงในการนำมาเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน อีกทั้งกระบวนการเชื่อมพอกเป็นการเชื่อมที่ไม่ทำให้เนื้อโลหะฐานของวัสดุเสียคุณสมบัติด้านความเหนียว (Ductility) และความแกร่ง (Toughness) รวมไปถึงกระบวนการเชื่อมพอกนี้ยังเป็นวิธีการที่สามารถใช้งานได้กับชิ้นงานที่หลากหลาย สามารถประยุกต์การทำงานได้ในหลายสถานที่ มีราคาต้นทุนในการเชื่อมที่ถูกและรวดเร็วกว่าการเพิ่มความแข็งชิ้นงานในรูปแบบอื่น ดังนั้นการเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานเพื่อการซ่อมและยืดอายุการใช้งานของไบมีดสับอ้อยจึงถือว่าเป็นกระบวนการที่มีความเหมาะสมในใช้งานเพื่อการเพิ่มคุณสมบัติในด้านความแข็งและการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานได้

ซึ่งในปัจจุบันมีการเชื่อมซ่อมมิดสับอ้อยโดยมีการใช้งานกระบวนการเชื่อม MIG (Metal Inert Gas arc welding) โดยมีการใช้งานแก๊สอาร์กอน (Argon) ในการปกคลุมรอยเชื่อม วิธีการในการเชื่อมซ่อมไบมีดนั้นจะทำการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานบริเวณที่ได้รับแรงกระแทก 3 ด้าน โดยเป็นการเชื่อมพอก 1 ชั้นที่บริเวณปลายไบมีด ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เพื่อให้เนื้อโลหะเชื่อมมีการปกคลุมพื้นผิวของไบมีดและมีความสามารถรับประโยชน์จากคุณสมบัติของเนื้อโลหะเชื่อมที่ได้ทำการเชื่อมพอกเข้าไป โดยหลังจากการเชื่อมแล้วชิ้นงานจะมีค่าความแข็งเฉลี่ยประมาณ 50 HRC และจะสามารถเพิ่มอายุการใช้งานได้เฉลี่ย 1 ทิป (ประมาณ 3 ถึง 4 เดือน) แต่ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการในการใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาวิธีการหรือกระบวนการในการเชื่อมพอกมิดสับอ้อยในรูปแบบใหม่ เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มค่าความแข็งของชิ้นงานและระยะเวลาในการใช้งานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 1.1 แสดงใบมีดสับอ้อยที่ผ่านการเชื่อมซ่อมด้วยกระบวนการเชื่อม MIG

โดยในงานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอแนวทางการพัฒนากระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งมีดสับอ้อย ด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งร่วมกับการนำเทคนิคการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุม (การเชื่อมทิก) แบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire) มาใช้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถสร้างชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งได้สะดวก รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผ่านการเพิ่มกระแสที่ใช้ในการเชื่อมและการทำให้ลวดมีอุณหภูมิ ความร้อนใกล้เคียงบ่อหลอมก่อนทำการเชื่อม อีกทั้งยังสามารถควบคุมพลังงานความร้อนให้เข้าสู่ ชิ้นงาน (Heat Input) ได้ให้มีความร้อนที่ไม่สูงจนเกินไป เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดชั้นหลอมละลายและ เกิดการเจือจาง (Dilution) กับชั้นเชื่อมพอกผิวแข็งจนสูญเสียคุณสมบัติที่ดีของชั้นพอกผิวแข็งไป อีกทั้งกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งที่ประยุกต์ใช้การเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG) จะส่งผล ให้ใบมีดสับอ้อยมีแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น และสามารถช่วยยืดอายุการใช้งาน ของมีดสับอ้อยได้ ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายจากระยะเวลาที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนใบมีดได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อทำการศึกษาการเชื่อมพอกชิ้นงานมีดสับอ้อยในอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุมแบบอุ่นลวดร้อน
- 1.2.2 เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมมีดสับอ้อยด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุมแบบอุ่นลวดร้อน

1.3 สมมติฐานการวิจัย

- 1.3.1 การเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นวิธีการที่สะดวกต่อการเชื่อมบนมีดสับอ้อย
- 1.3.2 กระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน สามารถใช้ในการเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงานได้
- 1.3.3 การเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน สามารถเพิ่มความแข็งและต้านทานการสึกหรอให้วัสดุได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการวิจัย คือ กระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน
- 1.4.2 ชิ้นงานโลหะฐาน (Base metal) ที่ใช้ในการทดสอบ คือ เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400
- 1.4.3 ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิวแข็งในงานการวิจัย คือ ลวดเชื่อมภายใต้เครื่องหมายการค้า SUPERWELDS DUR 65W FLUX CORE WIRE DIA 1.2 MM
- 1.4.4 การวิจัยนี้ใช้เครื่องควบคุมความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

1.5 ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และสถานที่ทำการวิจัย

- 1.5.1 อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.5.2 อาคารเครื่องมือ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.5.3 อาคารเครื่องมือ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.5.4 อาคารปฏิบัติการพื้นฐานด้านวิศวกรรมศาสตร์ (F11) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

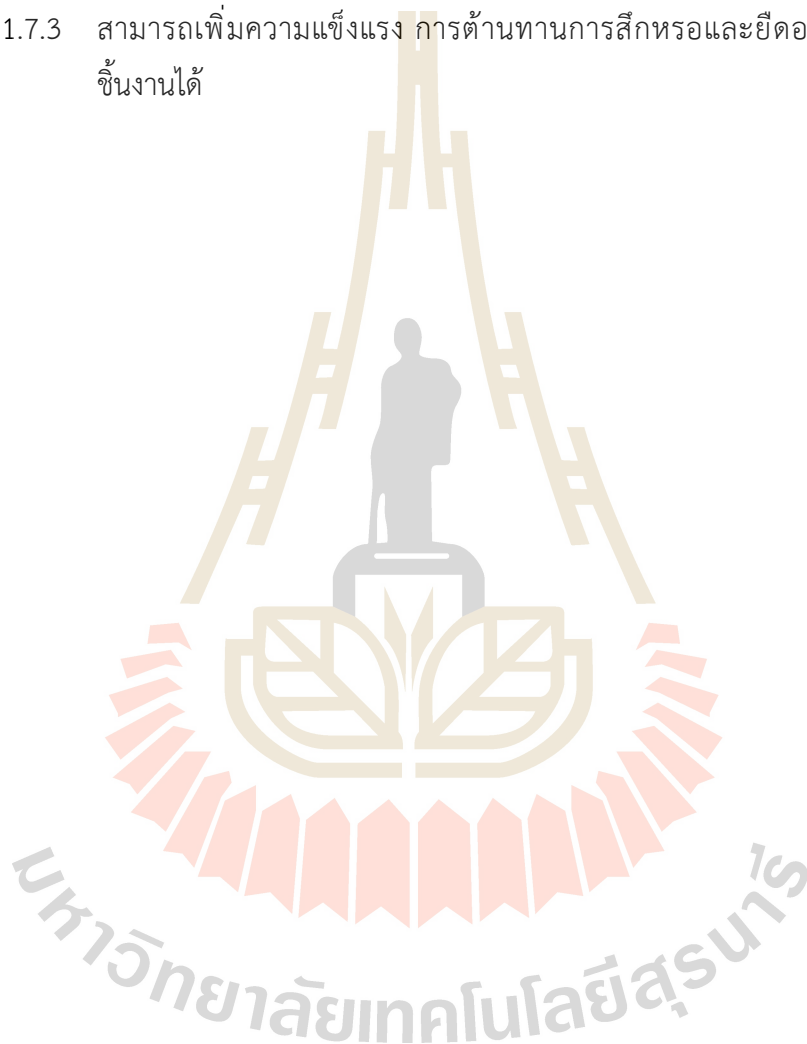
1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยนี้ใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุมหรือการเชื่อมทิกแบบอ่อนลวดร้อน (Hot-wire TIG) โดยในการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน โดยการใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 เป็นโลหะฐาน (Base metal) ในการทดลองเชื่อม ใช้ลวดเชื่อมแบบเติมเครื่องหมายการค้า SUPERWELDS DUR 65W FLUX CORE WIRE DIA 1.2 MM ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hard facing) จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ของชิ้นงาน ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาค วัดค่าความแข็งของชิ้นงาน และรวมไปถึงการทดสอบความสึกหรอของชิ้นงานด้วยมาตรฐาน ASTM G65 เพื่อทำการรวบรวมผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง โดยมีการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้มีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

- 1.6.1 ศึกษาทฤษฎี ข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.6.2 เก็บข้อมูลวัสดุชิ้นงาน
- 1.6.3 ออกแบบการทดลองและจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง
- 1.6.4 ทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานตามแบบที่วางไว้
- 1.6.5 ปรับค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเพื่อหาค่าที่เหมาะสม
- 1.6.6 วิเคราะห์สมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน
- 1.6.7 เก็บผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.6.8 อภิปรายผลการทดลอง
- 1.6.9 สรุปผลการทดลองและส่งรายงานวิจัย

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 สามารถทราบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกชิ้นงานด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่มแบบอุ่นลวดร้อนได้
- 1.7.2 สามารถทราบถึงโครงสร้างทางโลหะวิทยาของชิ้นงานก่อนและหลังการเชื่อมพอกด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่มแบบอุ่นลวดร้อน
- 1.7.3 สามารถเพิ่มความแข็งแรง การต้านทานการสึกหรอและยืดอายุการใช้งานของชิ้นงานได้



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมซ่อมมีดฟันอ้อยด้วยกระบวนการเชื่อมทิก แบบอุ่นลวดร้อน (Hot wire TIG) และศึกษาผลกระทบทางโครงสร้างโลหะวิทยาทั้งโครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาค รวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเชื่อม เพื่อเป็นแนวทางในการที่จะนำไปประกอบการศึกษาจนบรรลุเป้าหมายตามที่กำหนดไว้ ซึ่งมีหัวข้อดังนี้

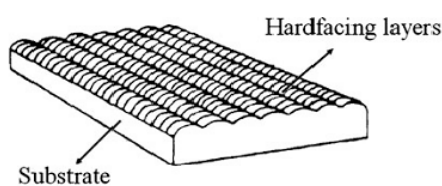
- 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของกระบวนการเชื่อมโลหะ
- 2.2 หลักการของกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลุม (Tungsten Inert Gas : TIG)
- 2.3 หลักการของกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลุมแบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG)
- 2.4 ความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input)
- 2.5 การเจือจางของโลหะ (Dilution ratio)
- 2.6 ข้อมูลพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400
- 2.7 ข้อมูลพื้นฐานของลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W FLUX CORE WIRE
- 2.8 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)
- 2.9 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallography Examination)
- 2.10 การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65
- 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของกระบวนการเชื่อมโลหะ

กระบวนการเชื่อมโลหะ เป็นกระบวนการที่ทำให้เนื้อโลหะมีการหลอมละลายและติดกันเป็นชิ้นเดียว โดยขณะที่ทำการเชื่อมโลหะจะเกิดบ่อหลอมละลายขึ้น และทำการเติมเนื้อโลหะเพิ่มลงไป บ่อหลอม เมื่อเกิดการเย็นตัวจะทำให้โลหะเกิดความแข็งแรง โดยในการเชื่อมโลหะมีพลังงานที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการ เช่น พลังงานจากกระแสไฟฟ้า พลังงานจากแก๊ส พลังงานจากลำแสงเลเซอร์ พลังงานจากการใช้อิเล็กตรอนบีบ พลังงานจากการเสียดสี เป็นต้น กระบวนการเชื่อมในช่วงศตวรรษที่ 20 มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วเพื่อใช้ในการทดแทนการต่อโลหะโดยการใช้หมุดย้ำที่โลหะ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการเชื่อมให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น การนำไปใช้ในกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง (วิชิต เลื่อมใส, 2554)

2.1.1 การเชื่อมพอกผิวโลหะ

การเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hard facing) เป็นกระบวนการเชื่อมที่มีความนิยมใช้งานมากในงานอุตสาหกรรม โดยใช้กระบวนการเชื่อมพอกนี้บ่อยในการนำไปเชื่อมซ่อมชิ้นงาน เพราะเนื่องจากผิวของเนื้อโลหะที่เชื่อมพอกจะมีค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่สูงมาก โดยกระบวนการเชื่อมพอกนี้จะมีค่าความแข็งขึ้นอยู่กับวัสดุของลวดเชื่อมที่นำมาใช้ในการเชื่อมพอก ซึ่งพื้นผิวที่มีการเชื่อมพอกจะมีการยึดเกาะที่ดีกับพื้นผิวของชิ้นงานที่เป็นฐาน การเชื่อมพอกผิวโลหะเป็นวิธีการที่มีต้นทุนในการเชื่อมที่ไม่แพงและสามารถใช้งานภาคสนามได้หลากหลาย (Darmo, Suryo & Prihadianto, Braam, 2022) โดยหลักการของการเชื่อมพอกแข็ง คือ วัสดุผิวเคลือบจะอยู่ในรูปแบบของลวดเชื่อมจะถูกหลอมลงบนผิวชิ้นงานโลหะให้หลอมละลายพอกเป็นแนวและแข็งตัวอยู่บนผิวชิ้นงาน (รูปที่ 2.1) การเชื่อมพอกผิวแข็งนอกจากสร้างชั้นผิวแข็งที่บนชิ้นงานแล้ว ยังสามารถสร้างเนื้อให้กับชิ้นงานที่สูญเสียเนื้อโลหะไปจากการสึกหรอได้ด้วย วัสดุที่เลือกใช้จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน การประยุกต์ใช้วิธีการเชื่อมพอกโดยใช้วัสดุลวดเชื่อมที่มีค่าความแข็งที่สูงและทนทานต่อการสึกหรอลงบนชิ้นงานในส่วนที่ต้องการเพิ่มความแข็ง เพื่อให้ชิ้นงานในส่วนดังกล่าวมีความต้านทานต่อการสูญเสียเนื้อโลหะ โดยที่เนื้อโลหะของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเดิมไม่เกิดการสึกหรอจากผลของการใช้งานที่ทำให้เกิดการสึกหรอ เช่น การสึกหรอจากการเสียดสี การสึกหรอแบบเชื่อมติด การสึกหรอจากการกระแทก (สุรธยา ลิ้มนา, 2553)

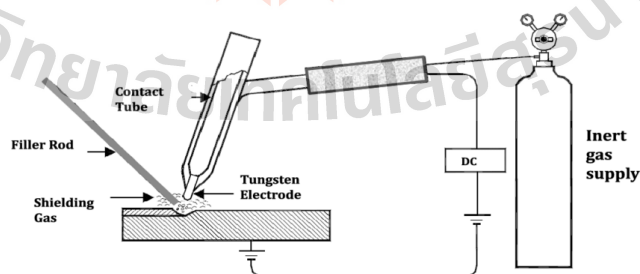


รูปที่ 2.1 แสดงชั้นการพอกผิวโลหะ (ณรงค์ฤทธิ์, 2550)

2.2 หลักการของการเชื่อมอาร์คทังสเทนแก๊สปกคลุม (Tungsten Inert Gas : TIG)

การเชื่อมอาร์คทังสเทนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding หรือ GTAW) หรืออีกชื่อหนึ่ง คือกระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas welding : TIG) เป็นกระบวนการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ใช้แท่งอิเล็กโทรดเป็นแท่งทังสเทน โดยวิธีการเชื่อมนี้จะไม่มีการสูญเสียแท่งอิเล็กโทรด (Non-consumable Electrode) ในการเชื่อม (รูปที่ 2.2) ซึ่งบริเวณบ่อหลอมละลายจะมีแก๊สเฉื่อยปกคลุมอยู่ เพื่อป้องกันออกซิเจนไม่ให้สัมผัสกับบ่อหลอมและแนวเชื่อมที่มีความร้อน เนื่องจากแนวเชื่อมอาจมีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับอากาศรอบข้าง โดยแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) ที่ใช้กันทั่วไป คือ อาร์กอน (Argon) หรือ ฮีเลียม (Helium) ในการเชื่อมมีทั้งแบบเติมลวดและไม่เติมลวดลงไป ในบ่อโลหะหลอมละลาย

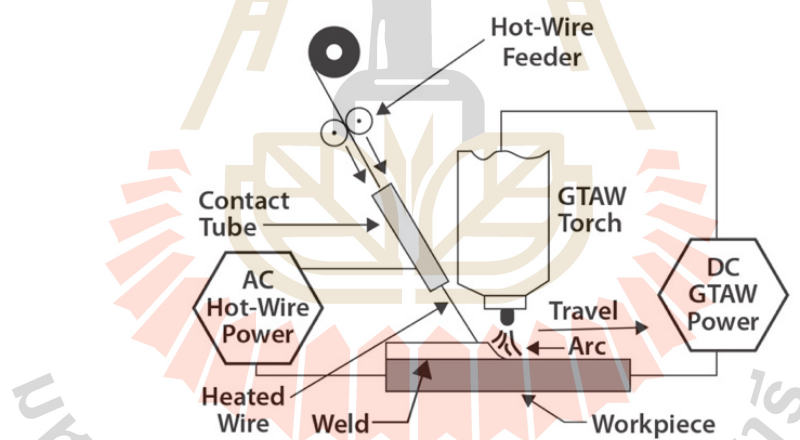
การเชื่อมอาร์คทังสเทนแก๊สปกคลุม (GTAW หรือ TIG) เป็นกระบวนการเชื่อมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เชื่อมโลหะได้หลากหลายชนิด ซึ่งรวมถึงโลหะผสม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะทนความร้อน อะลูมิเนียมผสม ทองแดงและทองแดงผสม เป็นต้น สำหรับตะกั่วและสังกะสีไม่ควรนำมาเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก เนื่องจากทั้งสองวัสดุนี้มีจุดหลอมเหลวในอุณหภูมิที่แตกต่างกับอุณหภูมิของเปลวอาร์คมาก และเมื่อวัสดุดังกล่าวหลอมละลายจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอส่วนโลหะที่จุดหลอมสูงสามารถเชื่อมด้วย TIG ได้ดี (F. Cao Et al., 2018) แต่ถ้าโลหะดังกล่าวเคลือบไว้ด้วยตะกั่ว สังกะสี ดีบุก แคดเมียมหรืออะลูมิเนียม จะต้องใช้วิธีเชื่อมที่พิเศษ แนวเชื่อมของโลหะที่เคลือบนี้จะมีคุณสมบัติเชิงกลเนื่องจากเกิดการผสมของวัสดุดังกล่าวภายในแนวเชื่อมวิธีป้องกันควรกำจัดวัสดุเคลือบบนโลหะออกก่อนที่จะทำการเชื่อม และเมื่อเชื่อมเสร็จแล้วจึงซ่อมแซมใหม่



รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการเชื่อม TIG (Neeraj S. and Wathiq A, 2022)

2.3 หลักการของกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่มแบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG)

กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่มแบบอุ่นลวดร้อน หรือ กระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG) คือ กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสที่มีการพัฒนาระบบในการทำให้ลวดเชื่อมมีความร้อนสะสมก่อนทำการเชื่อมชิ้นงาน (รูปที่ 2.3) โดยหลักการของกระบวนการเริ่มจากความร้อนที่ทำให้โลหะหลอมละลายนั้น เกิดขึ้นจากการอาร์คระหว่างทั้งสแตนอิเลคโทรด (Tungsten electrode) กับชิ้นงาน ขณะเดียวกันบริเวณที่เกิดการอาร์คจะมีแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ปกคลุมรอบบริเวณการอาร์คนั้น (รูปที่ 2.3) เพื่อป้องกันออกซิเจน (Oxygen) ไนโตรเจน (Nitrogen) และความชื้นในอากาศ (humidity) ไม่ให้เข้ามาพร้อมกับน้ำโลหะที่กำลังหลอมละลาย ซึ่งจะป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) จนกระทั่งความร้อนจากการอาร์คหลอมละลายโลหะชิ้นงานในบริเวณดังกล่าวจนเกิดเป็นบ่อหลอมละลายแล้วเติมลวดเชื่อมที่ผ่านการอุ่นร้อนแล้ว (Hot-wire) ลงไปในบ่อหลอมละลาย



รูปที่ 2.3 แสดงการทำงานของกระบวนการเชื่อม TIG แบบอุ่นลวดร้อน (Dan A. and Dave H., 2019)

โดยจากขั้นตอนการอุ่นลวดเชื่อมให้ร้อนก่อนทำการเชื่อมชิ้นงาน ช่วยให้กระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG) สามารถทำการเดินแนวเชื่อมได้เร็วกว่ากระบวนการเชื่อมทิกแบบทั่วไป (Ordinary TIG) เนื่องจากมีการอุ่นลวดเชื่อมให้มีอุณหภูมิความร้อนที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมละลาย เมื่อต้องการเชื่อมชิ้นงานจึงมีการใช้พลังงานในการหลอมละลายลวดเชื่อมน้อยกว่าปกติ ลดความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) สามารถทำการเชื่อมได้ทันที รอยตะเข็บเชื่อมที่ได้จะมีความละเอียดและสม่ำเสมอกว่ากระบวนการเชื่อมทิกแบบปกติ (F. Cao Et al., 2018)

2.4 ความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input)

ความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานในการเชื่อม (Heat Input) จะมีผลต่อการหลอมละลายของแนวเชื่อม ความกว้างของแนวเชื่อม และความหนาของแนวเชื่อม รวมถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน (HAZ) ซึ่งค่าความร้อนในการเชื่อมจะมีหน่วยเป็น KJ/mm. เมื่อมีความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้ค่าการหลอมละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นด้วย แต่ความหนาของแนวเชื่อมจะลดลง ดังนั้นค่าความร้อนที่ได้ในการเชื่อมมีความสำคัญต่อแนวและรวมถึงคุณภาพของงานเชื่อม (ไพบูลย์ หาญมนต์, 2552) การคำนวณหาความร้อนในงานเชื่อม สามารถคำนวณได้ดังนี้

การคำนวณ Heat Input ของการเชื่อม TIG ปกติ

$$\text{Heat Input} = \text{Energy Input} \times \text{Heat Efficiency}$$

$$\text{Energy Input} = \frac{\text{Volt} \times \text{Amp} \times 60}{\text{Velocity} \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) \times 60}$$

$$\text{Heat Efficiency} = \text{Amp} \times \text{Arc Voltage}$$

การคำนวณ Heat Input ของการเชื่อม TIG แบบ Hot wire (F. Cao Et al., 2018)

$$Q = Q_1 \times \eta \times Q_2$$

$$Q_1 = \frac{U \times I \times 60}{V}$$

$$Q_2 = C \times m \times \Delta t$$

เมื่อ	Q	คือ ความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (แบบอุ่นลวดร้อน) (KJ/mm)
	Q ₁	คือ ความร้อนของกระแสไฟเชื่อม (KJ/mm)
	I	คือ กระแสไฟในการเชื่อม (A)
	V	คือ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (mm/min)
	Q ₂	คือ ความร้อนของลวดเชื่อม (KJ/mm)
	η	คือ ค่าเฉพาะ (efficiency = 1)
	C	คือ ค่าความร้อนเฉพาะ (C = 0.46 × 10 ³ J/(Kg × °C)
	m	คือ น้ำหนักของลวดเชื่อมต่อหน่วย (g/mm)
	Δt	คือ ช่วงของอุณหภูมิ (°C)

2.5 การเจือจางของโลหะ (Dilution ratio)

การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Dilution ratio) ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเชื่อมพอกแข็ง เนื่องจากหากเปอร์เซ็นต์การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมสูง หมายถึงการที่บริเวณเนื้อโลหะเดิมผสมกับลวดเชื่อมมาก จะทำให้สมบัติบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเปลี่ยนไปจากเดิม โดยการเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม เป็นผลมาจากสองสาเหตุหลัก คือ ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) จากกระบวนการเชื่อม และชนิดของกระบวนการในการเชื่อมมีชนิดโลหะที่แตกต่างกัน คุณสมบัติส่วนผสมทางเคมีของวัสดุจะถูกหลอมละลายผสมรวมกัน หรือเรียกว่าความเจือจาง ซึ่งความเจือจางของโลหะเชื่อมสามารถควบคุมได้โดยการกำหนดค่าตัวแปรในการเชื่อมให้เหมาะสมและมีการกำหนดวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมให้เหมือนกัน แต่ในกรณีที่ต้องใช้วัสดุลวดในการเชื่อมและวัสดุฐานที่แตกต่างกัน ก็จำเป็นต้องคำนึงถึงการเจือจางของโลหะที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเจือจางจะส่งผลให้คุณสมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากความต้องการเดิม โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดความเจือจาง ได้แก่

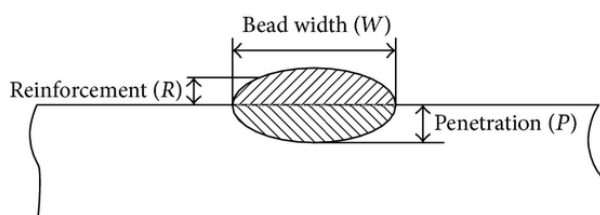
- 2.10.1 กระแสไฟในการเชื่อมสูง (High Welding Current) กระบวนการเชื่อมที่มีการใช้กระแสไฟสูง เช่น กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerge Arc Welding : SAW) อาจมีความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานมากเกินไปทำให้เกิดการผสมเจือจางของเนื้อโลหะและลวดเชื่อม
- 2.10.2 ความบางของวัสดุ (Thin Material) เช่น กระบวนการเชื่อมทิกบนแผ่นโลหะบางสามารถทำให้เกิดความเจือจางในระดับสูง

โดยความเจือจาง (Dilution) สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Dilution ratio (\%)} = \frac{B}{(A + B)} \times 100$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ที่ชิ้นงานเกิดการหลอมละลาย (Area of Molten Parent Plate)

B คือ พื้นที่ทั้งหมดที่เกิดการหลอมละลาย (Area Enclosed by red line)



รูปที่ 2.4 แสดงความเจือจางของโลหะ (Dilution) (P. Sreeraj, 2013)

2.6 ข้อมูลพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 เป็นโลหะที่สามารถหาได้ง่าย มีราคาที่ไม่แพง เนื่องจากมีการนำโลหะชนิดนี้ไปใช้งานอย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการนำไปขึ้นรูปชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนทางการเกษตรหรือชิ้นงานผลิตภัณฑ์เหล็กอื่น ๆ โดย SS400 เป็นเหล็กที่มีการจัดอยู่ในมาตรฐานญี่ปุ่น (JIS) โดยมีเลขมาตรฐานคือ G3101 มีความแข็งประมาณ 65 HRB ถึงประมาณ 80 HRB เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 นี้มีส่วนผสมทางเคมีประกอบไปด้วย ซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส น้อยกว่า 0.5% มีความต้านทานแรงดึงประมาณ 400-510 นิวตันต่อตารางเมตร มีอัตราการยืดตัวต่ำสุด 21% โดยในปัจจุบันมีการผลิตแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 ที่มีความหนาตั้งแต่ 1.00-19.00 มิลลิเมตร และมีขนาดความกว้างตั้งแต่ 750 มิลลิเมตรไปจนถึง 1550 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า SS400

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

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน SS400

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

2.7 ข้อมูลพื้นฐานของลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W FLUX CORE WIRE

ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W เป็นลวดเชื่อมอัลลอย (Alloy) โลหะผสมสูง เหมาะสำหรับการใช้งานเชื่อมพอกผิวชิ้นงานที่ต้องรับแรงกระแทกสูง (High abrasion) ชิ้นงานที่ต้องรับการเสียดสี (Friction) รับความร้อนสูง (Heat) และทนการกัดกร่อนสูง (Corrosion)

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W

C	Si	Mn	Cr	Nb	Mo	W	Others
5.5	1.0	1.5	22.0	3.0	1.0	4.5	1.5

ตารางที่ 2.4 คำแนะนำในการเชื่อม (Welding Instructions)

กระบวนการ	Ø ลวดเชื่อม (mm.)	ตัวแปรในการเชื่อม		
		กระแสไฟเชื่อม (A)	แรงดัน (V)	Stick-out (mm.)
FCAW	1.2	100-280	23-33	10-25
	1.6	150-400	23-35	10-25



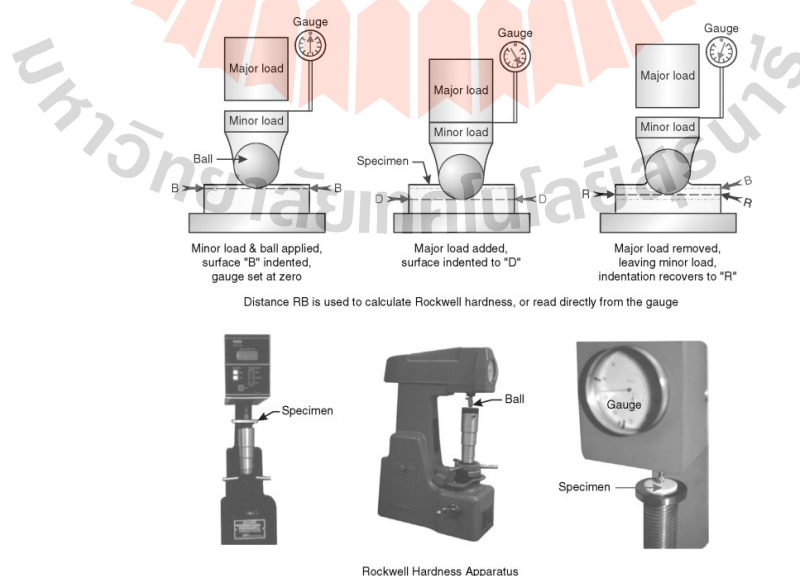
2.8 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties Test)

2.8.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็งของชิ้นงาน (Hardness Test) ถือว่าเป็นการทดสอบแบบกึ่งทำลาย ซึ่งนอกจากจะบอกค่าความแข็งของวัสดุแล้ว ยังสามารถที่จะบอกคุณสมบัติของค่าความต้านทานการสึกหรอ การทนต่อการเสียดสี ค่าความต้านทานแรงดึง และความเหนียวของวัสดุได้อีกด้วย โดยค่าความแข็งของวัสดุชิ้นงานโดยส่วนมากจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ โครงสร้างทางโลหะวิทยาของวัสดุ รูปแบบการขึ้นรูปชิ้นงาน และกรรมวิธีทางความร้อนที่เกิดขึ้น เป็นต้น ซึ่งในการวัดความแข็งจะมีหลายวิธีที่นิยมกันมาก คือ การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ (Rockwell) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell) และ การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers)

2.8.1.1 การทดสอบแบบรอกเวลล์ (Rockwell)

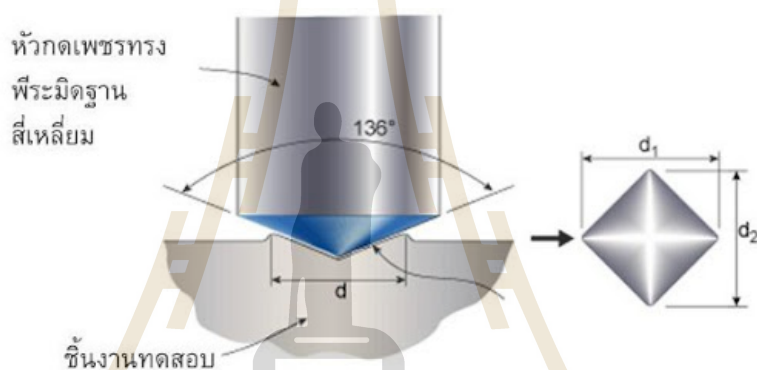
การทดสอบแบบรอกเวลล์ (Rockwell) เป็นการทดสอบวัดค่าความแข็งของชิ้นงานโดยการใช้หัวกด 2 หัว ได้แก่ หัวกดเพชรทรงกรวย และ หัวกดลูกเหล็กทรงกลม ซึ่งชนิดและขนาดของหัวกดที่ใช้ในการทดสอบจะแตกต่างกันไปตามความแข็งของโลหะที่นำมาทดสอบ โดยการทดสอบจะทำการกดด้วยแรงกดทั่วไปในขั้นตอน และจึงทำการเพิ่มน้ำหนักแรงกดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ เพื่อประเมินว่าความลึกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิววัสดุมีมากหรือน้อยเพียงใดเพื่อหาค่าความแข็งของวัสดุให้มีความแม่นยำ



รูปที่ 2.5 แสดงการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ (Rockwell) (E. Alfredo Campo, 2008)

2.8.1.2 การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vicker Hardness Test)

การทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vicker Hardness Test) เป็นการทดสอบที่ใช้หลักการที่คล้ายคลึงกันกับการทดสอบวัดค่าความแข็งแบบบริเนลล์ โดยในการทดสอบจะมีการเปลี่ยนจากหัวกดลูกบอลชุบแข็ง เป็นหัวกดที่ทำด้วยเพชรเจียรไนที่เป็นทรงพีระมิด โดยหัวกดจะทำมุม 136 องศา กับแนวระดับ ทำการกดด้วยแรง F ที่ตั้งฉากกับชิ้นงานทดสอบ ซึ่งรอยกดที่ได้จะนำไปวัดเส้นทแยงมุมทั้งสองด้าน ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ซึ่งผลการวัดจะมีความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร และนำค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมจะนำไปคำนวณหาค่าความแข็งของชิ้นงานตามสูตร



รูปที่ 2.6 แสดงการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (อภิชาติ พานิชกุล และ อุษณีย์ กิตกำธร, 2562)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นผิวรอยกด}}$$

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

$$HV = \frac{0.189F}{d^2}$$

โดย F คือ แรงที่ทำการกดชิ้นงาน (N)

D คือ เส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm .)

2.9 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallography Examination)

โครงสร้างทางโลหะวิทยาเป็นสิ่งที่มีความสำคัญโดยตรงกับคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของโลหะ และรวมไปถึงการเรียงตัวของอะตอมและเกรนของโลหะ ดังนั้นการศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาจึงเป็นขั้นตอนพื้นฐานในการตรวจสอบคุณภาพของโลหะ อีกทั้งเป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์หาสาเหตุของคุณสมบัติของโลหะนั้น ๆ โดยในการศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาประกอบไปด้วย

2.9.1 การตรวจสอบระดับมหภาค (Macro-scopic examination)

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะโดยการใช้กำลังการขยายของกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังการขยายต่ำ อาจเป็นการตรวจสอบโดยตาเปล่า (Visual inspection) หรือใช้กำลังการขยายไม่เกิน 10 เท่า

2.9.2 การตรวจสอบระดับจุลภาค (Micro-scopic examination)

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังการขยายสูง ซึ่งใช้กำลังการขยายระหว่าง 10-1,000 เท่า เพื่อใช้ในการตรวจสอบโครงสร้าง (Structure) เกรนโลหะ (Metal grain) และเฟสของโลหะ (Phase) ที่ปรากฏอยู่ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยานี้มีอยู่ 2 ชนิด คือ กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานทางโลหะวิทยา (Metallurgical microscope) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

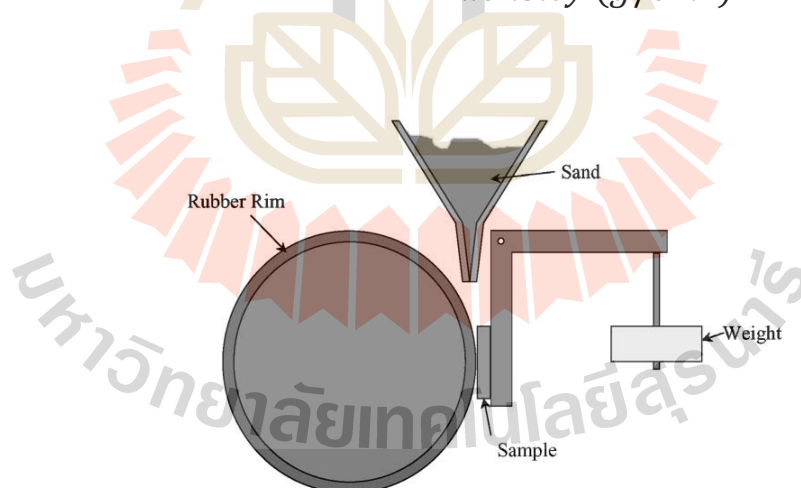


รูปที่ 2.7 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) (Sina Ebnesajjad, 2014)

2.10 การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 เป็นกรรมวิธีการทดสอบที่ทำให้ทราบถึงอัตราการสึกหรอและความต้านทานของชิ้นงานที่ผ่านการทดลองมา โดยเป็นการทดสอบที่มีการใช้งานล้อย่างที่มีการหมุนคู่ไปกับชิ้นงานที่ต้องการนำมาทดลอง และมีการปล่อยทรายแห้งให้ผ่านล้อย่างและผิวของชิ้นงาน เพื่อให้เกิดการครูดถูเป็นระยะเวลาตามที่กำหนด โดยการทดลองนี้เปรียบเสมือนการจำลองของกระบวนการที่มีการทำงานแบบซ้ำ ๆ เป็นระยะเวลานาน โดยผลของการทดลองจะทำให้การวัดค่าจากน้ำหนักของชิ้นงานที่มีการสูญเสียไปจากการทดลอง ซึ่งจะมีการชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดลอง และหลังการทดลอง และจะมีการบันทึกผลเป็นปริมาณการสูญเสียเป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร ในการทดสอบจะมีการกำหนดมาตรฐาน ASTM ต่าง ๆ ที่มีความเหมาะสมกับชิ้นงานที่นำมาทดสอบ โดยในแต่ละข้อกำหนดหรือ Procedure ในการทดสอบจะมีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อเพิ่มแรงในการทดลอง ขนาดของเม็กรทรายที่นำมาไหลผ่านชิ้นงาน จำนวนรอบความเร็วในการหมุนล้อย่าง เป็นต้น โดยการสูญเสียน้ำหนักเป็นการวัดสำหรับการกำหนดหลักเกณฑ์เวลาการแสดงผลสรุปการสูญเสียสามารถคำนวณได้ ดังนี้

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



รูปที่ 2.8 แสดงเครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 (Andrew G., 2001)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hard facing) ถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานและช่วยลดต้นทุนในการสั่งซื้ออุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ โดยมีงานวิจัยที่ให้ความสำคัญในเรื่องของการนำอุปกรณ์ชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เกิดปัญหาต่าง ๆ มาผ่านกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง เพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่และมีประสิทธิภาพขึ้นได้ ซึ่งเมื่อเกิดความเสียหายจะต้องมีการสั่งซื้อใหม่และจะต้องใช้งบประมาณในการสั่งซื้อเป็นจำนวนมากในการป้องกันการสึกหรอของอุปกรณ์ การเชื่อมพอกผิวแข็งจึงเป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการผลิตและซ่อมแซมมีดสับอ้อยที่สามารถช่วยยืดอายุการใช้งานให้นานขึ้นได้

คำพูน พรหมสุภา ได้ทำการศึกษาวิจัยในเรื่องกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับอุปกรณ์งานดินการเกษตร โดยกระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีน (OAW) และกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สคลูม (TIG) เพื่อศึกษาทางเลือกในการเชื่อมซ่อมบำรุงอุปกรณ์งานดินการเกษตร โดยใช้การเชื่อมพอกผิวแข็ง 2 กระบวนการ คือ การเชื่อม OAW และการเชื่อม TIG วัสดุที่ใช้ในการเติมพอกผิวแข็งคือลวดเชื่อมเติมประเภท Tungsten Carbide ทำการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM G65 โดยจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม TIG ที่ 1 ชั้น มี Tungsten carbide รวมกันอยู่ที่ด้านล่างของแนวเชื่อม แนวเชื่อมชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 มีการกระจายตัวของ Tungsten carbide ดีกว่าชั้นที่ 1 ในส่วนของโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม OAW ที่ 1 ชั้น แนวเชื่อมไม่เกิดการหลอมลึกส่งผลให้ Tungsten carbide มีการกระจายตัวที่ดีในแนวเชื่อมชั้นที่ 2 และ 3 ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคทางโลหะของชิ้นงาน ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมพอกผิวทั้งสองกระบวนการเกิดโครงสร้างเดนไดรต์ที่เหมือนกัน

ถนอม ลีตระกูล ได้ทำการศึกษาวิจัยในเรื่องการพัฒนาเม็ดตัดโค่นในรถตัดอ้อย เพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของเหล็ก 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ได้แก่ เหล็กเกรด SUP9 และเหล็กเกรด SUP7 จากการทดลองโดยการอบชิ้นงานเม็ดสับอ้อยจำนวน 3 ชั้น ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที แล้วจึงชุบชิ้นงานให้เย็นตัวในน้ำมัน โดยผลการวิจัยพบว่าชิ้นงานตัวอย่างของเม็ดสับอ้อยที่อบชุบตามกระบวนการทดลอง ผ่านการอบคลายความเครียดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 40 นาที ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างของเม็ดสับอ้อยที่สร้างขึ้น มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 457 วิกเกอร์ส และมีค่าความแข็งไม่แตกต่างจากเม็ดสับอ้อยที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SUP7 อย่างมีนัยสำคัญ

สุรธยา ลิ้มนา ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวงานที่มีการเชื่อมพอก โดยใช้เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) เกรด AISI 4340 โดยใช้กระบวนการเชื่อมไฟฟ้า กระบวนการเชื่อมมิก/แม็ก (MIG/MAG) และกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ซึ่งก่อนการ

เชื่อมและหลังการเชื่อมจะให้ความร้อนที่ต่างกัน รวมทั้งทำการศึกษาระยะบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) พบว่าค่าความแข็งของเนื้อเหล็กที่ผ่านการเชื่อมจากระบวนการเชื่อมด้วยลวดไส้ฟลักซ์มีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกับเนื้อเหล็กชิ้นงานเดิมมากกว่ากระบวนการเชื่อมไฟฟ้าและกระบวนการเชื่อมมิก/แม็ก บริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อนทั้ง 3 กระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับรอยเชื่อมและเนื้อโลหะเดิม

ไพบุลย์ หาญมนต์ ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมที่มีผลต่อการหลอมลึก ความกว้าง ความสูงและบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ด้วยกระบวนการเชื่อม MIG โดยใช้ค่าความร้อนในงานเชื่อม (Heat Input) 6 ระดับ ได้แก่ 1.425 KJ/mm. , 2.640 KJ/mm. , 4.461 KJ/mm. , 6.486 KJ/mm. , 8.025 KJ/mm. และ 10.412 KJ/mm. ความเร็วในการเชื่อม 110 mm./sec ด้วยลวดเชื่อมชนิด AWS ER308L-16 พบว่าแนวเชื่อมที่ให้ค่าความร้อนในงานเชื่อม (Heat Input) สูงขึ้นจะทำให้ค่าการหลอมลึกเพิ่มมากขึ้น ให้ค่าความกว้างของแนวเชื่อมกว้างมากขึ้น ให้ค่าความสูงของแนวเชื่อมลดต่ำลง และทำให้บริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีความกว้างและค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสรุปได้ว่าอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมมีผลต่อการหลอมลึกของรอยเชื่อม ความกว้างของรอยเชื่อม ความสูงรอยเชื่อม และบริเวณกระทบร้อนของแนวเชื่อม

สุพร ฤทธิภักดี ได้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กเกรด AISI 1020 เพื่อศึกษาการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องมือและเครื่องจักร และนำเสนอแนวทางการเลือกในการเพิ่มค่าความแข็งให้แก่วัสดุ โดยทำการศึกษการสึกหรอของชิ้นผิวแนวเชื่อมของลวดเชื่อมพอกผิวแข็งบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1020 โดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ทำการเปรียบเทียบลวดเชื่อมในกลุ่มที่ 10 ตามมาตรฐาน DIN8555 และทำการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีตามมาตรฐาน ASTM G65 บนผลิตภัณฑ์แบบ Dry Sand Rubber Wheel : (DSRW) ซึ่งจะใช้เหล็กกล้าคาร์บอน AISI1020 ใช้ลวดเชื่อมชนิด E10-UM-65-GR และ ลวดเชื่อม E10-UM-60-GR ผลพบว่าค่าความแข็งที่ได้จากลวดเชื่อม E10-UM-65-GR มีความแข็งที่สูงกว่าลวดเชื่อม E10-UM-60-GR

G.R.C. Pradeep et al. ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมพอกผิวแข็งของวัสดุ AISI 1020 โดยการเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมอาร์คไฟฟ้า (Arc Welding) และกระบวนการเชื่อมทิก (TIG) เพื่อหากระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งที่เหมาะสมที่สุดกับเหล็กเกรด AISI 1020 โดยจากการศึกษาพบว่าชิ้นงานในการทดลองที่ใช้กระบวนการเชื่อมทิก ให้คุณสมบัติในการต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์คไฟฟ้า (Arc Welding) โดยใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ 1.256 เมตร/วินาที อีกทั้งยังพบว่ากระบวนการเชื่อมอาร์คให้คุณสมบัติที่ดีที่สุดเมื่อใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ 1.571 เมตรต่อวินาที

Shou-Xu Song et al. ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมซ่อมท่อเพลลา (Axle tube) ที่เสียหาย และจำเป็นต้องนำไปผลิตซ้ำ (Remanufacturing) โดยใช้วิธีการเชื่อมซ่อมทั้งหมด 3 วิธี คือ การเชื่อมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc) , การเชื่อมอาร์คแบบใช้แก๊ส CO_2 ปกคลุม (CO_2 Arc Welding, MAG) และ การเชื่อมอาร์คแบบใช้แก๊ส Argon ปกคลุม (Argon Arc Welding, TIG) ทำการทดสอบชิ้นงาน โดยการนำชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) วัดค่าความเค้นของชิ้นงาน (Stress) และวัดค่าความแข็ง (Hardness) โดยจากการทดลองพบว่า ในส่วนของโครงสร้างทางโลหะวิทยาของชิ้นงานทดสอบ พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานที่มีการเชื่อมซ่อมด้วยการเชื่อม TIG มีโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่สม่ำเสมอ มีเกรนที่ละเอียดมากกว่าแบบอื่น ความเค้นตกค้าง (residual stress) ของชิ้นงานที่มีการเชื่อมโดยใช้แก๊สปกคลุมทั้ง 2 ชิ้นงาน (แก๊ส CO_2 และ แก๊ส Argon) มีความเค้นตกค้างใกล้เคียงกัน และมีความเค้นตกค้างน้อยกว่าการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าแบบปกติ ในส่วนของความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานที่มีการเชื่อมอาร์คไฟฟ้า และการเชื่อมแบบใช้แก๊ส CO_2 ปกคลุม มีความแข็งที่น้อยกว่าชิ้นงานที่เชื่อมซ่อมโดยกระบวนการเชื่อมแก๊ส Argon ปกคลุม โดยสรุปแล้วการเชื่อมซ่อมโดยใช้แก๊ส Argon ปกคลุม (กระบวนการเชื่อม TIG) จะทำให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

Fujun Cao et al. ได้ทำการศึกษาการนำความร้อนของกระบวนการเชื่อม TIG แบบอุ่นลวดร้อน โดยการนำเครื่องเชื่อมแบบ TIG ที่เป็นแบบทั่วไป (Ordinary TIG) และการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG) มาเปรียบเทียบกัน มีการกำหนดความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม TIG แบบอุ่นลวดร้อน ที่ 220 ± 5 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบบนชิ้นงานท่อเหล็กคาร์บอนไร้รอยต่อ วัสดุ ASTM A106 โดยผลการทดสอบใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) และคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของชิ้นงาน ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม TIG แบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG) ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ความร้อนจะช่วยให้ชิ้นงานมีเม็ดเกรนที่ละเอียดกว่า มีการหลอมละลายของลวดเชื่อมดี ส่งผลให้รอยเชื่อมมีรอยตะเข็บที่ละเอียดและสม่ำเสมอมากกว่าการเชื่อม TIG แบบปกติ ประสิทธิภาพในการเชื่อมของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อม TIG แบบอุ่นลวดร้อน ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพดีกว่าการเชื่อม TIG ปกติมากกว่า 2 เท่า เนื่องจากผลกระทบจากการเย็นตัวของลวดเชื่อมที่มีต่อการเชื่อมอาร์ค และความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมแบบอุ่นลวดร้อนจะมีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยทิกปกติเล็กน้อย

Erick Alejandro et al. ได้ทำการศึกษากระบวนการเชื่อมทั้งสแตนแบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG) ด้วยวัสดุเติมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภท 316L เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลกระทบของการอาร์คแม่เหล็กที่เกิดการแกว่งสายบนรอยเชื่อม โดยทำการทดลองเปรียบเทียบการเชื่อมทั้งสแตนอาร์กอนแบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG) และการเชื่อมทั้งสแตนแบบเชื่อมเย็น (Cold-wire TIG) เพื่อดูพฤติกรรมของการปรับค่ากระแสในการเชื่อม จากการศึกษาพบว่าทิศทางของการส่ายและความเข้ม

ของกระแสที่ใช้ในการเชื่อม สามารถควบคุมได้โดยการปรับค่ากระแสไฟฟ้า (Polarity) และค่ากระแสที่จะทำให้ลวดร้อนและจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Macrographic) ผลพบว่ารอยเชื่อมที่ดีที่สุดคือรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการทดลองการเชื่อมแบบทังสเตนแบบอุ่นลวดร้อน (Hot-wire TIG)

E. Spaniol & T. Ungethüm et al. ทำการศึกษาการพัฒนากระบวนการเชื่อมแบบ TIG hot-wire สำหรับใช้ในการผลิตชิ้นส่วนโลหะเพิ่มเติม โดยต้องการหาวิธีทำให้ประสิทธิภาพการหลอมของลวดเพิ่มขึ้น และลดการเพิ่มความร้อนไปพร้อม ๆ กัน อีกทั้งศึกษาวิธีการปรับปรุงความแม่นยำของมิติในการเชื่อม โดยจากการศึกษาพบว่าวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการหลอมลวดและลดการใช้ความร้อนของกระบวนการเชื่อม TIG แบบอุ่นลวดร้อน สามารถทำได้ด้วยการให้ความต้านทานความร้อนที่ต้นทาง รวมไปถึงการออกแบบหัวเชื่อม (Welding Torch) , ตัวป้อนลวด (hot wire feeder) และ หัวฉีดแก๊ส (gas nozzle) ให้มีลักษณะที่สามารถควบคุมทิศทางได้ การปรับปรุงนี้จะช่วยให้มีความแม่นยำในการเชื่อมมากขึ้น และลดระยะเวลาในกระบวนการเชื่อมลงอย่างมาก

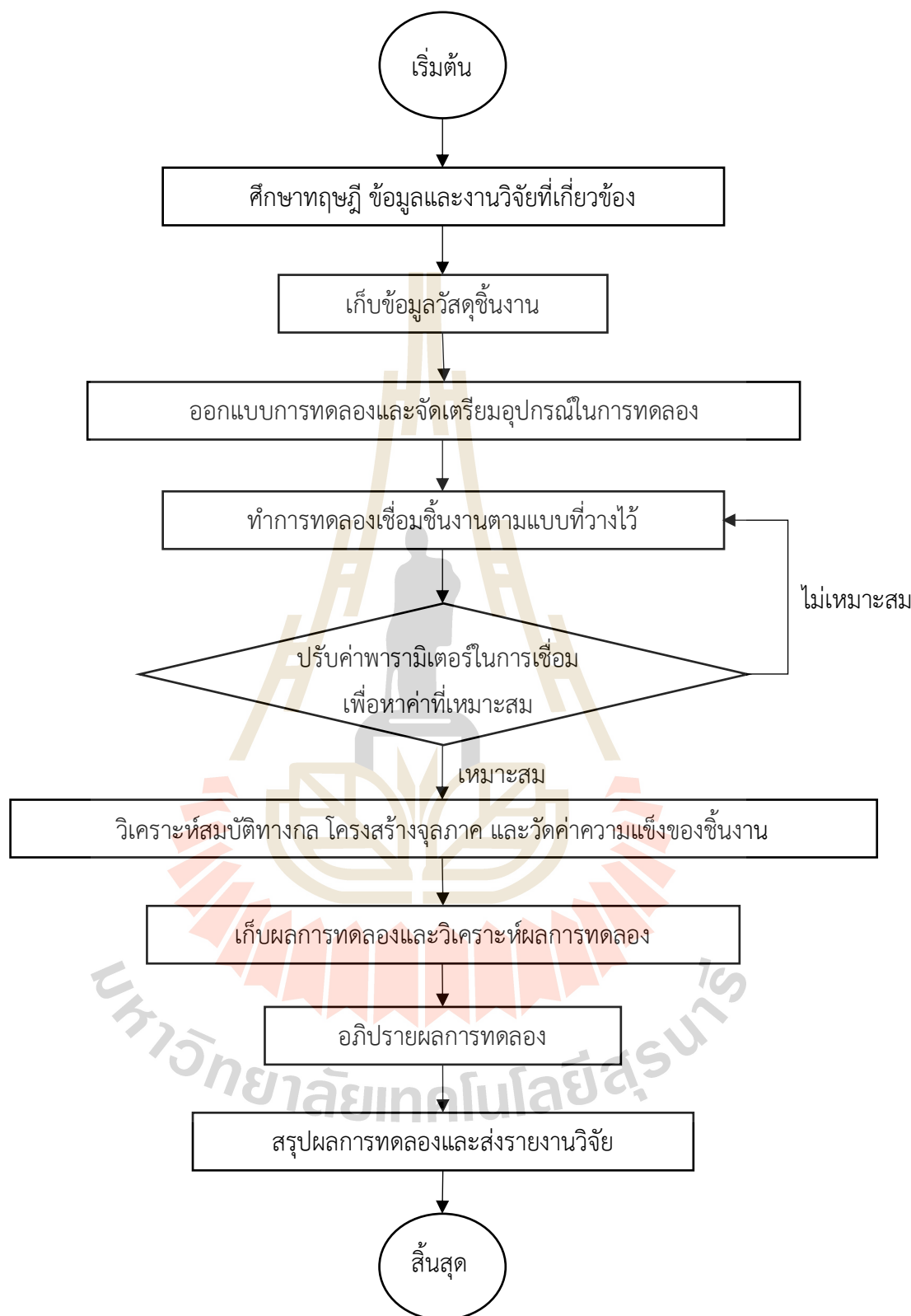


บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คทังสแตนร่วมกับการอุณหภูมิต่อ (Hot-wire TIG) โดยในการทดลองหาค่าที่เหมาะสมในการเชื่อมจะเริ่มต้นโดยการใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400 เป็นวัสดุฐานในการทดลอง ใช้ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W FLUX CORE WIRE เป็นลวดเติมในการสร้างชั้นแนวเชื่อม โดยใช้การเชื่อมในรูปแบบ BOP (Bead On Plate) ทำเชื่อมแนวราบ จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน โครงสร้างทางมหภาค โครงสร้างทางจุลภาค วัดค่าความแข็งของชิ้นงานและรวมไปถึงทดสอบความต้านทานการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 เพื่อรวบรวมผลและสรุปผลการทดลอง โดยดำเนินการวิจัยในครั้งนี้มีขั้นตอนดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดการดำเนินการ ดังนี้

- 3.1 ศึกษาทฤษฎี ข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.2 เก็บข้อมูลวัสดุชิ้นงาน
- 3.3 ออกแบบการทดลองและจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง
- 3.4 ทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานตามแบบที่วางไว้
- 3.5 ปรับค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเพื่อหาค่าที่เหมาะสม
- 3.6 วิเคราะห์สมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน
- 3.7 เก็บผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.8 อภิปรายผลการทดลอง
- 3.9 สรุปผลการทดลองและส่งรายงานวิจัย



รูปที่ 3.1 แสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ได้รับการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกจากอาคารเครื่องมือ 4 อาคารเครื่องมือ 6 และอาคารเครื่องมือ 10 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมทั้งได้รับความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำวิจัยจากวิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา โดยในการดำเนินงานวิจัย มีวัสดุและอุปกรณ์ประกอบไปด้วย

1. เครื่องเชื่อมไฟฟ้า TIG AC/DC ; HOT WIRE / COLDWIRE INVERTER PULS ขนาด 350 แอมป์ (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมไฟฟ้าด้วยกระบวนการ TIG Hot-wire

2. ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W FLUX CORE WIRE
ลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลองเป็นลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ High alloy ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W

3. เครื่องควบคุมความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

ในการดำเนินการทดลองนี้มีการใช้เครื่องควบคุมความเร็วในการเดินแนวเชื่อม โดยได้รับความอนุเคราะห์จากวิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมาในการใช้งานเครื่องควบคุมความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องควบคุมความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

4. เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400

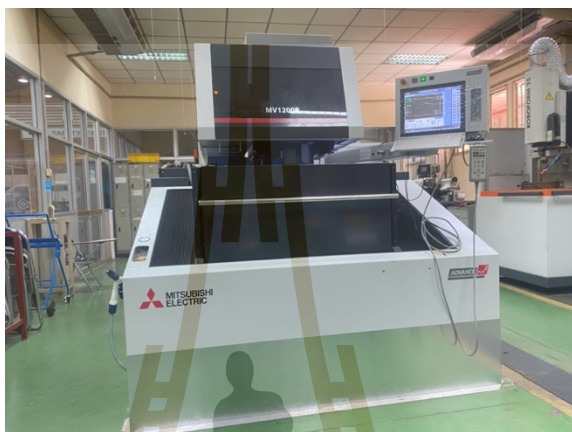
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SS400 ตามมาตรฐาน JIS ที่มีขนาดความกว้าง 100 มิลลิเมตร ความยาว 200 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.5) โดยมีการเตรียมชิ้นงานก่อนการทดลองโดยการขัดทำความสะอาดและเช็ดด้วย อะซิโตน (Acetone) เพื่อขจัดคราบสิ่งสกปรกที่พื้นผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SS400

5. เครื่องตัด Wire cut ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MV1200R

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปขึ้นเรือนชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นเรือนโลหะวิทยาแบบร้อน ได้มีการใช้งานเครื่องตัดโลหะด้วยลวด EDM Wire cut ในการตัดชิ้นงานให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องตัดโลหะ EDM Wire cut

6. เครื่องอัดขึ้นเรือนโลหะวิทยาแบบร้อน

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานจะนำชิ้นงานที่ผ่านการตัดแล้วมาอัดขึ้นเรือนด้วยเครื่องอัดตัวเรือนโลหะวิทยาแบบร้อน ยี่ห้อ IMT รุ่น G1-10 (รูปที่ 3.7) โดยมีการใช้งานร่วมกับผงเรซิน (Phenolic Resin) เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เหมาะสมแก่การนำไปขัดด้วยกระดาษทรายในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดตัวเรือนโลหะวิทยาแบบร้อน

7. เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน

ในการตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคจะมีการใช้เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน (รูปที่ 3.8) ในกระบวนการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค โดยมีการใช้งานเครื่องขัดร่วมกับการขัดกระดาษทรายทั้งหมด 8 เบอร์ไล่จากกระดาษทรายที่มีความหยาบมากที่สุดไล่ไปจนกระดาษทรายที่มีความละเอียดที่สุด ได้แก่ เบอร์ 80, 100, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200



รูปที่ 3.8 เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุน

8. เครื่องขัดผงอะลูมินา (Al_2O_3)

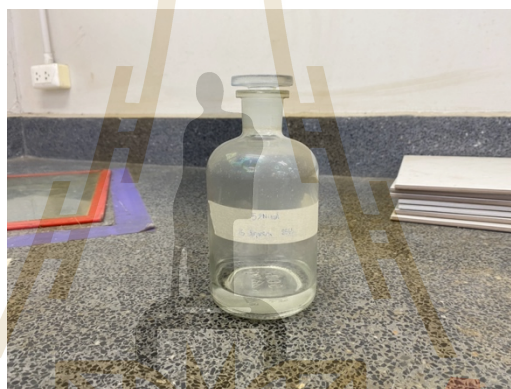
หลังจากทำการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายแล้ว จะนำชิ้นงานมาขัดขึ้นเงาโดยเครื่องขัดเงาแบบจานหมุนที่มีผ้าสักหลาดติดอยู่ (รูปที่ 3.9) ร่วมกับการใช้งานผงอะลูมินา (Al_2O_3) ขนาด 0.3 ไมโครเมตร (μm) ขัดจนชิ้นงานโลหะเป็นเงาและไม่มีขีดหรือรอยที่หน้าพื้นผิว และจึงนำชิ้นงานไปกัดผิวหน้าด้วยกรดในขั้นตอนต่อไป



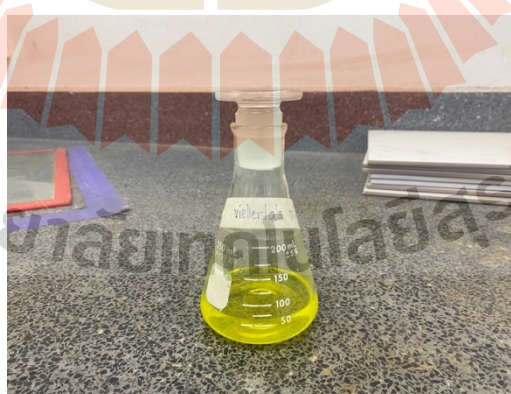
รูปที่ 3.9 เครื่องขัดเงาผงอะลูมินา (Al_2O_3)

9. กรดสำหรับกัดพื้นผิวชิ้นงาน

หลังจากกระบวนการเตรียมพื้นผิว (Surface preparation) เสร็จสิ้น จะนำชิ้นงานที่ผ่านการขัดกระดาษทรายและขัดเงาแล้วมากัด (Etching) ด้วยกรดเป็นระยะเวลา 10 วินาที โดยในกระบวนการกัดผิวชิ้นงานจะมีการใช้งานกรดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี (Chemical composition) ของเนื้อโลหะเชื่อมและโลหะฐาน โดยบริเวณของรอยเชื่อม (Weld metal) เป็นโลหะ High alloy ซึ่งจะมีการใช้ (1 g picric acid, 4 mL HCl, 96 mL ethanol) ในการกัด ดังแสดงในภาพที่ 3.11 และบริเวณเนื้อโลหะฐาน (Base metal) เป็นโลหะคาร์บอนต่ำ ดังนั้นจึงจะมีการใช้งานกรด Nital ที่ความเข้มข้น 5% ในการกัดพื้นผิวของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.10



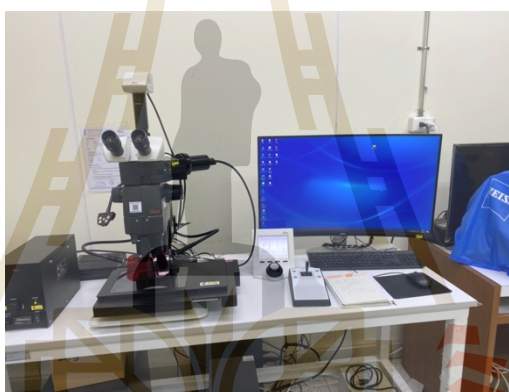
รูปที่ 3.10 กรด Nital ความเข้มข้น 5%



รูปที่ 3.11 กรด Vilella's reagent

10. กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบโครงสร้าง

ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จะทำการตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ที่มีกำลังขยาย 50-500 เท่า โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวหน้าชิ้นงานแล้ว มาตรวจสอบดูโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณตำแหน่งต่าง ๆ ของแนวเชื่อมและโลหะฐาน (Base metal) และทำการบันทึกผลการทดสอบ ซึ่งในการตรวจสอบและถ่ายภาพโครงสร้างทางมหภาค ผู้วิจัยได้มีการใช้งานกล้อง Leica Las X ในการถ่ายภาพโครงสร้างในระดับมหภาคของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.12 ในส่วนของการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ผู้วิจัยมีการใช้งานกล้อง Zeiss hal100 ดังแสดงในภาพที่ 3.13 ในการถ่ายภาพโครงสร้างทางโลหะวิทยาในระดับจุลภาค (Microstructure) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพโครงสร้างมหภาค



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค

11. เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

ในการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness test) จะนำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา มาทำการทดสอบวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (รูปที่ 3.14) โดยใช้หัวกดเพชร (HRC) มีการกำหนดแรงรอง (Minor load) 10 kgf กำหนดแรงหลัก (Major load) ที่ 150 kgf และใช้เวลากด (Dwell time) อยู่ที่ 3.0 วินาที การทดสอบจะทำการกดตามแนวเชื่อมเพื่อตรวจสอบค่าความแข็ง



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์

12. เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro vickers Hardness Test)

การทดสอบวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส รุ่น FM-800 (รูปที่ 3.15) โดยการกดทดสอบตามแนวเชื่อม บริเวณกระทบบร้อนและบริเวณเนื้อโลหะฐาน โดยใช้แรงในการกด (Test load) ที่ 1000 gf เป็นเวลา (Dwell time) 10 วินาที โดยบริเวณที่ทำการทดสอบจะเริ่มจากบริเวณรอบเชื่อม ลงมาจนถึงบริเวณโลหะฐาน (Base metal) มีระยะห่างในการกดแต่ละจุดที่ 0.25 มิลลิเมตร ตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM E92-82



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส

13. เครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

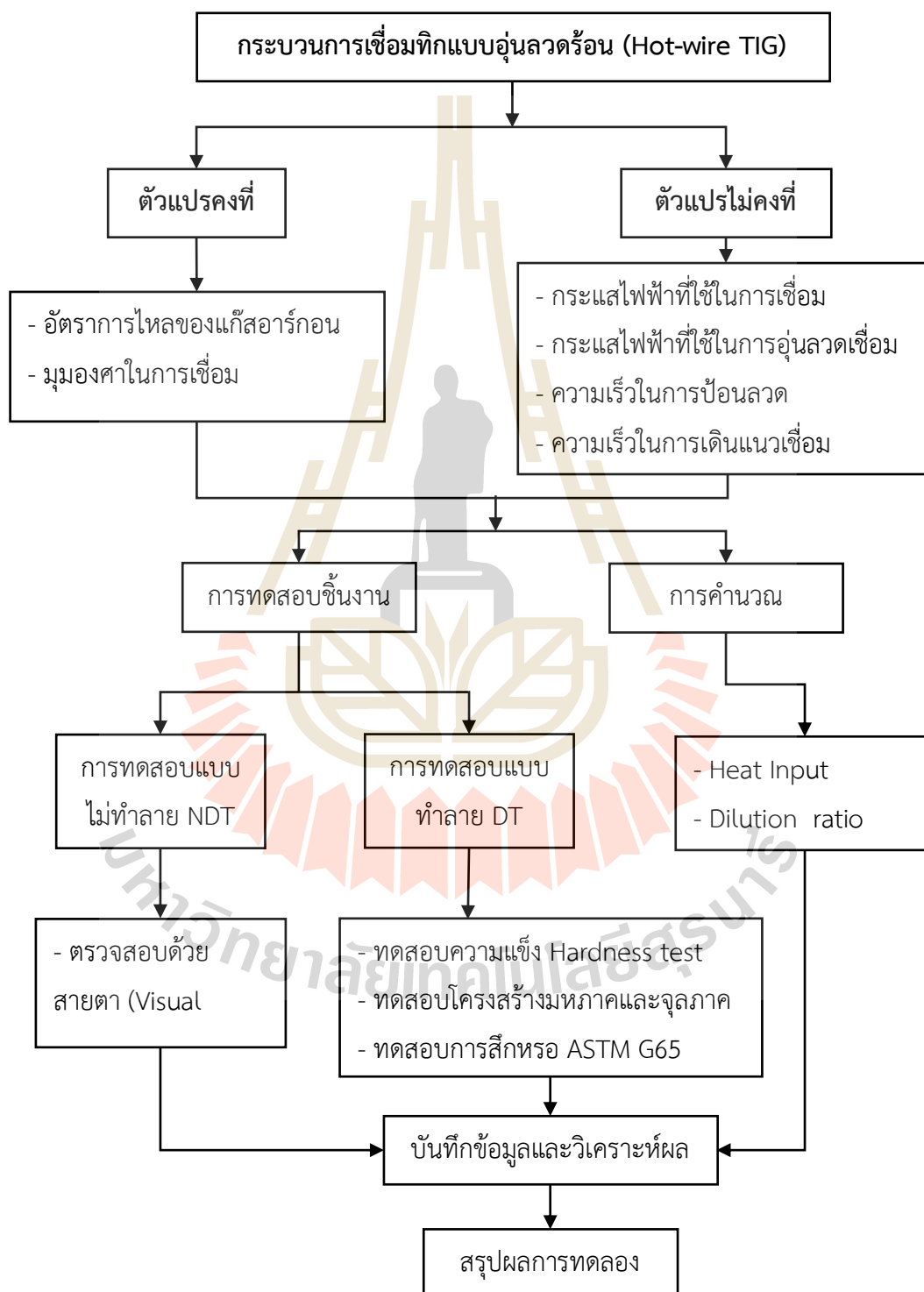
ในการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมว่ามีคุณสมบัติความสามารถในการต้านทานการสึกหรอในรูปแบบการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive ware) เพียงใด โดยในการทดสอบจะทำการนำชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยเครื่อง Wire cut ที่มีขนาด 1x3 นิ้ว มาติดตั้งกับเครื่องทดสอบการสึกหรอ (รูปที่ 3.16) โดยนำชิ้นงานติดตั้งไว้ใกล้กับล้ออย่างที่มีการถ่วงน้ำหนักเอาไว้ และมีการปล่อยเม็ดทรายให้ไหลผ่านที่ผิวหน้าชิ้นงานในขณะที่ล้อที่กำลังหมุนอยู่เพื่อเป็นการทดสอบ โดยมีการระบุใช้ข้อกำหนดมาตรฐาน Specified Procedure A มีอัตราการไหลของทราย 300 ถึง 400 กรัมต่อนาที (คำพูน พรหมสุภา, 2558)



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานเชื่อม

ดำเนินงานในงานวิจัยนี้มีเพื่อศึกษาการเชื่อมพอกผิวแข็งจะทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเชื่อม การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และดำเนินการทดลอง โดยมีขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.17 แสดงขั้นตอนในการดำเนินงานเชื่อม

3.3 การกำหนดปัจจัยและการออกแบบการทดลอง

ในการศึกษาวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานโดยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คไฟฟ้าแบบอุ่นลวดร้อน (TIG Hot-wire) โดยการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม รวมไปถึงคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อม ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการกำหนดปัจจัยในการทำการทดลองไว้ ดังนี้

3.3.1 ปัจจัยคงที่ในการทดลอง

1. อัตราการไหลของแก๊ส
2. มุมองศาในการเดินแนวเชื่อม
3. มุมองศาในการลับแท่ง Tungsten

3.3.2 ปัจจัยที่ต้องการศึกษาในการทดลอง

1. กระแสไฟในการเชื่อม (Arc current)
2. กระแสไฟในการอุ่นลวดร้อน (Hot wire current)
3. ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed)
4. ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed)
5. การเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน (Hard facing) จำนวน 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเชื่อม

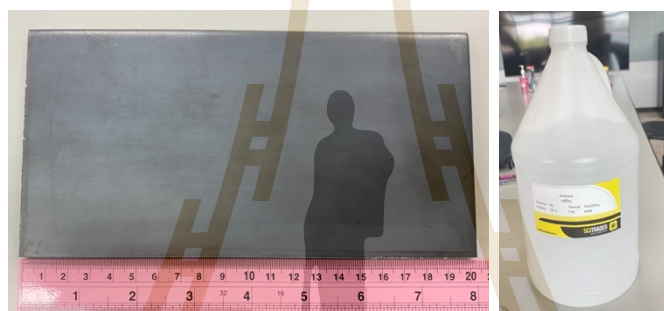
ค่าพารามิเตอร์	ค่า
กระแสไฟในการเชื่อม (แอมแปร์)	120, 130, 140, 150
กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม (แอมแปร์)	100, 110, 120, 130, 140
แรงดันในการเชื่อม (โวลต์)	9.9 - 16
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (มิลลิเมตร/นาที)	70, 80, 90, 100
ความเร็วในการป้อนลวด (เมตร/นาที)	0.5, 1, 1.5, 2
อัตราการไหลของแก๊ส อาร์กอน (ลิตร/นาที)	20
มุมองศาในการเดินแนวเชื่อม (องศา)	15
มุมองศาในการลับแท่งทั้งสแตน (องศา)	23

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานเชื่อมชิ้นงาน

ในการศึกษาทดลองเชื่อมชิ้นงานเพื่อยืดอายุการใช้งานด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบอุณหภูมิต่ำ ร้อนนี้ มีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย คือ

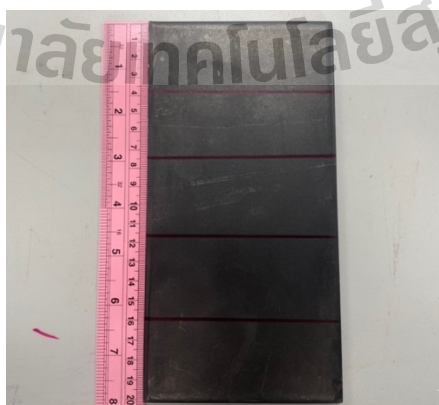
3.4.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง

การเตรียมชิ้นงานในการทดลองจะทำการตัดชิ้นงานโลหะฐาน (Base metal) วัสดุ SS400 ให้ได้ขนาดความกว้าง 100 มิลลิเมตร ความยาว 200 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร และทำการทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานโดยการขัดให้สิ่งสกปรกออก และทำการเช็ดทำความสะอาดโลหะฐานด้วย อะซิโตน (Acetone) เพื่อขจัดคราบมันที่พื้นผิวให้ออกให้หมด (รูปที่ 3.18)



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานในการทดลอง

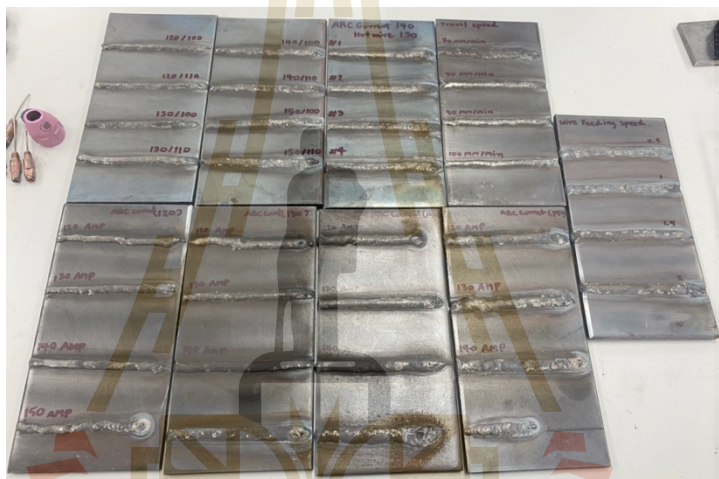
หลังจากนั้นจึงนำโลหะฐานที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วมากำหนดระยะในการทดลองเชื่อม โดยแผ่นโลหะฐานจะมีการทำการทดลองเชื่อมทั้งหมด 4 แนวเชื่อม (รูปที่ 3.19) โดยมีการเว้นระยะแต่แนวเชื่อมให้ห่างกันประมาณ 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.19 เพื่อป้องกันไม่ให้นแนวเชื่อมใกล้กันและเกิดความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานมากเกินไป



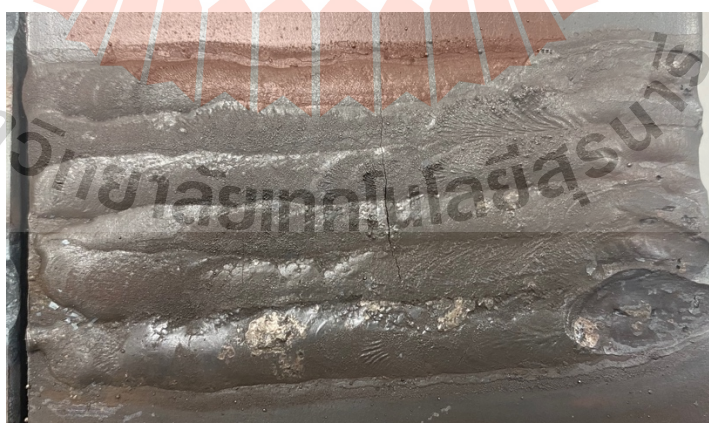
รูปที่ 3.19 การกำหนดระยะในการทดลองเชื่อม

3.4.2 การเชื่อมชิ้นงานในการทดลอง

ในการทดลองเชื่อมชิ้นงาน ผู้วิจัยได้ทำการเชื่อมชิ้นงานตามตารางการออกแบบการทดลอง โดยในการทดลองมีการทดลองเชื่อม 2 รูปแบบ แบ่งเป็นรูปแบบการเชื่อมแบบ 1 แนวเชื่อม (รูปที่ 3.20) ตามพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา โดยทำการเชื่อมแบบส้อมพารามิเตอร์ และรูปแบบการเชื่อมพอก (รูปที่ 3.21) ทำการเชื่อมพอก 1 ชั้น 2 ชั้นและ 3 ชั้น ซึ่งในการเชื่อมแต่ละครั้งจะมีการควบคุมความร้อนของชิ้นงานไม่ให้สูงจนเกินไป โดยจะทำการเชื่อมเมื่ออุณหภูมิของโลหะฐานไม่สูงเกิน 150 องศา เพื่อหลีกเลี่ยงความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน ซึ่งอาจส่งผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมและโลหะฐานให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานได้



รูปที่ 3.20 งานเชื่อมในรูปแบบ 1 แนวเชื่อม



รูปที่ 3.21 ชิ้นงานในรูปแบบการเชื่อมพอก

3.4.3 การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

หลังจากทำการเชื่อมชิ้นงานตามตารางออกแบบการทดลองแล้ว ผู้วิจัยได้มีการนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้วมาขัดทำความสะอาดอีกครั้งก่อนนำชิ้นงานไปเจาะด้วยเครื่องเจาะแนวตั้ง (รูปที่ 3.22) เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับเครื่องตัดโลหะ Wire cut ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ชิ้นงานที่เจาะด้วยเครื่องเจาะแนวตั้ง

โดยชิ้นงานที่ผ่านการเจาะและตอกรหัสแล้ว มีความจำเป็นต้องทำความสะอาดอีกครั้งเพื่อขจัดสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน รวมไปถึงการลบคมที่ขอบของรอยเจาะให้ไม่มีความคม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยร้าวที่ใช้ในการตัดขาดในระหว่างการตัดด้วยเครื่องตัดโลหะ Wire cut โดยผู้วิจัยได้ทำการป้อนข้อมูลเพื่อให้เครื่องตัดโลหะ Wire cut ทำการตัดชิ้นงานเป็นขนาด ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และความยาว 20 มิลลิเมตร เพื่อให้มีความเหมาะสมในการนำชิ้นงานที่ตัดไปอัดขึ้นร้อนชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นร้อนโลหะวิทยาแบบร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.23



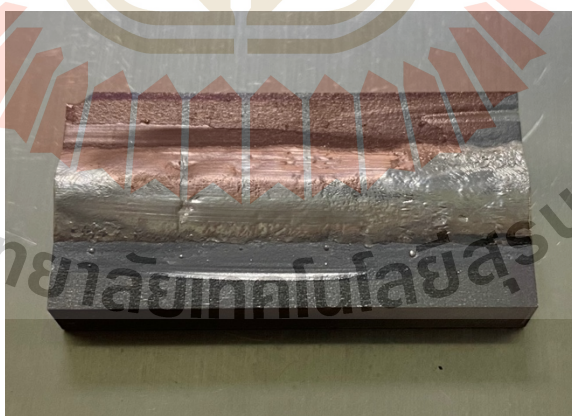
รูปที่ 3.23 ชิ้นงานที่ตัดและขึ้นร้อนชิ้นงาน

3.4.4 การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 จะมีการเตรียมในเบื้องต้นเหมือนการเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา แต่ในขั้นตอนการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดโลหะ Wire cut จะมีการเขียนโปรแกรมเพื่อตัดชิ้นงานให้มีขนาดที่แตกต่างจากเดิม โดยชิ้นงานสำหรับการทดสอบการสึกหรอจะมีการตัดให้ชิ้นงานมีขนาด ความกว้าง 20 มิลลิเมตร ความยาว 40 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.24) เพื่อให้ชิ้นงานที่ตัดออกมา (รูปที่ 3.25) มีขนาดที่เหมาะสมแก่การนำชิ้นงานไปติดตั้งทดสอบกับเครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ต่อไป



รูปที่ 3.24 บริเวณในการตัดชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G65



รูปที่ 3.25 ชิ้นงานที่ตัดเพื่อการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G65

3.5 การออกแบบการทดลองเชื่อม

ในการทดลองการศึกษาการเชื่อมเชื่อมเพื่อยืดอายุการใช้งานด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์ค ทั้งสแตนเลสและอลูมิเนียม จะมีการทดลองเชื่อมเพื่อทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกล ทั้งหมด 5 การทดลอง โดยแบ่งเป็น

1. การทดลองปรับกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด
2. การทดลองปรับความเร็วในการเดินแนวเชื่อม
3. การทดลองปรับความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม
4. การทดลองการเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน
5. การทดลองตรวจสอบมาตรฐานความสึกหรอ ASTM G65

3.5.1 การทดลองปรับกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด (Arc Current and Hot Wire Current)

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองปรับค่ากระแสไฟในการเชื่อม (Arc current) และการปรับค่ากระแสไฟในการอุ่นลวดร้อน (Hot wire current) เพื่อต้องการศึกษาหาปัจจัยในด้านกระแสไฟในการเชื่อมและกระแสไฟในการอุ่นลวดร้อน ที่ส่งผลให้แนวเชื่อมมีความเหมาะสมต่อการเชื่อมพอกเพื่อยืดอายุการใช้งานวัสดุให้ได้มากที่สุด กล่าวคือรอยเชื่อมมีขนาด รูปร่าง การหลอมลึก และมีค่าความแข็งที่มากที่สุด โดยในการทดลองนี้จะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมคงที่ที่ 80 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วในการเติมลวดเชื่อม คือ 1 เมตรต่อนาที กำหนดค่าอัตราไหลของแก๊สอาร์กอน (Argon) ที่ 20 ลิตรต่อนาที และกำหนดมุมมองในการเชื่อมที่ 15 องศาให้คงที่ โดยในการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้มีการปรับค่ากระแสไฟในการเชื่อมทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 120 130 140 และ 150 แอมแปร์ และกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ กระแสไฟในการอุ่นลวด 100 110 120 130 และ 140 แอมแปร์ (รูปที่ 3.26) โดยช่วงของกระแสไฟในการเชื่อมและกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมที่ได้ทำการกำหนดเนื่องจากการทดลองเก็บข้อมูลเบื้องต้น (Pilot test) ที่พบว่ากระแสไฟในการทดลองดังกล่าว มีความเหมาะสมแก่ชิ้นงานโลหะฐาน (Base metal) ที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร และลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร โดยสามารถแสดงตารางการออกแบบการทดลองของกระแสไฟ ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ตารางการออกแบบการทดลองปรับกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

กระแสไฟในการเชื่อม (แอมแปร์)	กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม (แอมแปร์)	เลขเรียกแทน
120	100	1
	110	2
	120	3

กระแสไฟในการเชื่อม (แอมแปร์)	กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม (แอมแปร์)	เลขเรียกแทน
	130	4
	140	5
130	100	6
	110	7
	120	8
	130	9
	140	10
140	100	11
	110	12
	120	13
	130	14
	140	15
150	100	16
	110	17
	120	18
	130	19
	140	20



รูปที่ 3.26 ตัวอย่างชิ้นงานในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

3.5.2 การทดลองปรับความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed)

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองปรับค่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อม เพื่อศึกษา ลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาและคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมที่มีความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ที่แตกต่างกัน ซึ่งในการทดลองนี้จะเลือกค่ากระแสไฟในการเชื่อมและกระแสอุณหพลเชื่อมที่มีความเหมาะสม โดยพิจารณาจากลักษณะของแนวเชื่อมด้วยการตรวจสอบแบบ Visual Inspection โดยการทดลองนี้ผู้วิจัยจะทำการปรับทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 70 80 90 และ 100 มิลลิเมตรต่อนาที (รูปที่ 3.27) และค่ากระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อมคือ 140 แอมแปร์ และกระแสไฟในการอุณหพลเชื่อมคงที่ที่ 130 แอมแปร์ ดังแสดงในตาราง 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางการออกแบบการทดลองปรับความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

กระแสไฟในการเชื่อม (แอมแปร์)	กระแสไฟในการอุณหพลเชื่อม (แอมแปร์)	ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (มม./นาที)	เลขเรียกแทน
140	130	70	21
		80	22
		90	23
		100	24



รูปที่ 3.27 ตัวอย่างชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

3.5.3 การทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed)

การทดลองนี้เป็นการทดลองปรับความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมเพื่อศึกษาลักษณะของแนวเชื่อมทั้งในด้าน ความกว้าง (weld width) ความนูน (reinforcement) และการหลอมลึก (penetration) ของแนวเชื่อมที่มีความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมเข้าสู่บ่อหลอมที่แตกต่างกัน ซึ่งความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมถูกกำหนดด้วยเครื่องป้อนลวดอัตโนมัติ (Wire feeder) โดยในการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ ความเร็วในการป้อนลวด 0.5 เมตรต่อนาที 1 เมตรต่อนาที 1.5 เมตรต่อนาที และ 2 เมตรต่อนาที (3.28) ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตารางการออกแบบการทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม

กระแสไฟในการเชื่อม (แอมแปร์)	กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม (แอมแปร์)	ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (ม./นาที)	เลขเรียกแทน
140	130	0.5	25
		1	26
		1.5	27
		2	28



รูปที่ 3.28 ชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม

3.5.4 การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน (Hard facing)

ในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงานมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่คงที่คือ ค่ากระแสไฟในการเชื่อม 140 แอมแปร์ กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม 130 แอมแปร์ และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ดังตารางที่ 3.5 ผู้วิจัยทำการเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน 1 ชั้น (รูปที่ 3.29) เชื่อมพอกผิวชิ้นงาน 2 ชั้น (รูปที่ 3.30) และเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน 3 ชั้น (รูปที่ 3.31) โดยการเชื่อมในแต่ละชั้นจะมีการพักชิ้นงานให้ความร้อนลดลงเป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิก่อนทำการเชื่อมในชั้นถัดไปไม่ให้เกิน 150 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานอย่างต่อเนื่องจะส่งผลให้เกิดความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานมากขึ้นซึ่งอาจส่งผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาของชิ้นงานเชื่อมได้

ตารางที่ 3.5 ตารางการออกแบบการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน

กระแสไฟในการเชื่อม (แอมแปร์)	กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม (แอมแปร์)	การเชื่อมพอกผิว	เลขเรียกแทน
140	130	1 ชั้น	29
		2 ชั้น	30
		3 ชั้น	31



รูปที่ 3.29 ชิ้นงานเชื่อมพอก 1 ชั้น



รูปที่ 3.30 ชิ้นงานเชื่อมพอก 2 ชั้น



รูปที่ 3.31 ชิ้นงานเชื่อมพอก 3 ชั้น

3.5.5 การทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM G65

ในการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM G65 จะมีการเลือกตรวจสอบจากแนวเชื่อมที่มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งพิจารณาจากลักษณะของแนวเชื่อมด้วยการตรวจสอบแบบ Visual Inspection (รูปที่ 3.32) โดยจะมีชิ้นงานที่ปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการทดสอบการสึกหรอทั้งหมด 8 ชิ้น ดังแสดงในตาราง 3.7 และชิ้นงานที่ทำการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตารางชิ้นงานเชื่อมพอกสำหรับทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน

การเชื่อมพอกผิว	เลขเรียกแทน
1 ชั้น	32
2 ชั้น	33
3 ชั้น	34

ตารางที่ 3.7 ตารางชิ้นงานเชื่อมสำหรับทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน

กระแสไฟในการเชื่อม (แอมแปร์)	กระแสไฟในการอุ่น ลวดเชื่อม (แอมแปร์)	เลขเรียกแทน
140	130	35
120	130	36
130	130	37
150	130	38
140	100	40
140	110	41
140	120	42
140	140	43



รูปที่ 3.32 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการดำเนินงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมซ่อมมิดพื้น อ้อย ด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (Hot wire TIG) และศึกษาผลกระทบทางโครงสร้าง โลหะวิทยาทั้งโครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาค รวมไปถึงคุณสมบัติเชิงกลโดยการ ทดสอบความแข็งของชิ้นงาน และทดสอบการสึกหรอของแนวเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM G65 ซึ่งตัว แปรหรือพารามิเตอร์ในการเชื่อมที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของงานเชื่อม ทั้งความสูง ความกว้าง การหลอมลึกของแนวเชื่อม (Penetration) ความกว้างของเขตบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจาก ความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) โดยผลของการดำเนินงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

4.1 การศึกษาโครงสร้างทางมหภาค (Macrostructure Investigation)

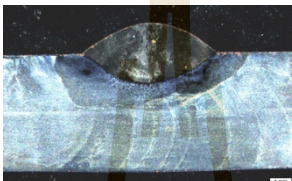
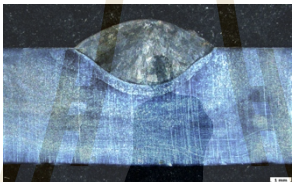
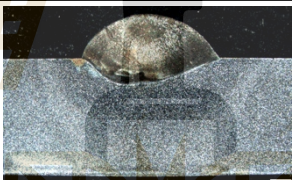
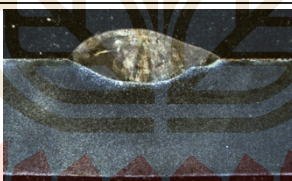
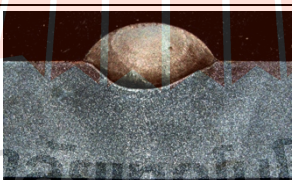
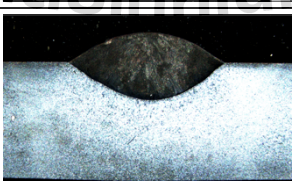
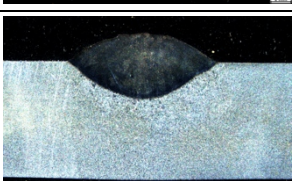
ในการศึกษาโครงสร้างทางมหภาค (Macrostructure Investigation) ของชิ้นงานที่ผ่านการ เตรียมพื้นผิวชิ้นงานและกัดด้วยกรดแล้วนั้น ผู้วิจัยได้นำชิ้นงานไปตรวจสอบเพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างทางมหภาคของชิ้นงานโดยการส่องผ่านด้วยกล้อง Leica Las X ซึ่งในการศึกษาโครงสร้าง ทางมหภาคมีผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล ดังนี้

4.1.1 ผลการทดลองการศึกษาโครงสร้างทางมหภาค

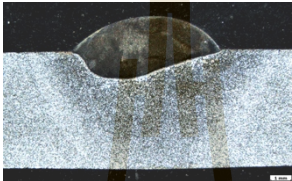
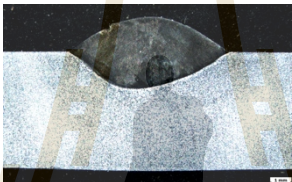
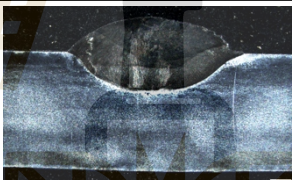
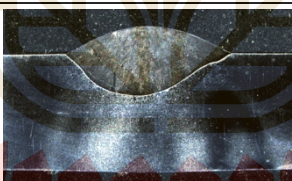
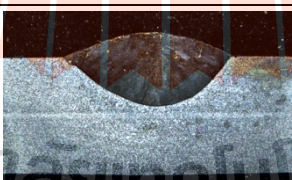
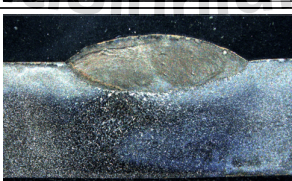
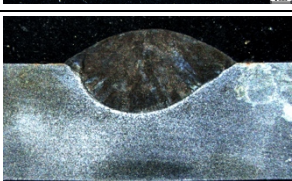
1. ลักษณะทางกายภาพของเนื้อโลหะเชื่อมในการทดลองปรับกระแสไฟในการ เชื่อมและการอุ่นลวด (Arc current and Hot wire current)

ในการทดลองนี้มีการศึกษาปัจจัยการเชื่อมในด้านกระแสไฟในการเชื่อม (Arc current) และกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม (Hot wire current) โดยจะมีการกำหนดค่าตัวแปรอื่น ๆ คงที่ไว้ดังตารางที่ 3.1 ตารางการออกแบบการทดลอง ซึ่งจากการทดลองศึกษาจะสามารถสังเกต ลักษณะทางกายภาพได้จากภาพลักษณะแนวเชื่อมที่มีการตรวจสอบผ่านกล้องและการใช้โปรแกรม Leica LasX ในการวัดขนาดค่าเฉลี่ยความกว้างและความลึกของแนวเชื่อม รวมไปถึงบริเวณเนื้อโลหะ เหนือโลหะฐาน (A) และบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่เกิดการหลอมลึกสู่โลหะฐาน (B) เพื่อใช้ในการ คำนวณอัตราเจือจาง (Dilution ratio) ที่เกิดขึ้นของแนวเชื่อมที่มีค่าตัวแปรกระแสไฟในการเชื่อมและ กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมที่แตกต่างกันได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

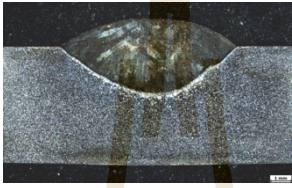
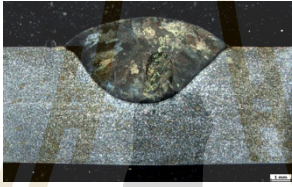
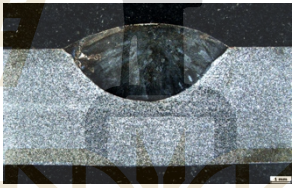
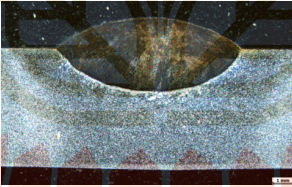
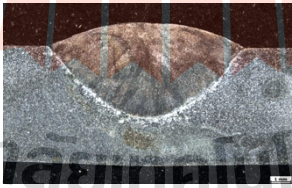
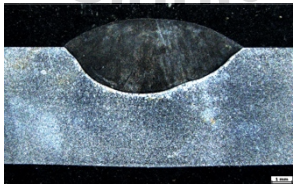
ตารางที่ 4.1 ภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

ชิ้นงาน	ตัวแปรในการเชื่อม		ลักษณะแนวเชื่อม	ความกว้างของแนวเชื่อม (mm.)	ความลึกของแนวเชื่อม (mm.)	Heat Input (J/mm)	Dilution ratio (%)
	กระแสไฟเชื่อม (A)	กระแสไฟอุ่นลวดเชื่อม (A)					
1		100		6.74	3.03	1300.40	50.55
2		110		7.01	3.29	1341.34	54.45
3	120	120		6.86	3.40	1382.28	32.35
4		130		7.61	2.70	1423.22	37.04
5		140		6.72	3.33	1464.16	39.88
6		100		7.74	3.40	1403.90	52.99
7	130	110		7.42	3.34	1444.84	55.04

ตารางที่ 4.1 ภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

ชิ้นงาน	ตัวแปรในการเชื่อม		ลักษณะแนวเชื่อม	ความกว้างของแนวเชื่อม (mm.)	ความลึกของแนวเชื่อม (mm.)	Heat Input (J/mm)	Dilution ratio (%)
	กระแสไฟเชื่อม (A)	กระแสไฟอุ่นลวดเชื่อม (A)					
8		120		7.41	3.02	1485.78	43.65
9		130		8.00	3.56	1526.72	46.58
10		140		8.80	3.75	1567.66	49.33
11	140	100		8.23	3.44	1511.90	62.21
12		110		8.36	3.73	1552.84	65.15
13		120		8.77	3.27	1593.78	57.19
14		130		8.56	4.20	1634.72	57.14

ตารางที่ 4.1 ภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

ชิ้นงาน	ตัวแปรในการเชื่อม		ลักษณะแนวเชื่อม	ความกว้างของแนวเชื่อม (mm.)	ความลึกของแนวเชื่อม (mm.)	Heat Input (J/mm)	Dilution ratio (%)
	กระแสไฟเชื่อม (A)	กระแสไฟอุ่นลวดเชื่อม (A)					
15		140		8.75	3.77	1675.66	65.55
16		100		8.26	4.34	1624.40	60.83
17		110		8.29	3.93	1665.34	66.92
18	150	120		8.94	3.44	1706.28	53.49
19		130		9.72	4.72	1747.22	72.46
20		140		8.87	3.76	1788.16	62.77

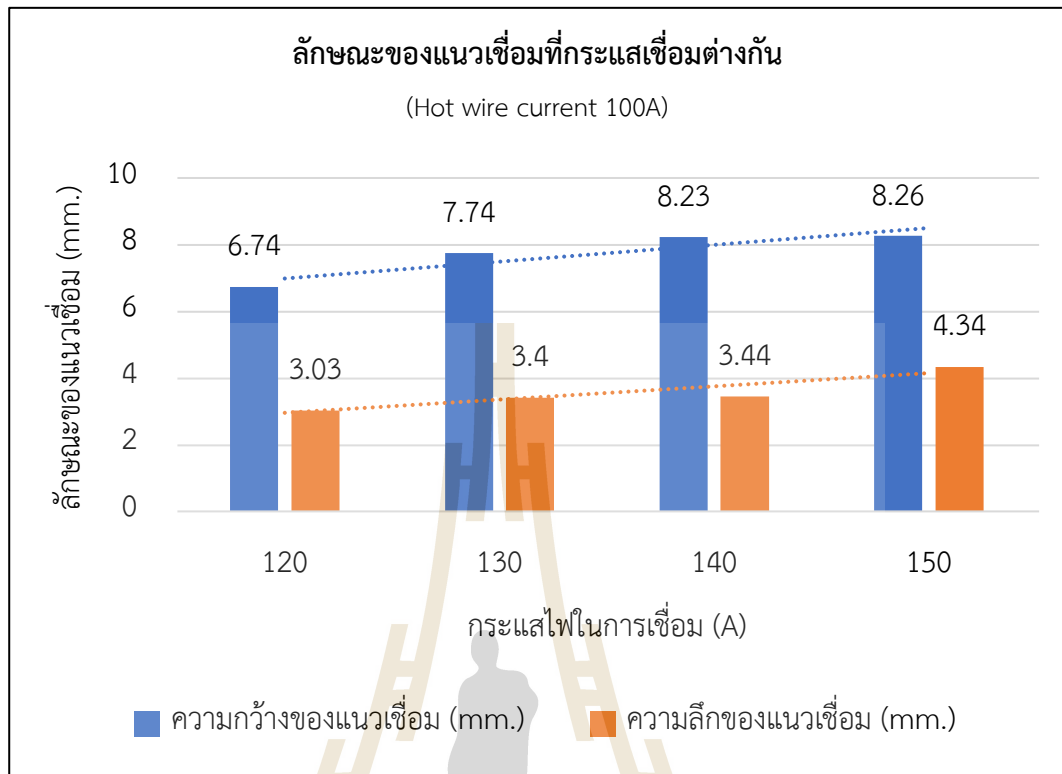
จากตารางแสดงภาพโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ของชิ้นงานเชื่อม ในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด ผู้วิจัยได้มีการกำหนดค่ากระแสไฟในการเชื่อมทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 120 130 140 และ 150 แอมแปร์ โดยในแต่ละช่วงของค่ากระแสไฟจะมีการปรับกระแสไฟที่ใช้ในการอุ่นลวดเพื่อตรวจสอบปัจจัยที่ส่งผลต่อแนวเชื่อม ซึ่งค่าของกระแสไฟในการอุ่นลวดจะมีการ

ปรับค่าทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ 100 110 120 130 และ 140 แอมแปร์ โดยค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ในการเชื่อม เช่น ค่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม อัตราการไหลของแก๊ส มุมองศาในการลับแท่งทั้งสแตนเลสและมูมองศาในการเดินแนวเชื่อม มีการคงที่ไว้ตามการออกแบบการทดลองในข้างต้น

โดยในการศึกษาวิจัยการเชื่อมซ่อมมิตพื้นอ้อยที่ผลิตด้วยวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (TIG Hot wire) จะมุ่งเน้นในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้แนวเชื่อมมีคุณสมบัติเหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเชื่อมซ่อมวัสดุที่ต้องรับแรงกระทำอย่างต่อเนื่องและเป็นเวลานาน กล่าวคือวัสดุที่นำไปเชื่อมพอกเพื่อใช้งาน ควรมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดี มีค่าความแข็งและความเหนียวที่เหมาะสม เนื่องจากหากวัสดุที่ผ่านการเชื่อมมีค่าความแข็งที่มากจนเกินไปจะส่งผลให้แนวเชื่อมพอกเกิดการแตกเนื่องจากความเปราะได้ อีกทั้งลักษณะของแนวเชื่อมที่เหมาะสมในการนำมาเชื่อมพอกผิวชิ้นงานมิตตัดอ้อยนั้น ควรมีความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมที่สามารถหลอมเป็นแนวเชื่อมที่ครอบคลุมพื้นผิววัสดุฐาน (Base Metal) ได้ ในขณะเดียวกันลักษณะการหลอมลึก (Penetration) ของแนวเชื่อมควรที่จะไม่หลอมลึกมากจนเกินไป เนื่องจากจะส่งผลให้เกิดการผสมกันของส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐานและวัสดุลวดเชื่อมเติมจนเกิดการเจือจาง (Dilution) ของเนื้อโลหะฐานกับวัสดุลวดเชื่อม และส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมพอกมีการเปลี่ยนแปลงไปจากความต้องการได้

1.1 การวิเคราะห์ปัจจัยการเชื่อมในด้านกระแสไฟในการเชื่อม (Arc current)

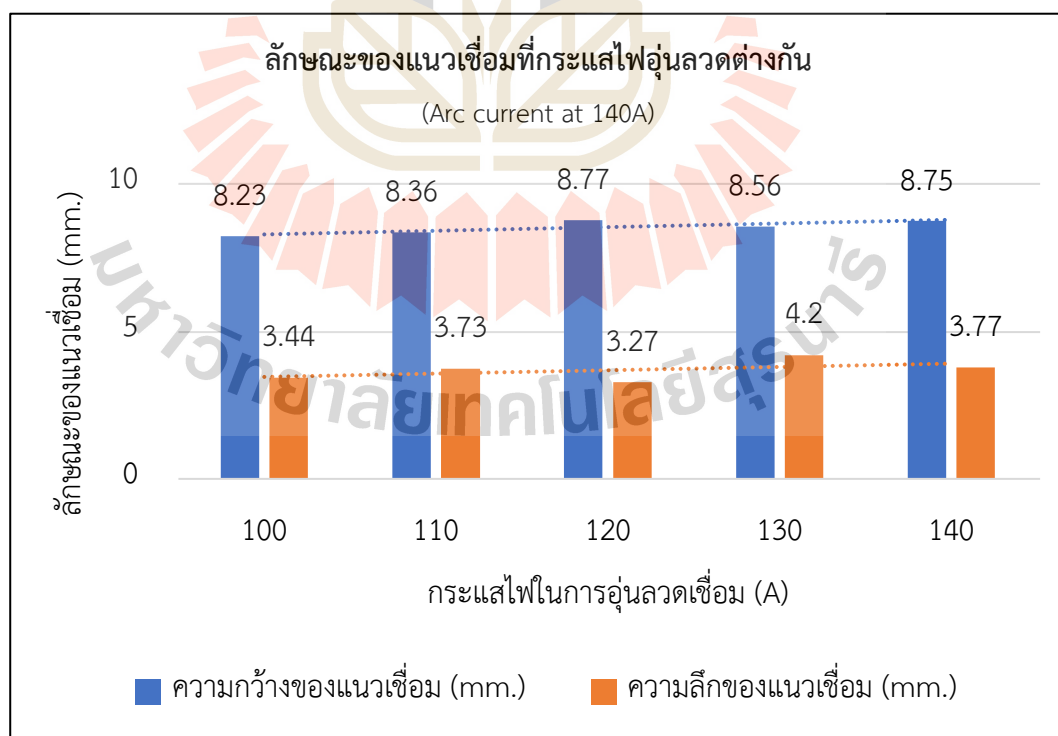
โดยจากการตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาค (Macrostructure) ของชิ้นงานเชื่อมที่มีการปรับค่ากระแสไฟในการเชื่อมแตกต่างกัน ผลการตรวจสอบจากตารางที่ 4.1 จะสามารถสังเกตได้ว่ากระแสไฟในการเชื่อม 150 แอมแปร์ เป็นค่ากระแสที่ทำให้แนวเชื่อมมีลักษณะความกว้างและความลึกเฉลี่ยมากที่สุดจากทั้ง โดยเมื่อทำการคงที่กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมให้คงที่ไว้ และเพิ่มค่ากระแสไฟในการเชื่อมจะส่งผลให้ลักษณะของรอยเชื่อมมีแนวโน้มความกว้างของรอยเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน (รูปที่ 4.1) เนื่องจากกระแสไฟในการเชื่อมชิ้นงานเมื่อมีการปรับให้สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดเปลวอาร์คที่มีความแรงและมีความร้อนมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) โดยในการคำนวณจะพบว่าความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด ดังนั้นเมื่อทำการเชื่อม ลวดเชื่อมที่เข้าสู่เปลวอาร์คจะเกิดเป็นบ่อหลอม ที่มีเกิดการหลอมละลายและมีการแผ่ขยายของเนื้อโลหะเชื่อมให้มีความกว้างมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการใช้กระแสในการเชื่อมที่มากขึ้นจะส่งผลต่อการเจือจางของแนวเชื่อม โดยจากตารางจะพบว่าที่กระแสไฟในการเชื่อมที่น้อยจะส่งผลให้การเจือจางของแนวเชื่อมน้อยเช่นกัน และเมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟในการเชื่อมมากขึ้นจะส่งผลให้การเจือจางของแนวเชื่อมมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.1 กราฟการเปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อมที่ตัวแปรกระแสเชื่อมต่างกัน

1.2 การวิเคราะห์ปัจจัยการเชื่อมในด้านกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม (Hot wire current)

โดยจากการตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาค (Macrostructure) ของชิ้นงานเชื่อมที่มีการปรับค่ากระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมที่แตกต่างกัน ผลการตรวจสอบจากลักษณะของแนวเชื่อมจะสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อทำการคงที่กระแสไฟในการเชื่อมไว้ และทำการเพิ่มค่ากระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมจะส่งผลให้ลักษณะของรอยเชื่อมมีแนวโน้มความกว้างของรอยเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย และมีการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อย (รูปที่ 4.2) โดยจากการทดลองในตารางที่ 4.1 ค่ากระแสอุ่นลวดเชื่อม 120 แอมแปร์ เป็นค่ากระแสที่ทำให้แนวเชื่อมมีลักษณะความกว้างมากที่สุด และเมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมให้สูงขึ้นจะทำให้การเจือจาง (Dilution ratio) ของแนวเข็มน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มกระแสในการอุ่นลวดเชื่อมก่อนที่ลวดเชื่อมจะเข้าสู่บ่อหลอมจะช่วยให้ลวดเชื่อมเกิดการหลอมละลายบนโลหะฐานได้อย่างรวดเร็วและไม่เกิดการหลอมละลายโลหะฐานให้ผสมกับเนื้อลวดเชื่อม จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่มีการเพิ่มกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมที่เพิ่มขึ้น มีอัตราการเจือจางที่น้อยลง และจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะพบว่าเมื่อมีการศึกษาปรับค่ากระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมจะส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมและส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมด้วย

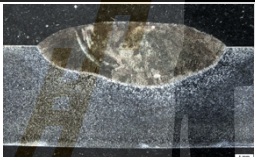
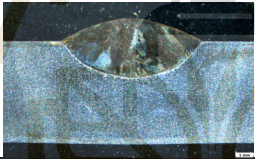
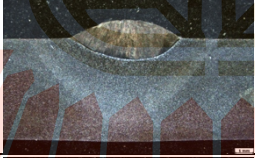



รูปที่ 4.2 กราฟการเปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อมที่ตัวแปรกระแสอุ่นลวดต่างกัน

2. ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมในการทดลองปรับความเร็วเดินแนวเชื่อม (Travel speed)

ในการทดลองนี้มีปัจจัยการเชื่อมในด้านความเร็วในการเดินแนวเชื่อม โดยมีการกำหนดค่ากระแสในการเชื่อมและกระแสในการอุ่นลวดเชื่อมคงที่ คือ กระแสไฟในการเชื่อม 140 A และ กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม 130 A ซึ่งจะสามารถสังเกตลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมที่มีค่าตัวแปรความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่แตกต่างกันได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

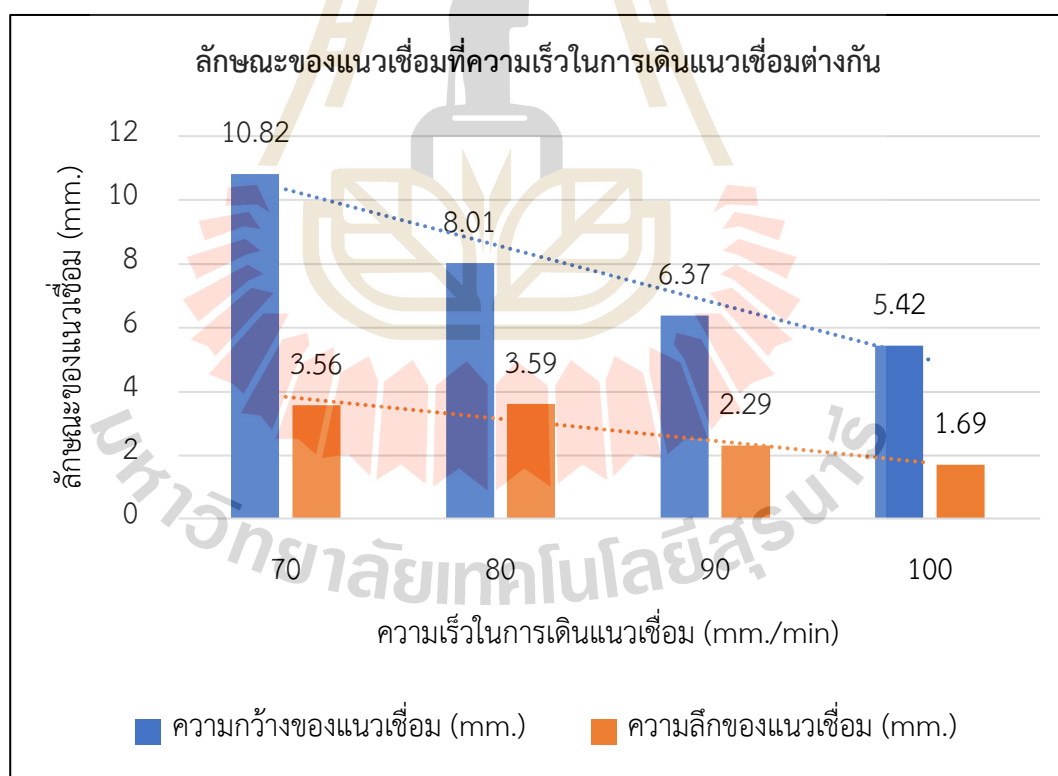
ตารางที่ 4.2 ตารางภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

ชิ้นงาน	ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (มม./นาท)	ลักษณะแนวเชื่อม	ความกว้างของแนวเชื่อม (mm.)	ความลึกของแนวเชื่อม (mm.)	Heat Input (J/mm)	Dilution ratio (%)
21	70		10.82	3.56	1792.22	57.90
22	80		8.01	3.59	1634.72	60.97
23	90		6.37	2.29	1512.22	51.90
24	100		5.42	1.69	1414.22	52.57

จากตารางแสดงภาพโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อมจะมีการศึกษาลักษณะของแนวเชื่อมโดยการปรับค่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 4 ค่า ได้แก่ 70 80 90 และ 100 มม./นาท ซึ่งในการทดลองนี้ได้มีการกำหนดค่ากระแสไฟในการเชื่อมและค่ากระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมคงที่ คือ กระแสไฟเชื่อม 140 แอมแปร์ และกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม 130 แอมแปร์โดยค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ในการเชื่อม เช่น ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม อัตราการไหลของแก๊ส เป็นต้น จะมีการคงที่ไว้ตามการออกแบบการทดลองในข้างต้น

2.1 การวิเคราะห์ปัจจัยการเชื่อมในด้านความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed)

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคของลักษณะแนวเชื่อมที่มีปัจจัยด้านความเร็วในการเดินแนวเชื่อม พบว่าเมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม จะส่งผลให้ลักษณะของแนวเชื่อมมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยแนวเชื่อมที่มีความเร็วได้ การเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แนวเชื่อมมีลักษณะความกว้างที่น้อยลง และมีการหลอมลึกที่น้อยลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากความเร็วในการเดินแนวเชื่อมจะส่งผลต่อปริมาณน้ำโลหะที่มีการหลอมเหลวเข้าสู่บ่อหลอม เมื่อมีการเดินแนวเชื่อมที่เร็วจะทำให้ปริมาณน้ำโลหะที่บริเวณบ่อหลอมของแนวเชื่อมน้อย รวมไปถึงความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) น้อยลง จึงทำให้แนวเชื่อมมีลักษณะความกว้างและความลึกที่น้อยลง ดังแสดงได้ ในรูปที่ 4.3 แต่ในขณะเดียวกันความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดแนวโน้มการเงี้ยวของแนวเชื่อมที่น้อยลงเนื่องจากความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานน้อยลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.3 กราฟการเปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อมที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่างกัน

3. ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมในการทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed)

ในการทดลองนี้มีปัจจัยการเชื่อมในด้านความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมจะสามารถสังเกตลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมที่มีค่าตัวแปรความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังตาราง 4.3

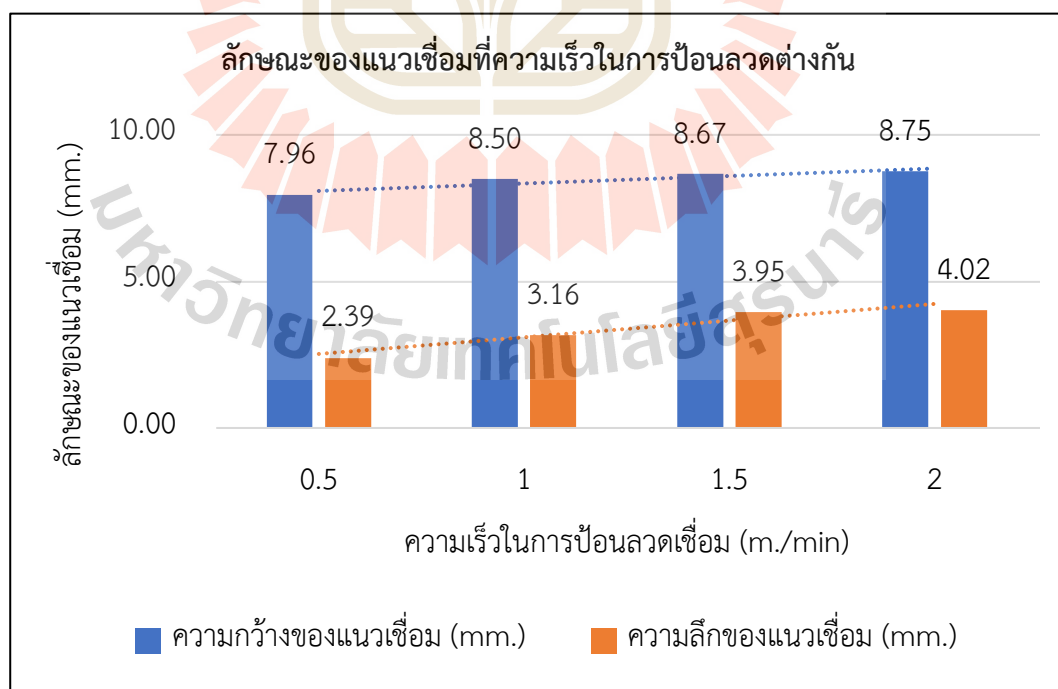
ตารางที่ 4.3 ภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม

ชิ้นงาน	ความเร็วป้อนลวด (เมตร/นาที)	ลักษณะแนวเชื่อม	ความกว้างแนวเชื่อม (mm.)	ความลึกแนวเชื่อม (mm.)	Heat Input (J/mm)	Dilution ratio (%)
25	0.5		7.96	2.39	2166.94	79.05
26	1		8.50	3.16	1634.72	74.68
27	1.5		8.67	3.95	1457.31	64.56
28	2		8.75	4.02	1368.61	59.14

จากตารางแสดงภาพโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ของชิ้นงานศึกษา ลักษณะของแนวเชื่อมโดยการปรับค่าความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 4 ค่า ได้แก่ 0.5 1 1.5 และ 2 เมตรต่อนาที ซึ่งในการทดลองนี้ได้มีการกำหนดค่ากระแสไฟในการเชื่อมและค่ากระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ในการเชื่อมคงที่ เมื่อมีการปรับความเร็วในการป้อนลวดที่ 0.5 เมตรต่อนาทีจะส่งผลให้ความกว้างของแนวเชื่อมมีขนาด 7.96 มิลลิเมตร และความลึกของแนวเชื่อม 2.39 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มความเร็วในการป้อนลวดเป็น 1 เมตรต่อนาที จะได้ค่าความกว้างของแนวเชื่อมมีขนาด 8.70 มิลลิเมตร และความลึกของแนวเชื่อม 3.16 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อนาที ความกว้างของแนวเชื่อมจะมีขนาด 8.67 มิลลิเมตร และความลึกของแนวเชื่อม 3.95 มิลลิเมตร และเมื่อมีการปรับค่าความเร็วในการป้อนลวดอยู่ที่ 2 เมตรต่อนาที จะทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความกว้าง 8.55 มิลลิเมตร และความลึกของแนวเชื่อม 3.43 มิลลิเมตร

3.1 การวิเคราะห์ปัจจัยการเชื่อมในด้านความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed)

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคของแนวเชื่อมที่มีปัจจัยในการทดลอง คือ ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม พบว่าเมื่อมีการปรับค่าความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมให้มีความเร็วที่มากขึ้นจะส่งผลให้แนวเชื่อมมีลักษณะความกว้างที่มากขึ้น และมีแนวโน้มความลึกของแนวเชื่อมที่มากขึ้นเช่นเดียวกัน (รูปที่ 4.4) เนื่องจากความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมจะส่งผลต่อขนาดของแนวเชื่อมเมื่อทำการเชื่อมชิ้นงานจะมีบ่อหลอมที่เกิดขึ้น และเมื่อมีการนำลวดเชื่อมเข้าสู่บ่อหลอมจะเกิดการหลอมละลายลวดเชื่อมเกิดเป็นเนื้อโลหะเชื่อมที่พอกมากขึ้น เมื่อความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมเข้าสู่บ่อหลอมมากขึ้นจึงเป็นการเพิ่มปริมาณของเนื้อโลหะเชื่อมของแนวเชื่อม จึงส่งผลให้ลักษณะของแนวเชื่อมมีความกว้างและความลึกที่มากขึ้นด้วย โดยความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมมีผลต่อความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานเนื่องจากการป้อนลวดในกระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อนนี้เป็นกระบวนการที่มีเครื่องป้อนลวดที่มีแหล่งพลังงานในการอุ่นลวดให้มีความร้อนก่อนทำการเชื่อม เมื่อลวดเชื่อมมีการป้อนผ่านเครื่องป้อน (Wire feeder) ที่มีการทำความร้อนอย่างช้า ๆ จะทำให้มีความร้อนเข้าสู่สะสมอยู่ในลวดเชื่อมมากกว่าการป้อนลวดเชื่อมที่เร็วขึ้น จึงส่งผลให้การคำนวณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานในการทดลองนี้มีค่าที่สูงขึ้น และส่งผลต่อเนื่องกับอัตราเงื้องาจางของแนวเชื่อมที่จะมีการเงื้องาจางที่มากขึ้นเมื่อมีความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานสูงขึ้นเช่นกัน

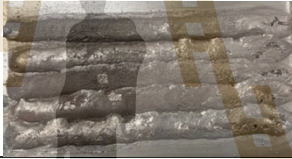
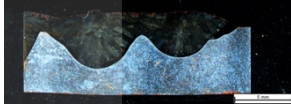

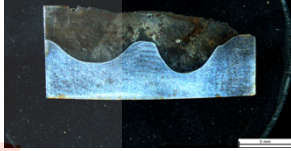

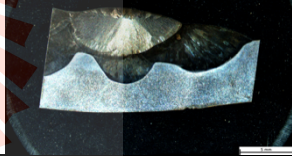


รูปที่ 4.4 กราฟการเปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อมที่ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมต่างกัน

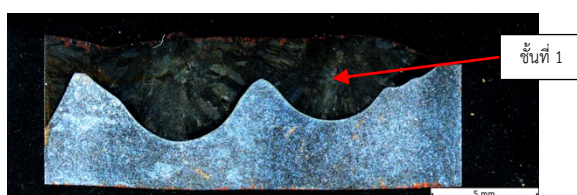
4. ลักษณะทางกายภาพของเนื้อโลหะเชื่อมในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็ง ชั้นงาน (Hard facing)

ในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นงานเพื่อทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นเชื่อมพอกผิวที่มีการเชื่อมพอก 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น เป็นการเชื่อมพอกผิวชั้นงานโดยไม่มี การเชื่อมรองพื้นก่อน โดยในการทดลองมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทดลองเชื่อมคือ กำหนด กระแสไฟในการเชื่อมที่ 140 แอมแปร์ กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม 130 แอมแปร์ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 มม./นาทื ความเร็วในการป้อนลวดที่ 1 เมตร/นาทื และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ตาม ตารางการออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 4.4 ภาพโครงสร้างชั้นงานในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นงาน

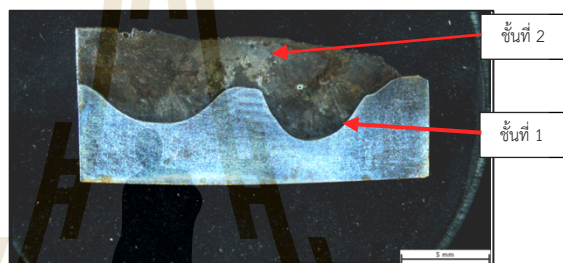
ชั้นงาน	การเชื่อมพอก	แนวเชื่อม	ลักษณะแนวเชื่อม
29	1 ชั้น		
30	2 ชั้น		
31	3 ชั้น		

ชั้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอก 1 ชั้น (รูปที่ 4.5) มีค่าเฉลี่ยความสูงของแนวเชื่อมอยู่ที่ 4.93 มิลลิเมตร ลวดเชื่อมมีการหลอมละลายและก่อตัวเป็นแนวเชื่อมพอกที่มีความสม่ำเสมอ แนวเชื่อมพอกไม่มีรอยบกพร่องเกิดขึ้นในเนื้อโลหะเชื่อม และความร้อนที่เข้าสู่ชั้นงานโลหะฐาน (Base metal) มีไม่มากจึงไม่ส่งผลให้โลหะฐานเกิดการเปลี่ยนแปลง



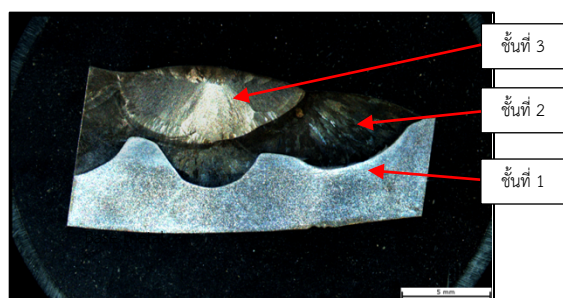
รูปที่ 4.5 ลักษณะแนวเชื่อมพอก 1 ชั้น

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอก 2 ชั้น (รูปที่ 4.6) แนวเชื่อมมีค่าเฉลี่ยความสูงเพิ่มขึ้นมากกว่าการเชื่อมพอก 1 ชั้น คือมีความสูงของแนวเชื่อม 5.46 มิลลิเมตร ในการเชื่อมพอกจำนวน 2 ชั้นจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าแนวเชื่อมเริ่มมีการแตกของแนวเชื่อมพอกชั้นเล็กน้อย เนื่องจากความแตกต่างของวัสดุลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมและโลหะฐานที่ใช้ วัสดุลวดเชื่อมที่นำมาใช้ในการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานเป็นลวดเชื่อมที่มีค่าความแข็งและความเปราะสูงมากกว่าโลหะฐานที่เป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่มีความเหนียว (Ductile) มากกว่า โดยในขณะที่ดำเนินการเชื่อมพอกแนวเชื่อมอยู่นั้น ในแนวเชื่อมจะมีความร้อนอยู่สะสมอยู่โลหะจึงมีการขยายตัว แต่เมื่อแนวเชื่อมเกิดการเย็นตัว เนื้อโลหะเชื่อมจะเกิดการหดตัวของแนวเชื่อมส่งผลทำให้เกิดการแตกของแนวเชื่อมพอก 2 ชั้น



รูปที่ 4.6 ลักษณะแนวเชื่อมพอก 2 ชั้น

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอก 3 ชั้น (รูปที่ 4.7) พบว่าแนวเชื่อมพอกมีค่าเฉลี่ยความสูงของแนวเชื่อมสูงที่สุด คือ 7.40 มิลลิเมตร โดยลักษณะของแนวเชื่อมพอก 3 ชั้น จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าแนวเชื่อมเกิดการแตก (Crack) อย่างชัดเจน และบริเวณโลหะฐาน (Base metal) ของชิ้นงานเชื่อมพอก 3 ชั้น เกิดการโค้งเสียรูปจากเดิม เนื่องจากความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานที่มีการสะสม อีกทั้งความแข็งของลวดเชื่อมที่แตกต่างกับเนื้อโลหะฐาน โดยวัสดุของลวดเชื่อมที่นำมาใช้ในการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานเป็นลวดเชื่อมที่มีค่าความแข็งและความเปราะสูงมากกว่าโลหะฐานที่เป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่มีความเหนียว (Ductile) มากกว่า ดังนั้นเมื่อแนวเชื่อมพอกจำนวน 3 ชั้น เกิดการเย็นตัวจะส่งผลให้แนวเชื่อมเกิดการหดจึงเกิดเป็นการแตกที่แนวเชื่อมชิ้นงานได้



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะแนวเชื่อมพอก 3 ชั้น

4.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์การศึกษาโครงสร้างทางมหภาค

ในการดำเนินงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมช่องมิตส์บ๊ออย ด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (Hot wire TIG) โดยมุ่งเน้นการศึกษาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้กระบวนการเชื่อมพอกหรือเชื่อมช่องมิตส์บ๊ออย สามารถเพิ่มอายุการใช้งานมิตส์บ๊ออยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยในกระบวนการเชื่อมพอกเพื่อยืดอายุการใช้งานนั้น จำเป็นต้องมีการเลือกใช้พารามิเตอร์ที่ทำให้แนวเชื่อมมีขนาดความกว้างและการหลอมลึกของแนวเชื่อมที่เหมาะสม โดยความกว้างของแนวเชื่อมจะบ่งบอกถึงพื้นที่ที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิว กล่าวคือ ถ้ามีความกว้างของแนวเชื่อมมาก จะทำให้สามารถเชื่อมพอกผิวในปริมาณมากได้และจะให้ลักษณะแนวเชื่อมที่มีความสูงน้อย และการหลอมลึกของชิ้นงานจะมีผลต่ออัตราการเจือจาง (Dilution ratio) ของวัสดุ ซึ่งหากมีการหลอมลึกที่มากเกินไปจะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงได้

โดยในการศึกษาโครงสร้างมหภาค (Macrostructure Investigation) ของแนวเชื่อมโดยแบ่งการศึกษาค่าพารามิเตอร์ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ตามการทดลองทั้งหมด 4 การทดลอง ได้แก่

1. การทดลองปรับกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด (Arc Current and Hot Wire Current)

จากการทดลองศึกษาปัจจัยในการเชื่อมในด้านกระแสไฟในการเชื่อมและกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ได้แนวเชื่อมที่มีขนาดความกว้างมากที่สุด แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ลักษณะของแนวเชื่อมที่ผ่านการทดลองปรับกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

ที่	ชิ้นงานที่	ตัวแปรในการเชื่อม		ความกว้างแนวเชื่อม (mm.)	ความลึกแนวเชื่อม (mm.)	Heat Input (J/mm)
		กระแสไฟเชื่อม (A)	กระแสไฟอุ่นลวด (A)			
1	19	150	130	9.72	4.72	1747.22
2	18	150	120	8.94	3.44	1706.28
3	20	150	140	8.87	3.76	1788.16
4	10	130	140	8.80	3.75	1567.66
5	13	140	120	8.77	3.27	1464.16

โดยในการทดลองศึกษาปัจจัยในด้านกระแสไฟในการเชื่อมและกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ได้แนวเชื่อมที่มีความกว้างมากที่สุดคือ ชิ้นงานที่ 19 (กระแสเชื่อม 150 A

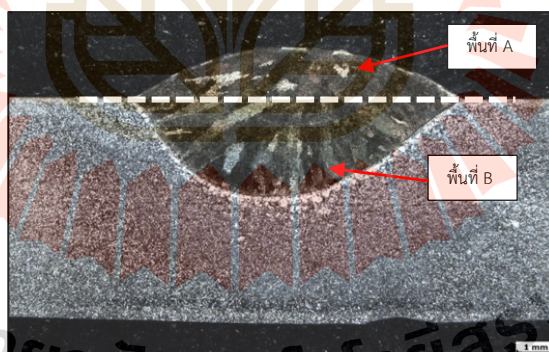
กระแสอุณหภูมิตั้งที่ 130 A) แต่ที่ค่าตัวแปรนี้จะมีค่าความลึกของแนวเชื่อมที่ค่อนข้างมาก ดังนั้นหากพิจารณาความลึกที่เหมาะสมของแนวเชื่อมด้วยแล้วนั้น การเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของชิ้นงานที่ 18 คือ กระแสไฟเชื่อม 150 A และกระแสไฟในการอุณหภูมิตั้งที่ 120 A จะได้ลักษณะของแนวเชื่อมที่เหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในการเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน

2. การทดลองปรับความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed)

จากการทดลองศึกษาปัจจัยในการเชื่อมในด้านการเดินแนวเชื่อม ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่ช้าจะส่งผลให้ได้แนวเชื่อมที่มีขนาดความกว้าง โดยที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 70 มม./นาที จะได้ค่าความกว้างของแนวเชื่อมอยู่ที่ 10.82 มม. และความลึกของแนวเชื่อม 3.56 มม. ซึ่งมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน

3. การทดลองปรับความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed)

จากการทดลองศึกษาปัจจัยในการเชื่อมในด้านการป้อนลวดเชื่อม พบว่าเมื่อมีการปรับค่าความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมให้มีความเร็วที่มากขึ้นจะส่งผลให้แนวเชื่อมมีลักษณะความกว้างที่มากขึ้น และมีแนวโน้มความลึกของแนวเชื่อมที่มากขึ้นเช่นเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาจากพื้นที่ A ของเนื้อโลหะที่มีการนูนสูงขึ้นจากโลหะฐานในพื้นที่ B ดังแสดงในรูปที่ 4.8

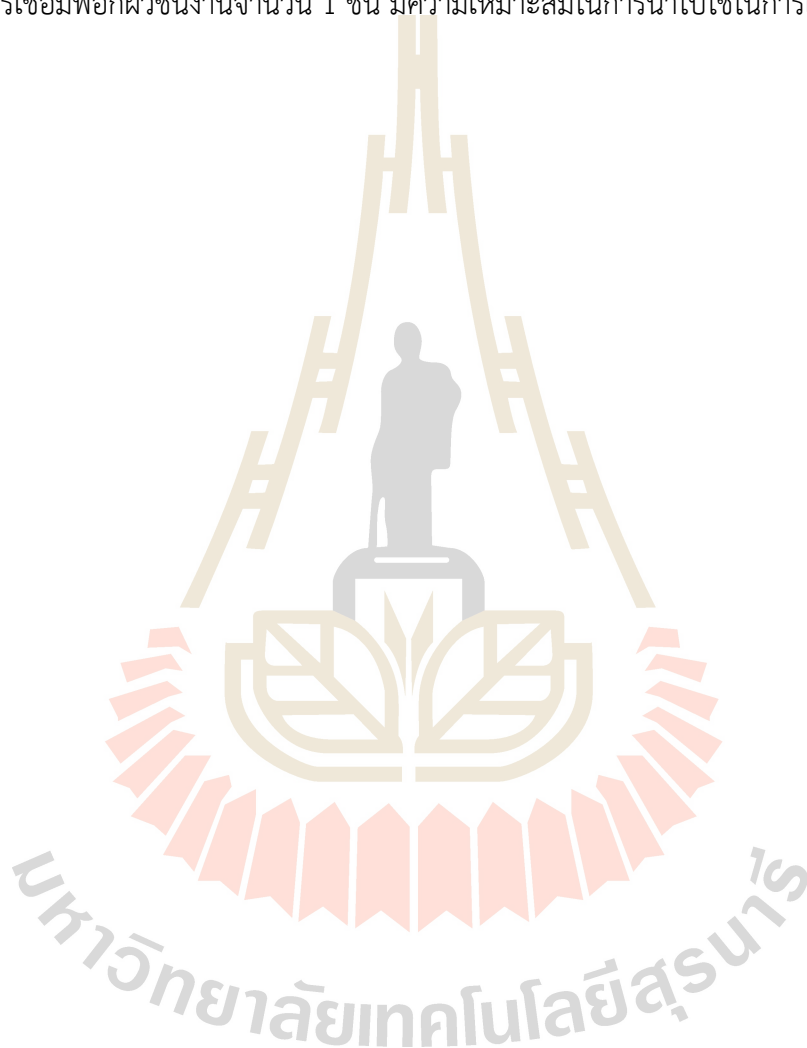


รูปที่ 4.8 พื้นที่ของแนวเชื่อม

ในกระบวนการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานควรมีความสูงของแนวเชื่อมที่มีความแบนราบไม่สูงจากโลหะฐานเนื่องจากในกระบวนการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานต้องการใช้เนื้อโลหะที่เชื่อมพอกครอบคลุมพื้นผิววัสดุเปรียบเสมือนเคลือบวัสดุเอาไว้เพื่อไม่ให้รูปร่างลักษณะของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงมากจนไป ดังนั้นในการทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม ควรเลือกใช้ค่าความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมที่ 1 เมตรต่อนาทีที่มีความเหมาะสม

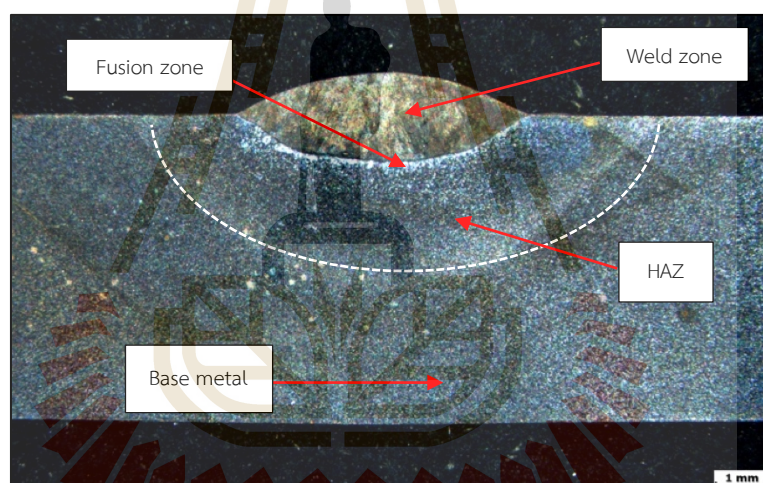
4. การทดลองการเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน (Hard facing)

จากการทดลองศึกษาเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงานที่มีการเชื่อมพอก 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น จากผลการศึกษาในการศึกษาโครงสร้างทางมหภาคพบว่าเมื่อทำการเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน 1 ชั้น จะทำให้ได้แนวเชื่อมที่ไม่มีข้อบกพร่องในชิ้นงาน กล่าวคือไม่มีการแตก (Crack) ของแนวเชื่อม รวมไปถึงการเชื่อมพอกชิ้นงาน 1 ชั้น ไม่ทำให้โลหะฐานของชิ้นงานเกิดการเสีรูปอีกด้วย ดังนั้นการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานจำนวน 1 ชั้น มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการเชื่อมพอกผิววัสดุ



4.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Investigation)

ในการตรวจสอบศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure Investigation) ของแนวเชื่อม (Weld metal) เมื่อทำการนำชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ที่มีความหยาบไปจนถึงเบอร์ที่มีความละเอียด ขัดขึ้นเงาด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตรและกัดกรดผิวหน้าชิ้นงาน แล้วจึงทำการนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่มีกำลังขยายสูง เพื่อตรวจสอบดูโครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมที่บริเวณต่าง ๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้าง โดยในการส่องโครงสร้างจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 บริเวณ ได้แก่ 1. บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal zone) 2. บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุโลหะฐาน (Fusion zone) 3. บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ) และ 4. บริเวณวัสดุโลหะฐานที่ใช้ในการเชื่อม (Base metal zone) ดังแสดงในรูป 4.9



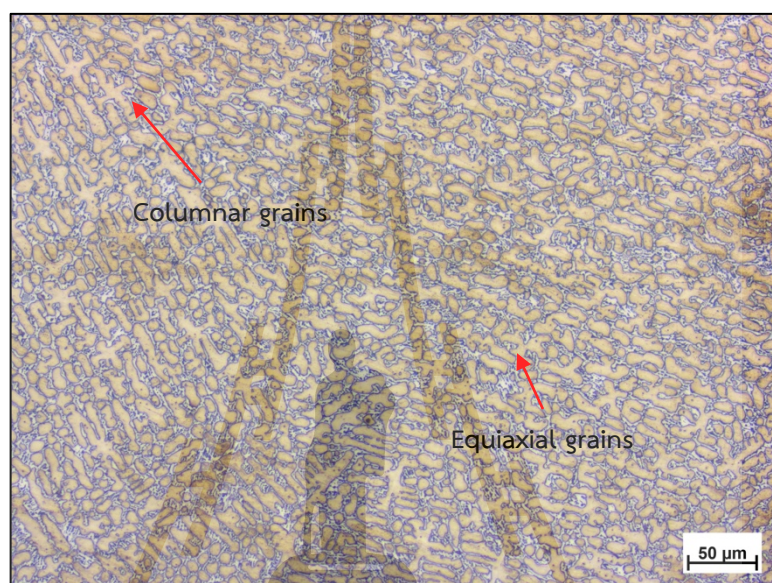
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างบริเวณในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน

4.2.1 ผลการทดลองการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

ในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะของโครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อม โดยมีการเลือกชิ้นงานที่มีความเหมาะสมในการนำมาทดลอง โดยพิจารณาจากลักษณะของแนวเชื่อมด้วยการตรวจสอบแบบ Visual Inspection ซึ่งคือชิ้นงานหมายเลข 14 ที่มีการใช้กระแสไฟในการเชื่อม 140 แอมแปร์ และกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม 130 แอมแปร์ การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานมีดังนี้

1. บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal zone)

ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) ของลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ SUPERWELDS DUR 65W ซึ่งเป็นลวดเชื่อมอัลลอย (Alloy) ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแบบอุ่นลวดร้อน (Hot wire TIG) สามารถแสดงได้ดังรูป 4.10



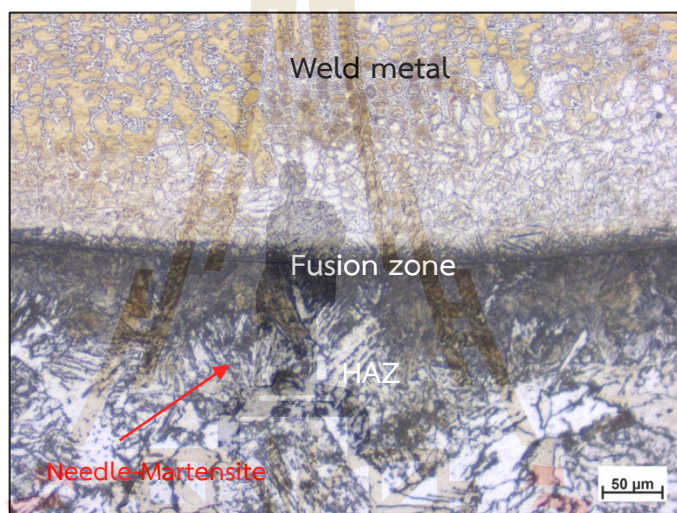
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal)

โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของชิ้นงานนี้มีลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งก้าน (The dendritic structure) ลักษณะของเกรนแบบเท่ากัน (Equiaxial grains) โดยที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีลักษณะการเรียงตัวของเกรนที่ขอบในรูปแบบเกรนแท่ง (Columnar grains) ซึ่งลักษณะของการเรียงตัวของโครงสร้างในลักษณะนี้เป็นการเรียงตัวของวัสดุโลหะ อัลลอยด์ (Alloy) ที่มีส่วนผสมหลายองค์ประกอบ (Multicomponent copper alloy) โครงสร้างในลักษณะนี้ให้คุณสมบัติในด้านความแข็งแรงที่สูง มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดี

โดยลวดเชื่อมที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมโครเมียมสูง (Cr 22.0%) ซึ่งเป็นลวดเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในงานเชื่อมพอกผิวชิ้นงานที่ต้องรับแรงกระแทกสูง (High abrasion) ชิ้นงานที่ต้องรับการเสียดสี (Friction) รับความร้อนสูง (Heat) และทนการกัดกร่อนสูง (Corrosion)

2. บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุโลหะฐาน (Fusion zone)

ในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคที่บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุโลหะฐาน (Fusion zone) จะสามารถสังเกตเห็นบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) และบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ซึ่งเป็นโลหะฐานวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 โดยจะมีรอยต่อของรอยเชื่อมและโลหะฐานเป็นบริเวณที่มีการหลอมละลายลวดกับวัสดุ (Fusion zone) แสดงได้ดังรูป 4.11

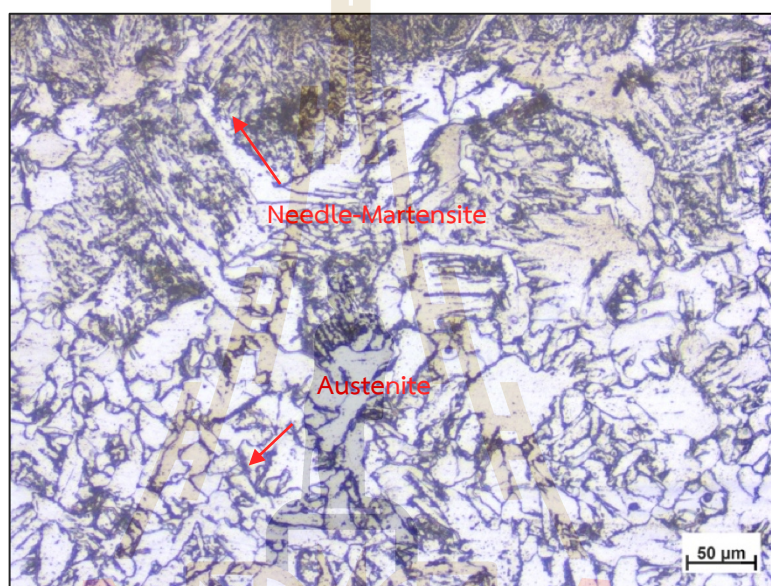


รูปที่ 4.11 โครงสร้างบริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุโลหะฐาน (Fusion zone)

โครงสร้างทางจุลภาคที่บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุโลหะฐาน (Fusion zone) จะสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของขนาดเกรนโลหะอย่างชัดเจน โดยที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) มีโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendritic structure) แตกออกเป็นกิ่งก้านจากขอบบริเวณติดกับ Fusion zone เกรนโลหะมีขนาดเล็กและละเอียดเมื่อเทียบกับบริเวณที่ไกลออกไป โดยเมื่อถัดออกไปจากบริเวณหลอมละลาย เกรนจะมีลักษณะใหญ่ขึ้นและเกรนเป็นแบบเท่ากัน (Equiaxial grains) โดยที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม มีลักษณะการเรียงตัวเกรนที่ขอบในรูปแบบเกรนแท่ง (Columnar grains) ในขณะที่บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected zone : HAZ) ที่เป็นโลหะฐานวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่อยู่ติดกับบริเวณหลอมละลายของลวดเชื่อม (Fusion zone) จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบมาร์เทนไซต์ที่เล็กละเอียด (Needle-Martensite) เนื่องจากได้รับความร้อนจากกระบวนการเชื่อมและเกิดการเจือจางของส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมเข้าสู่โลหะฐาน ส่งผลให้ในบริเวณนี้มีคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป

3. บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ)

ในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ) ซึ่งเป็นโลหะฐานวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 โดยเป็นบริเวณที่ใกล้กับรอยต่อของรอยเชื่อมและโลหะฐานเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อนจากมีการหลอมละลายลวดกับวัสดุ (Fusion zone) แสดงได้ดังรูป 4.12

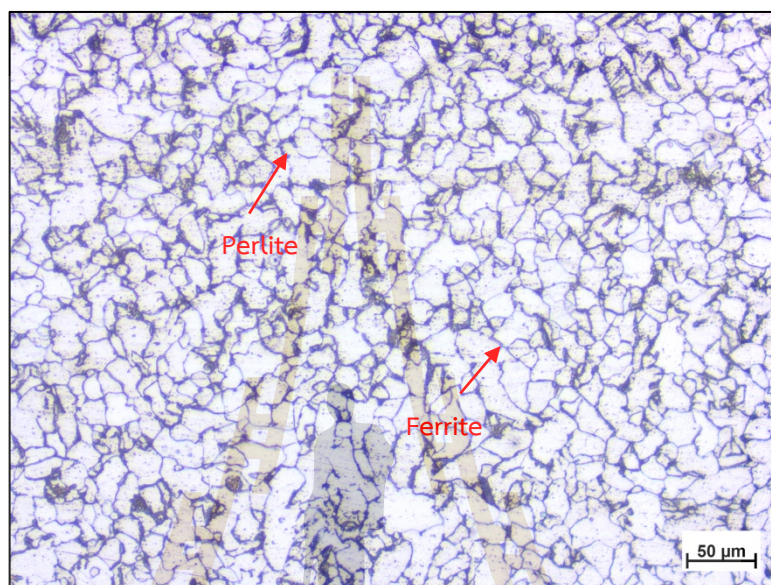


รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ)

โดยการศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาของบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ) ที่บริเวณใกล้กับบริเวณหลอมละลายของลวดเชื่อม (Fusion zone) จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบมาร์เทนไซต์ที่เล็กละเอียด (Needle-Martensite) เนื่องจากได้รับความร้อนจากกระบวนการเชื่อมสูง และเมื่อถัดลงมาจะมีโครงสร้างเป็นแบบออสเทนไนต์ (Austenite) คือมีลักษณะของเกรนที่เล็กและละเอียดมากขึ้น เนื่องจากได้รับความร้อนและการเย็นตัวของโลหะในบริเวณนี้จึงส่งผลให้เกรนมีขนาดที่ละเอียด และเมื่อถัดลงไปเป็นบริเวณเนื้อโลหะฐาน (Base metal) จะเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบความร้อนในการเชื่อมชิ้นงาน จึงทำให้โครงสร้างของโลหะฐานวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยา

4. บริเวณวัสดุโลหะฐานที่ใช้ในการเชื่อม (Base metal zone)

ในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคที่บริเวณวัสดุโลหะฐานที่ใช้ในการเชื่อม (Base metal zone) ซึ่งเป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 สามารถแสดงได้ดังรูป 4.13



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของโลหะฐาน (Base metal) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400



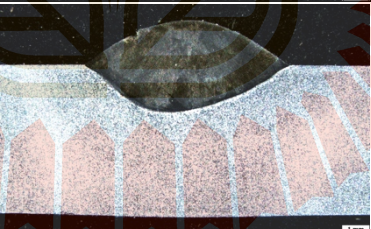



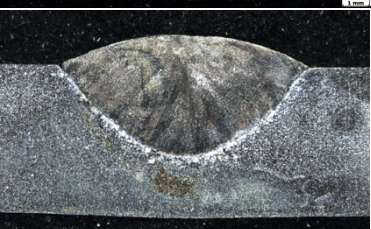
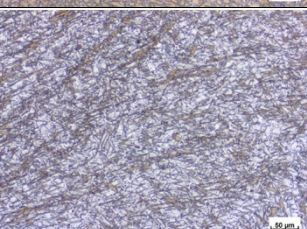
การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาของบริเวณโลหะฐาน (Base metal) วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 พบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลท์ (Pearlite) เนื่องจากที่บริเวณโลหะฐานนี้เป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 มีส่วนผสมทางเคมีเป็นคาร์บอนอยู่ที่ประมาณ 0.13% ถึง 0.18% ซึ่งมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.8% จึงถูกจัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำประเภทไฮโปยูเทกตอยด์ (Hypo-Eutectoid)

โดยในบริเวณโลหะฐาน (Base metal) วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 นี้ เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมชิ้นงาน ดังนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยาในบริเวณนี้

4.2.2 การศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค

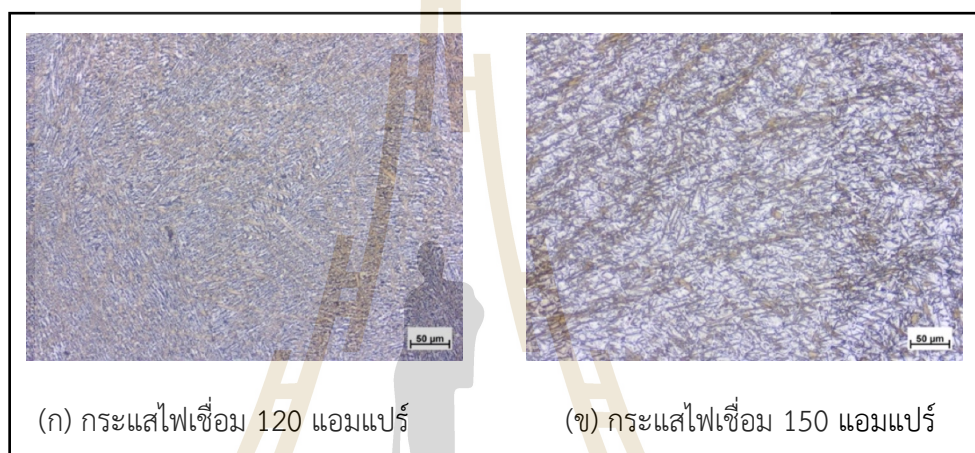
ในการศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมชิ้นงานที่แตกต่างกัน ซึ่งในการศึกษานี้ได้มีการเลือกชิ้นงานที่มีค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมคือ กระแสในการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไป และกำหนดค่ากระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมให้คงที่ ดังแสดงในตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงภาพโครงสร้างจุลภาคที่กระแสไฟเชื่อมต่างกัน

ชิ้นงาน	พารามิเตอร์ในการเชื่อม		ลักษณะแนวเชื่อม	โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal)
	กระแสเชื่อม (A)	กระแสอุ่นลวด (A)		
4	120	130		
9	130	130		
14	140	130		
19	150	130		

4.2.3 การวิเคราะห์การศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค

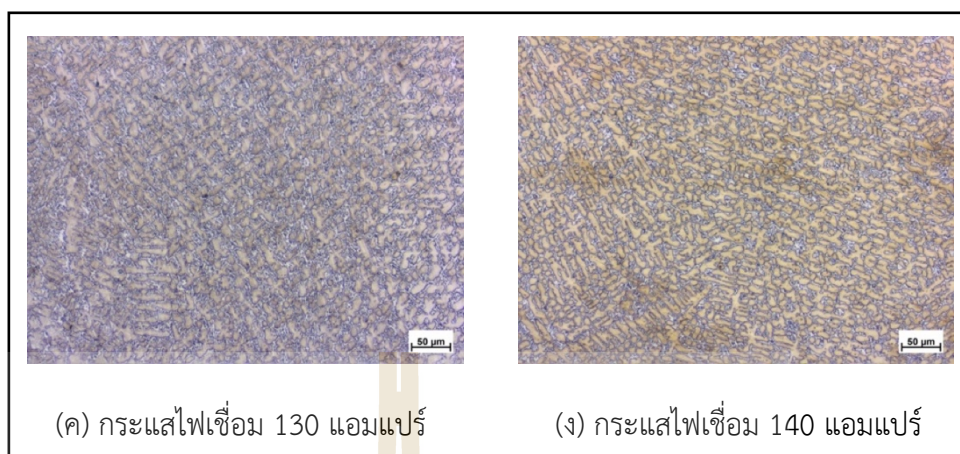
โดยจากตารางแสดงภาพโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานที่มีกระแสไฟเชื่อมในการเชื่อมที่ต่างกัน โดยมีการศึกษาโครงสร้างจากชิ้นงานที่ปรับค่ากระแสไฟในการเชื่อม 4 ค่า ได้แก่ 120 130 140 และ 150 แอมแปร์ และมีการคงที่ค่ากระแสไฟในการอุ่นลวดไว้ที่ 130 แอมแปร์ จากตารางจะพบว่าบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของชิ้นงานมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ได้ ดังนี้



รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) ของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟ (ก) 120 แอมแปร์ (ข) 150 แอมแปร์

โดยที่กระแสไฟเชื่อม 120 และ 150 แอมแปร์ มีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน โดยโครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120 แอมแปร์ (ก) จะมีลักษณะโครงสร้างเกรนโลหะที่เล็กและละเอียดมากกว่า โดยความแตกต่างของขนาดของเกรนโลหะจะส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 150 แอมแปร์ (ข) จะมีเกรนที่ใหญ่ มีลักษณะเหมือนซีม ซึ่งโครงสร้างทางโลหะวิทยาของเนื้อโลหะเชื่อมจะมีลักษณะเป็นเกรนขนาดเล็ก (Fine grains) และมีลักษณะเล็กแหลมคล้ายซีมที่มีรูปแบบเหมือนการสานตระกร้า ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างวิดแมนสแตทเทินเฟอร์ไรต์ (Widmanstätten Ferrite)

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับลักษณะโครงสร้างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟ 130 และ 140 แอมแปร์ ดังแสดงในภาพ 4.14 จะพบว่าลักษณะโครงสร้างมีความแตกต่างกัน เนื่องจากความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานและการเย็นตัวของเนื้อโลหะเชื่อมที่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างทางจุลภาบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) ของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟ (ค) 130 แอมแปร์ (ง) 140 แอมแปร์

โดยที่กระแสไฟเชื่อม 130 และ 140 แอมแปร์ มีโครงสร้างจุลภาคคล้ายกันคือ ที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของชิ้นงานนี้มีลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งก้าน (The dendritic structure) ลักษณะของเกรนแบบเท่ากัน (Equiaxial grains) โดยที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม มีลักษณะการเรียงตัวเกรนที่ขอบในรูปแบบเกรนแท่ง (Columnar grains) ซึ่งลักษณะของการเรียงตัวโครงสร้างในลักษณะนี้เป็นการเรียงของวัสดุโลหะ ทองแดงอัลลอยด์ที่มีส่วนผสมหลายองค์ประกอบ (Multicomponent copper alloy) โครงสร้างในลักษณะนี้ให้คุณสมบัติในด้านความแข็งแรงที่สูง

4.3 การวัดค่าความแข็งชิ้นงาน (Hardness testing)

การวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้ว เป็นการวัดเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมที่ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน โดยในการทดสอบวัดค่าความแข็งของชิ้นงานจะมีการทำการทดสอบ 2 วิธี ได้แก่

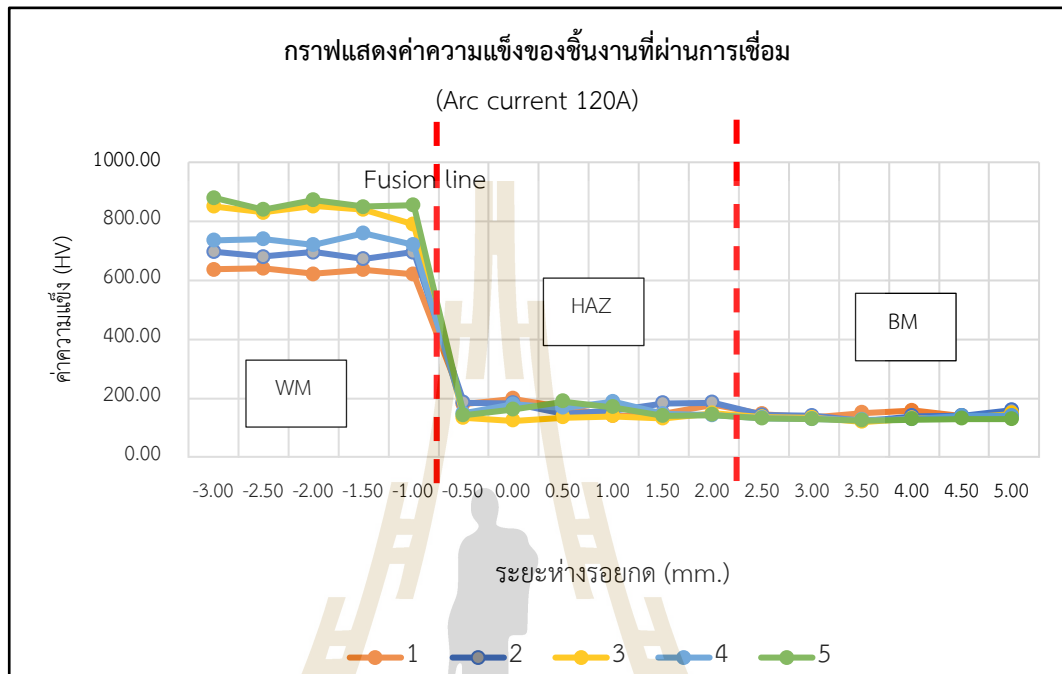
1. การวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers hardness test)
2. การวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test)

4.3.1 การวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers hardness test)

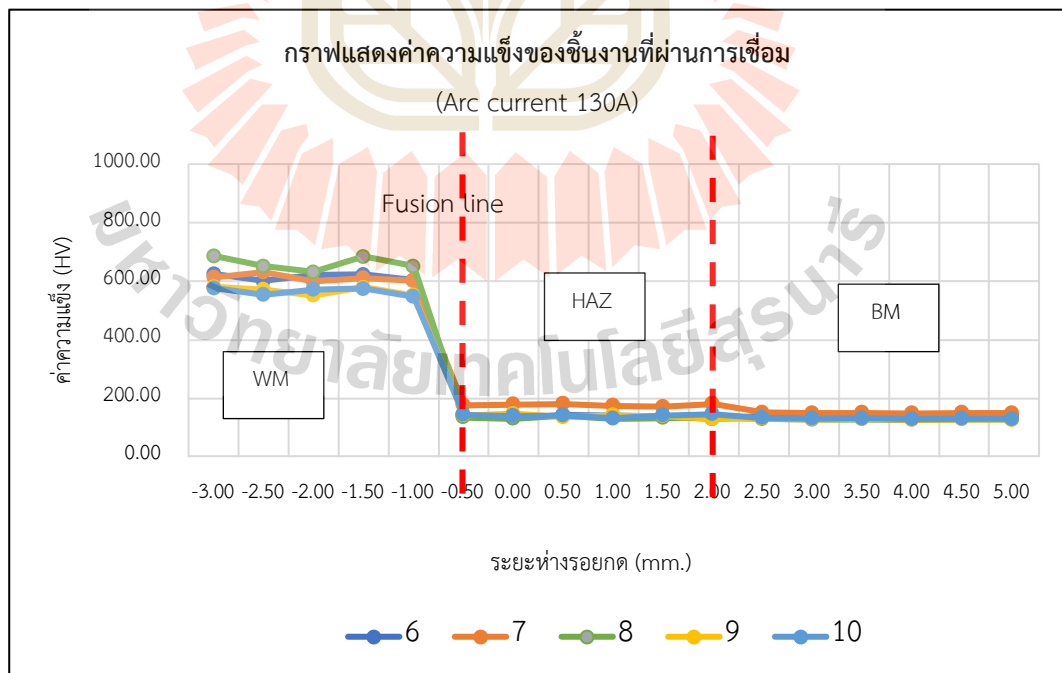
การทดสอบวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers hardness test) เป็นการวัดค่าคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 ที่ผ่านการเชื่อมแล้ว โดยการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์จะใช้วิธีการกดที่บริเวณแนวตั้งของรอยเชื่อมและชิ้นงาน โดยเริ่มจากบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะฐาน (Base metal) ซึ่งในแต่ละบริเวณที่ทำการทดสอบจะได้ค่าความแข็งที่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากในบริเวณกระทบร้อน (HAZ) เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากกระบวนการเชื่อม เกิดการเจือจางของส่วนผสมทางเคมีทั้งเนื้อโลหะเชื่อมและเนื้อโลหะฐานเข้าด้วยกัน โครงสร้างในบริเวณนี้จึงเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยในการวิเคราะห์ผลการวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ จะเป็นการตรวจสอบว่าค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมส่งผลต่อค่าความแข็งในแต่ละบริเวณอย่างไร และเป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความแข็งของแนวเชื่อมโดยแบ่งการศึกษาค่าพารามิเตอร์ตามการทดลอง ดังนี้

1. การทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด (Arc Current and Hot Wire Current)
2. การทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed)
3. การทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed)
4. การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน (Hard facing)

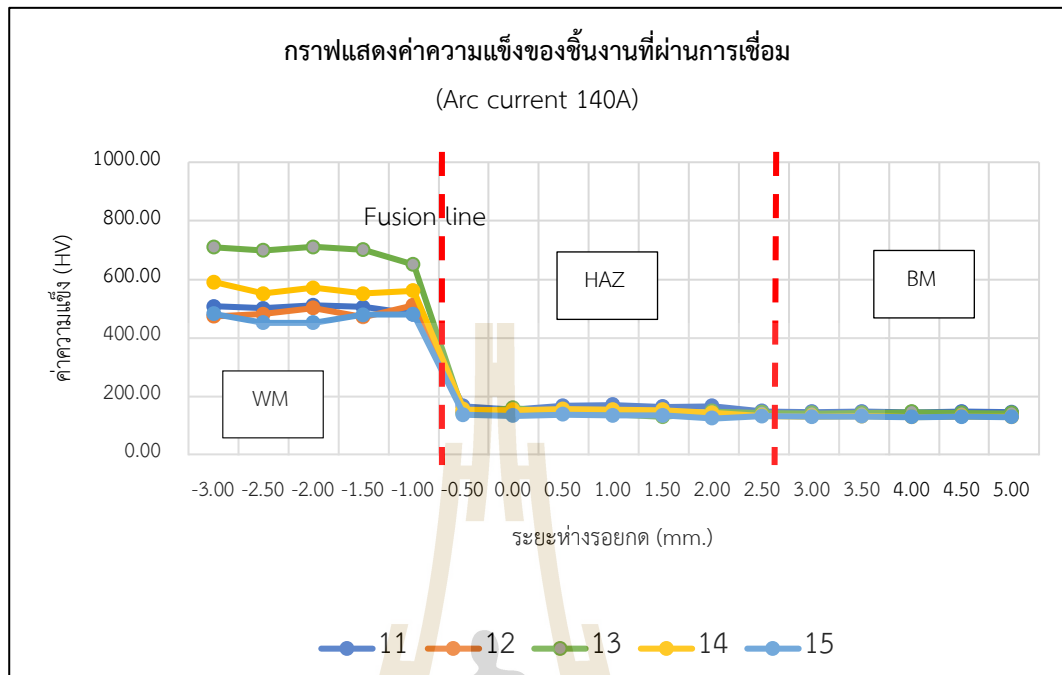
1. การทดลองกระแสไฟเชื่อมและการอุ่นลวด (Arc Current and Hot Wire Current)



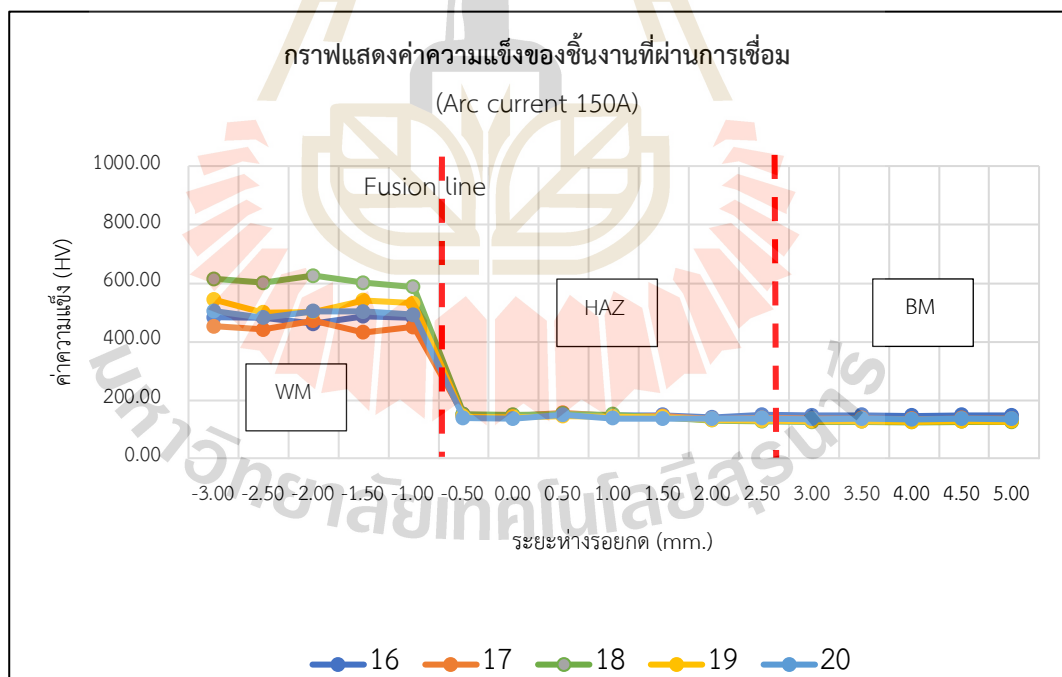
รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมกระแสเชื่อม 120A



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมกระแสเชื่อม 130A



รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมกระแสเชื่อม 140A



รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมกระแสเชื่อม 150A

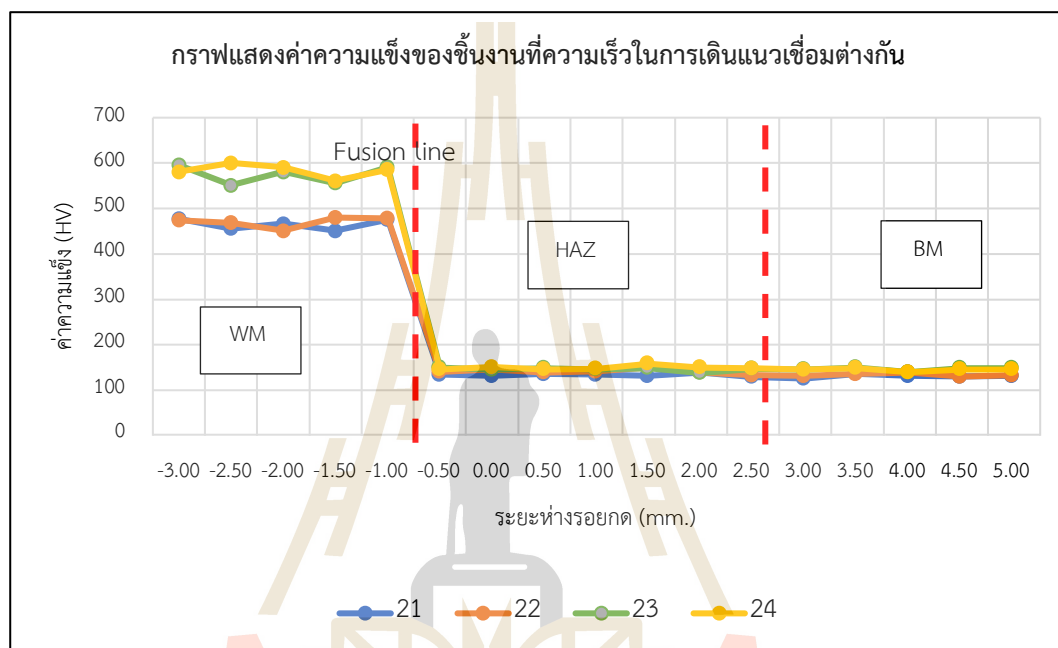
จากผลการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด (Arc Current and Hot Wire Current) จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าค่าความแข็งในแต่ละบริเวณที่มีการกดวัดค่าความแข็งมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) ให้ค่าความแข็งสูงที่สุด เนื่องจากเป็นวัสดุลวดเชื่อมที่มีค่าความแข็งสูง ในบริเวณกระทบร้อน (HAZ) เป็นบริเวณที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งรองลงมา ซึ่งในบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจนเกิดการผสมเนื้อโลหะเชื่อมและเนื้อโลหะฐานเข้าด้วยกัน และในบริเวณเนื้อโลหะฐาน (Base metal) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของกระบวนการเชื่อม จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาและไม่มีผลกระทบต่อความแข็ง ดังนั้นที่บริเวณนี้จึงมีค่าความแข็งน้อยที่สุด

โดยจากการปรับค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง พบว่าค่าความแข็งของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) ของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 120 แอมแปร์ ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมสูงที่สุด โดยค่าความแข็งที่สูงที่สุด คือ 880.00 HV ซึ่งเป็นชิ้นงานหมายเลขที่ 5 ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 120 แอมแปร์ กระแสอุ่นลวด 140 แอมแปร์ และเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสไฟในการเชื่อมมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยที่ลดน้อยลง โดยชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมที่มีค่าความแข็งน้อยที่สุดคือ ชิ้นงานหมายเลข 17 เป็นชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 150 แอมแปร์ และค่ากระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม 110 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าความแข็งที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเฉลี่ย 448.53 HV

โดยหากพิจารณาตัวแปรกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมที่แตกต่างกัน จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟในการอุ่นลวดไม่ได้ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ สิ่งส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานคือกระแสไฟในการเชื่อมชิ้นงานที่แตกต่างกัน หากกระแสไฟในการเชื่อมเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นงานลดลง

2. การทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed)

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากการปรับค่าพารามิเตอร์ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม โดยคงที่ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ตามตารางการทดลอง โดยได้ผลการวัดค่าความแข็ง แสดงได้ดังรูป 4.20

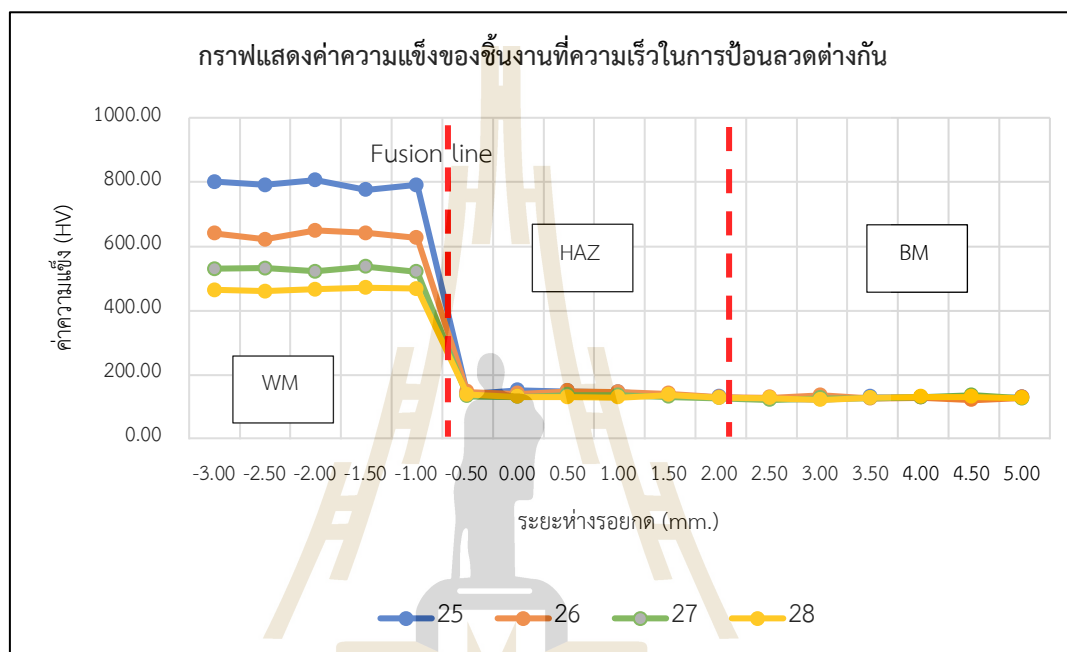


รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed) ต่างกัน จะพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) หมายเลข 24 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีความเร็วในการเดินแนวเชื่อมอยู่ที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที จะได้ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) เฉลี่ยสูงสุด คือ 583.40 HV เนื่องจากความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่สูงขึ้น มีผลต่อระยะเวลาที่ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานน้อยลง ซึ่งความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานมีผลต่อขนาดของเกรนโลหะในโครงสร้างทางโลหะวิทยา หากชิ้นงานได้รับความร้อนมากเป็นเวลานาน จะส่งผลให้เกรนโลหะเกิดการขยายตัวและมีค่าความแข็งที่ลดลง ซึ่งชิ้นงานที่ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมน้อยที่สุดคือชิ้นงานหมายเลขที่ 21 ซึ่งมีค่าความเร็วในการเดินแนวเชื่อมน้อยที่สุดคือ 70 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) อยู่ที่ 464.70 HV ดังนั้นความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่มากจะส่งผลให้เนื้อโลหะเชื่อมจะมีความแข็งที่สูงขึ้น แต่หากความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ จะส่งผลให้เนื้อโลหะเชื่อมมีค่าความแข็งที่ลดลง

3. การทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed)

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากการปรับค่าพารามิเตอร์ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed) โดยได้ผลการวัดค่าความแข็ง แสดงได้ดังรูป 4.21

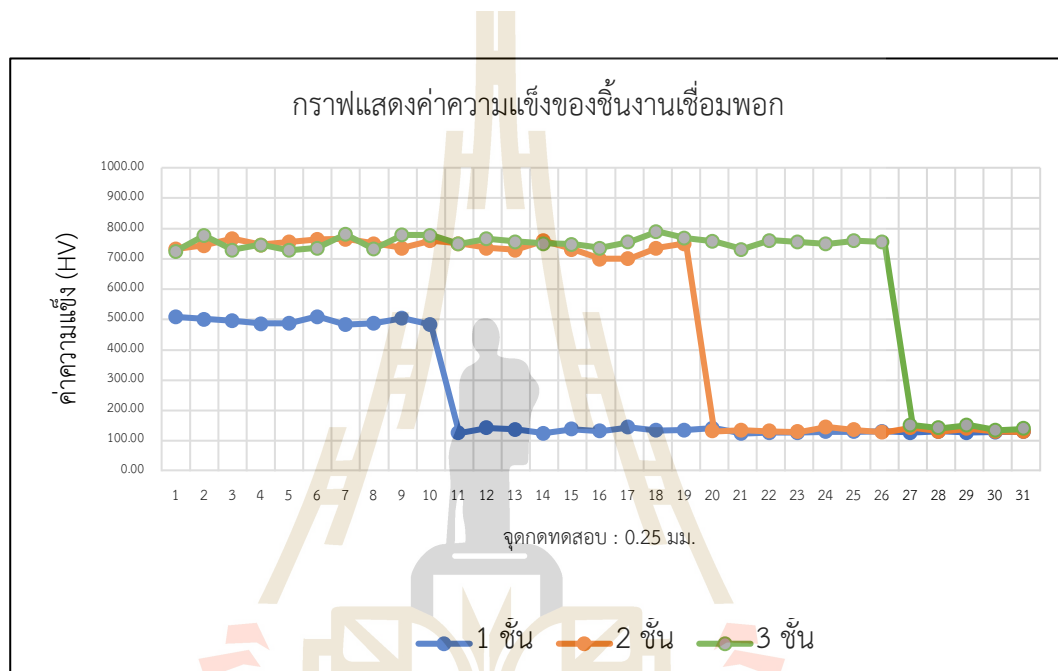


รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ความเร็วในการป้อนลวดต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม ที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 ค่า พบว่าชิ้นงานที่ 25 ซึ่งมีค่าความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม 0.5 เมตรต่อนาทีจะให้ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมสูงที่สุด คือ 792.46 HV และชิ้นงานที่ 28 ซึ่งมีค่าความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมสูงที่สุดคือ 2 เมตรต่อนาที ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม น้อยที่สุดคือ 464.63 HV โดยจากผลการทดสอบสามารถสังเกตได้ว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อทำการเพิ่มความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม จะส่งผลให้ค่าความแข็งของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีค่าที่ลดลง เนื่องจากในขณะที่ทำการเชื่อมชิ้นงานจะมีการป้อนลวดเชื่อมเข้าสู่บ่อหลอม โดยความเร็วในการป้อนลวดส่งผลต่อปริมาณเนื้อโลหะเชื่อมที่ได้รับการหลอมละลายเป็นแนวเชื่อม ยิ่งปริมาณเนื้อโลหะเกิดการหลอมละลายมากขึ้น จึงส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นที่บริเวณแนวเชื่อมสูงขึ้นและมีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลง โดยความเร็วในการเย็นตัวของแนวเชื่อมมีผลต่อขนาดของเกรนโลหะและจึงส่งผลให้ค่าความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อม กล่าวคือหากแนวเชื่อมมีความร้อนที่อยู่ในเนื้อโลหะมากจะเกิดการเย็นตัวที่ช้าลงและส่งผลให้เกรนโลหะเกิดการขยายตัว จึงส่งผลให้แนวเชื่อมมีค่าความแข็งที่น้อยลง

4. การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นงาน (Hard facing)

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบเปรียบเทียบค่าความแข็งของชั้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอก 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น เพื่อตรวจสอบว่าการเชื่อมพอกที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกันจะให้ค่าความแข็งที่เหมาะสมมากที่สุดในการเชื่อมซ่อมมีดสับอ้อยในอุตสาหกรรมโดยสามารถแสดงค่าการวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ แสดงได้ดังรูป 4.22



รูปที่ 4.22 ค่าความแข็งของชั้นงานเชื่อมพอก

จากการทดลองพบว่าในกระบวนการการเชื่อมพอก 1 ชั้น จะให้ชั้นงานเชื่อมที่มีค่าความแข็งที่น้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) อยู่ที่ 493.85 HV และชั้นงานที่มีการเชื่อมพอกจำนวน 2 และ 3 ชั้น จะได้ชั้นงานที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งใกล้เคียงกันคือ 751.58 HV และ 750.81 HV ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นงานเป็นการเชื่อมเพื่อให้เนื้อโลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลายและเคลือบพอกพื้นผิวของโลหะฐาน โดยใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติของเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมพอกไป ให้สามารถรับแรงกระแทกหรือต้านทานการสึกหรอจากการใช้งานได้มากกว่าเนื้อโลหะฐานของชั้นงาน ดังนั้นจำนวนชั้นเชื่อมพอกผิวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เมื่อวัดค่าความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมจะเป็นค่าความแข็งของวัสดุเติมที่ได้ทำการเชื่อมพอกลงไป ในขณะที่เดียวกันเมื่อมีการเชื่อมพอกผิวชั้นงาน 1 ชั้น เนื้อโลหะที่เชื่อมพอกลงไปพื้นผิวชั้นงานจะเป็นชั้นเชื่อมที่ไม่หนามากนัก รวมไปถึงเมื่อมีการเชื่อมพอกผิวชั้นงานจะเกิดการหลอมละลายเนื้อโลหะเชื่อมและเนื้อโลหะฐานเข้าด้วยกัน จึงส่งผลให้เมื่อทำการวัดค่าความแข็งของชั้นงานเชื่อมพอก 1 ชั้นจะมีค่าความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมที่น้อยกว่า

4.3.2 การวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test)

การวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์จะทำการตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานที่บริเวณเนื้อของรอยเชื่อม (Weld metal) โดยใช้หัวกดเพชร (HRC) แรงรอง (Minor load) 10 kgf แรงหลัก (Major load) 150 kgf และใช้เวลากด (Dwell time) 3.0 วินาที การทดสอบจะทำการกดตามแนวเชื่อมเพื่อตรวจสอบค่าความแข็งตามการทดลอง ดังนี้

1. การทดลองปรับกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด (Arc Current and Hot Wire Current)

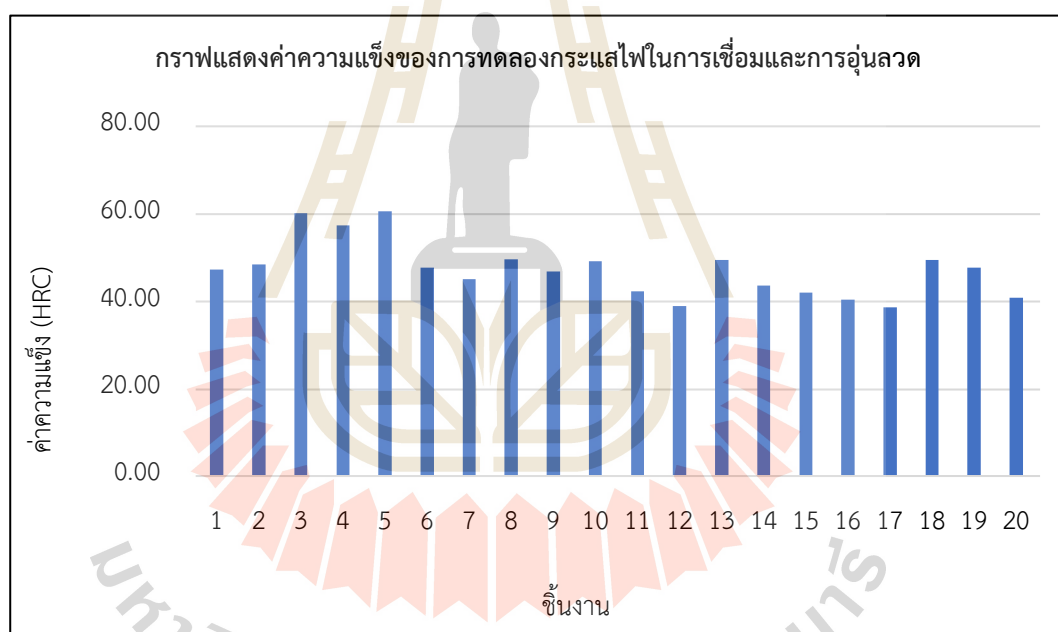
การวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์จะทำการตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานที่บริเวณเนื้อของรอยเชื่อมในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม เพื่อทำการตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมที่ค่าพารามิเตอร์ต่างกัน โดยจะทำการวัดค่าทั้งหมด 3 ครั้ง และทำการเฉลี่ยค่าความแข็งของชิ้นงานได้ผลการวัดค่าความแข็งแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

ชิ้นงาน	ผลการวัดค่าความแข็ง (HRC)			ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	49.10	44.30	48.30	47.23
2	47.70	48.70	49.00	48.47
3	59.90	60.10	60.30	60.10
4	57.80	59.00	55.30	57.37
5	61.30	60.50	60.68	60.50
6	47.40	48.50	47.20	47.70
7	47.30	45.30	42.50	45.03
8	48.50	50.20	50.20	49.63
9	46.60	45.80	48.10	46.83
10	48.90	48.40	49.90	49.07
11	41.70	42.40	42.80	42.30
12	38.40	39.80	38.40	38.87
13	48.40	50.90	48.90	49.40
14	43.40	43.90	43.50	43.60
15	42.70	40.60	42.60	41.97

ชิ้นงาน	ผลการวัดค่าความแข็ง (HRC)			ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
16	40.60	40.60	39.80	40.33
17	39.00	38.20	38.50	38.57
18	48.80	49.50	50.00	49.43
19	47.80	48.10	47.20	47.70
20	41.50	39.80	41.10	40.80

จากตารางสามารถนำผลเฉลี่ยของการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานมาทำการนำเสนอในรูปแบบกราฟแท่งเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานได้ ดังนี้



รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ที่การทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

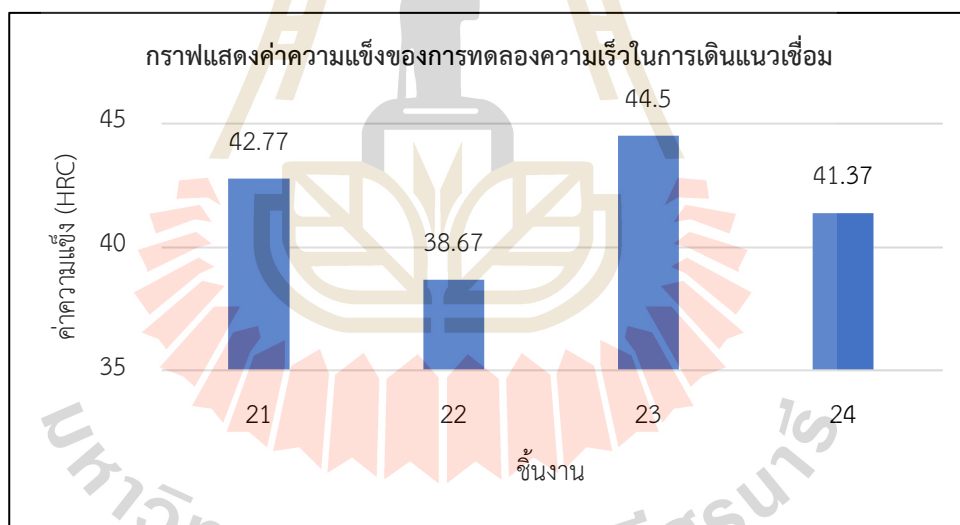
จากรูป 4.23 แสดงผลการวัดค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) ของชิ้นงาน ด้วยกระบวนการทดสอบค่าความแข็งร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test) ในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม จะสามารถสังเกตได้ว่าชิ้นงานที่ได้ค่าเฉลี่ยความแข็งชิ้นงานสูงที่สุดคือชิ้นงานหมายเลข 5 มีค่าความแข็ง เฉลี่ย 60.50 HRC และชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมน้อยที่สุดคือชิ้นงานหมายเลข 17 มีค่าความแข็งคือ 38.57 HRC ซึ่งผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

2. การทดลองปรับความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed)

ในการตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมในการทดลองปัจจัยด้านความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ด้วยวิธีการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test) ได้ผลการวัดค่าความแข็งชิ้นงาน แสดงได้ในตาราง 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ในการทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

ชิ้นงาน	ผลการวัดค่าความแข็ง (HRC)			ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
21	41.20	43.20	43.90	42.77
22	39.60	36.60	39.80	38.67
23	45.50	46.80	41.20	44.50
24	41.30	41.50	41.30	41.37



รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ของชิ้นงานที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่างกัน

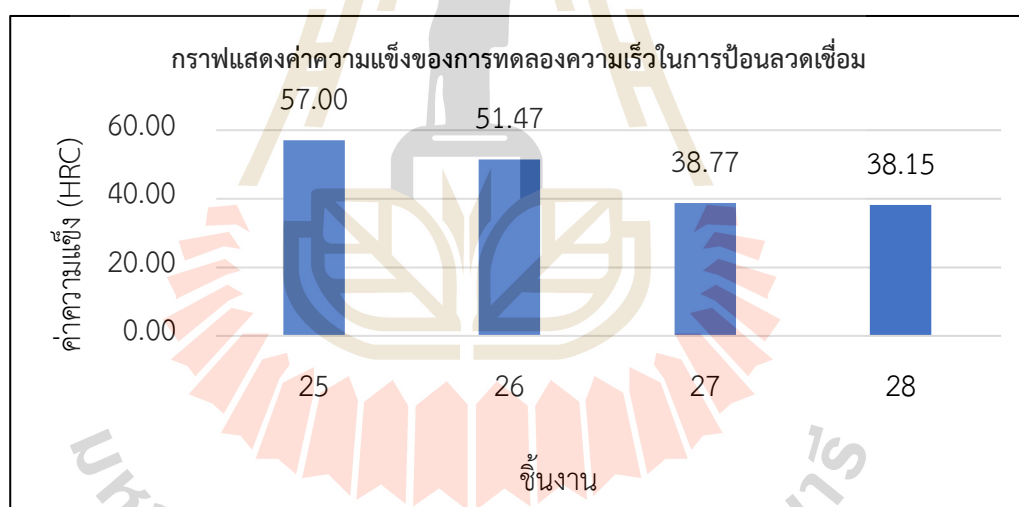
จากรูป 4.24 แสดงผลการวัดค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) ของชิ้นงาน ด้วยกระบวนการทดสอบค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test) ในการทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed) พบว่าชิ้นงานที่ได้ค่าความแข็งสูงที่สุด คือ ชิ้นงานหมายเลข 23 ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม คือ 44.5 HRC และชิ้นงานที่ได้ค่าความแข็งน้อยที่สุด คือ ชิ้นงานหมายเลข 22 มีค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม คือ 38.67 HRC ซึ่งผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

3. การทดลองปรับความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed)

การตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมในการทดลองปัจจัยด้านความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม ด้วยวิธีการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test) ได้ผลการวัดค่าความแข็งชิ้นงาน แสดงได้ในตาราง 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ในการทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม

ชิ้นงาน	ผลการวัดค่าความแข็ง (HRC)			ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
25	56.10	57.20	57.70	57.00
26	51.80	50.90	51.70	51.47
27	39.10	38.40	38.80	38.77
28	38.25	38.10	38.10	38.15



รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ของชิ้นงานที่การทดลองการป้อนลวดเชื่อม

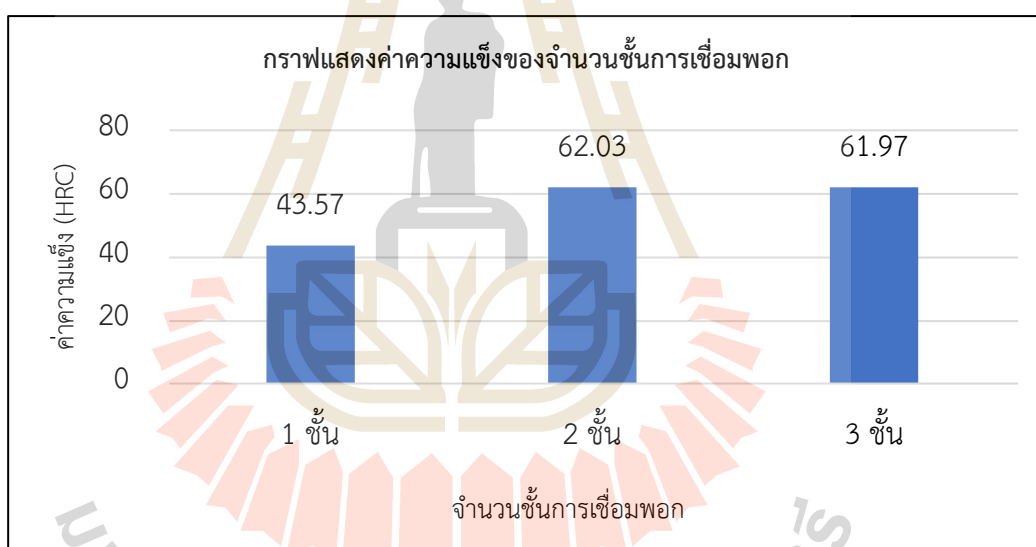
โดยจากรูป 4.25 แสดงผลการวัดค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) ของชิ้นงาน ด้วยกระบวนการทดสอบค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test) ในการทดลองความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed) พบว่าชิ้นงานที่ได้ค่าความแข็งสูงที่สุด คือ ชิ้นงานหมายเลข 25 ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม คือ 57.00 HRC และชิ้นงานที่ได้ค่าความแข็งน้อยที่สุด คือ ชิ้นงานหมายเลข 28 มีค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม คือ 38.15 HRC ซึ่งผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบวัดค่าความแข็งไมโครวิกเกอร์

4. การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน (Hard facing)

การตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกจำนวน 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน ด้วยวิธีการทดสอบวัดค่าความแข็งของชิ้นงานแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test) ได้ผลการวัดค่าความแข็งชิ้นงาน โดยในการทดสอบจะวัดค่าความแข็งของชิ้นงานเป็นจำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยความแข็งปริมาณเนื้อโลหะเชื่อม แสดงผลได้ในตาราง 4.9

ตารางที่ 4.9 ตารางค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน

ชิ้นงาน	ผลการวัดค่าความแข็ง (HRC)			ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
29	42.20	44.50	44.00	43.57
30	62.1	61.8	62.2	62.03
31	61.80	62.10	62.00	61.97



รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ของชิ้นงานที่การทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน

โดยจากรูป 4.26 แสดงผลการวัดค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) ของชิ้นงาน ด้วยกระบวนการทดสอบค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test) ในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน (Hard facing) จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าผลการวัดค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม 2 และ 3 ชั้น ได้ค่าเฉลี่ยความแข็งที่ใกล้เคียงกัน คือ 62.03 และ 61.97 HRC ตามลำดับ แล้วจึงตามมาด้วยชิ้นงานที่ผ่านการวัดค่าความแข็งแบบ 1 ชั้น ได้ค่า 43.57 HRC ตามลำดับ ซึ่งได้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

4.4 การศึกษาการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

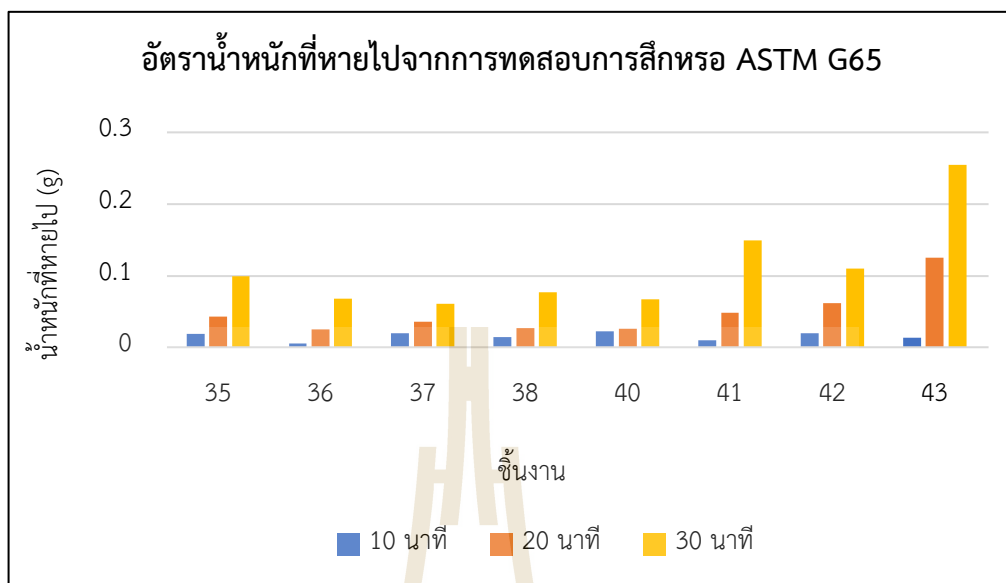
ในกระบวนการทดสอบเพื่อศึกษาความต้านทานการสึกหรอจากการเสียดสีของชิ้นงานในรูปแบบถูครูด (Abrasive ware) โดยการใช้กระบวนการทดสอบ Abrasion test ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G65 ของชิ้นงานด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (TIG hot wire) ซึ่งในการทดลองมีการระบุใช้ข้อกำหนดมาตรฐาน Specified Procedure A โดยพิจารณาความต้านทานจากน้ำหนักของชิ้นงานที่สูญเสียไป ในการทดลองจะทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 15 x 40x5 มิลลิเมตร [23] และทำการนำชิ้นงานที่ตัดไปซึ่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลจุดทศนิยม 4 ตำแหน่ง หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทดสอบเป็นระยะเวลา 10 นาที 20 นาที และ 30 นาที โดยหลังการทดสอบทุกครั้งจะทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานเพื่อตรวจสอบน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) ของชิ้นงาน แล้วจึงทำการบันทึกผลน้ำหนักที่หายไป

โดยในการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM G65 จะมีการเลือกตรวจสอบจากชิ้นงานแนวเชื่อมที่มีลักษณะแนวเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพิจารณาจากลักษณะของแนวเชื่อมด้วยการตรวจสอบแบบ Visual Inspection โดยจะมีชิ้นงานที่ปรับค่าพารามิเตอร์กระแสไฟในการเชื่อมและกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม เพื่อใช้ในการทดสอบการสึกหรอทั้งหมด 8 ชิ้น และชิ้นงานที่ทำการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้น โดยผลการทดสอบมีดังนี้

4.4.1 การทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานปรับตัวแปรเชื่อม

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานปรับตัวแปรเชื่อม

ชิ้นงาน	ตัวแปร		น้ำหนักก่อนทดลอง (g)	น้ำหนักหลังทดลอง (g)			น้ำหนักที่หายไป (g)		
	กระแสเชื่อม (A)	กระแสอุ่นลวด (A)		10 นาที	20 นาที	30 นาที	10 นาที	20 นาที	30 นาที
35	140	130	39.7850	39.7660	39.7420	39.6863	0.0190	0.0430	0.0987
36	120	130	38.8650	38.8600	38.8400	38.7968	0.0050	0.0250	0.0682
37	130	130	39.1850	39.1650	39.1490	39.1246	0.0200	0.0360	0.0604
38	150	130	35.9670	35.9530	35.9400	35.8901	0.0140	0.0270	0.0769
40	140	100	37.7240	37.7020	37.6980	37.6571	0.0220	0.0260	0.0669
41	140	110	38.3550	38.3455	38.3065	38.2054	0.0095	0.0485	0.1496
42	140	120	29.6050	29.5850	29.5430	29.4952	0.0200	0.0620	0.1098
43	140	140	38.5550	38.5420	38.4300	38.3000	0.0130	0.1250	0.2550



รูปที่ 4.27 อัตราน้ำหนัที่หายไปจากการทดสอบการสึกหรอ ASTM G65

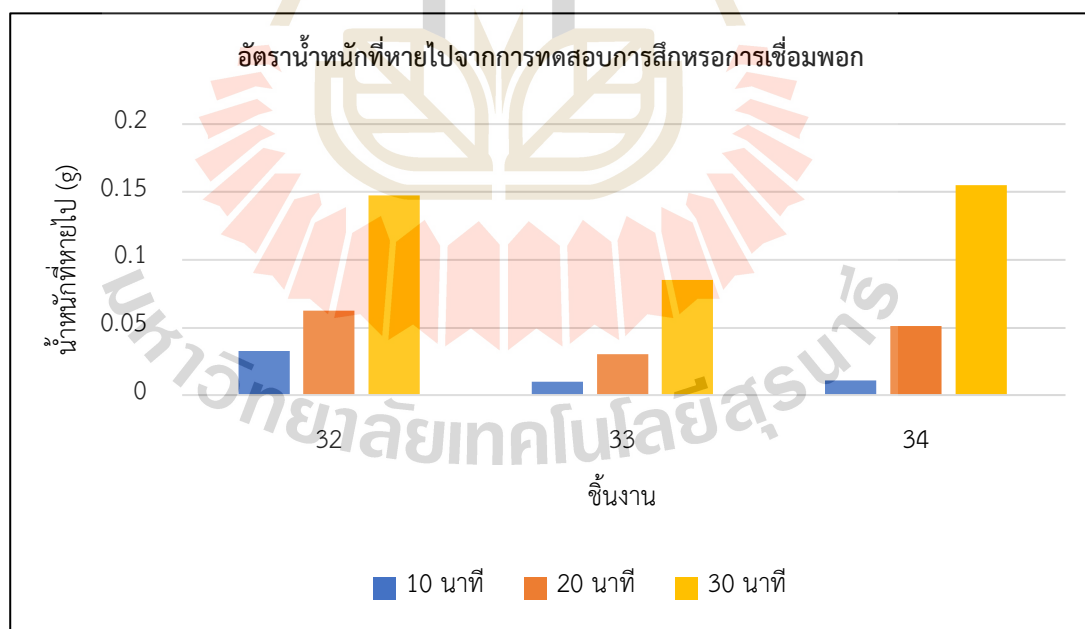
จากรูปที่ 4.27 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 ของชิ้นงานเชื่อมที่มีการปรับค่าตัวแปรเพื่อศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟในการเชื่อมชิ้นงานและกระแสไฟในการอุ่นลดเชื่อมชิ้นงาน พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) จากการทดสอบชิ้นงานหมายเลขที่ 43 ซึ่งมีค่าตัวแปรในการเชื่อม คือ กระแสไฟในการเชื่อม 140 แอมแปร์ กระแสไฟในการอุ่นลดเชื่อม 140 แอมแปร์ เป็นชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอมากที่สุด โดยเมื่อทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 30 นาที ชิ้นงานมีน้ำหนักที่หายไป 0.2550 กรัม เนื่องจากการใช้กระแสไฟในการเชื่อมและกระแสไฟในการอุ่นลดเชื่อมที่สูง จึงส่งผลให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมมีการขยายตัวจากความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน ส่งผลให้แนวเชื่อมของชิ้นงานมีค่าความแข็งที่ลดลง และเกิดอัตราการสึกหรอมากขึ้นจากน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน ในขณะที่ชิ้นงานหมายเลข 37 ซึ่งมีค่าตัวแปรในการเชื่อม คือ กระแสไฟในการเชื่อม 130 แอมแปร์ กระแสไฟในการอุ่นลดเชื่อม 130 แอมแปร์ เป็นชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอน้อยที่สุด โดยเมื่อทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 30 นาที ชิ้นงานมีน้ำหนักที่หายไป 0.2550 กรัม โดยเนื่องจากเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างทางโลหะวิทยาและค่าความแข็งของชิ้นงานในการทดลองก่อนหน้า พบว่าชิ้นงานที่ค่าตัวแปรนี้ เป็นชิ้นงานที่มีโครงสร้างในรูปแบบเดนไดรต์ (Dendritic structure) ลักษณะของเกรนแบบเท่ากัน (Equiaxial grains) และมีการเรียงตัวเกรนที่ขอบในรูปแบบเกรนแท่ง (Columnar grains) ซึ่งโครงสร้างนี้ทำให้โลหะมีค่าความแข็งที่สูงและมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้มากขึ้น

4.4.2 การทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมพอก

ในการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G6 ของชิ้นงานเชื่อมพอกผิว 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ได้มีการนำชิ้นงานไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอของล้อย่างทรายแห้งเป็นระยะเวลา 10 นาที 20 นาที และ 30 นาที โดยหลังการทดสอบทุกครั้งจะทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานเพื่อตรวจสอบน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) ของชิ้นงาน โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังตาราง 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมพอก

ชิ้นงาน	เชื่อมพอก	น้ำหนักก่อนทดลอง (g)	น้ำหนักหลังทดลอง (g)			น้ำหนักที่หายไป (g)		
			10 นาที	20 นาที	30 นาที	10 นาที	20 นาที	30 นาที
32	1 ชั้น	32.7825	32.7500	32.7200	32.6350	0.0325	0.0625	0.1475
33	2 ชั้น	50.1250	50.1150	50.0950	50.0400	0.0100	0.0300	0.0850
34	3 ชั้น	56.6110	56.6000	56.5600	56.4559	0.0110	0.0510	0.1551



รูปที่ 4.28 อัตราน้ำหนักที่หายไปจากการทดสอบการสึกหรอชิ้นงานเชื่อมพอก

จากรูปที่ 4.28 ในการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM G65 ของชิ้นงานที่มีการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานเป็นจำนวน 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น จากการทดสอบพบว่าชิ้นงานหมายเลข 34 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานจำนวน 3 ชั้น เป็นชิ้นงานที่มีค่าอัตราน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) สูงที่สุด โดยเมื่อทำการทดสอบ 30 นาที น้ำหนักที่หายไป คือ 0.1551 กรัม เนื่องจากเมื่อทำการเชื่อมพอกเป็นจำนวน 3 ชั้น บริเวณพื้นผิวของแนวเชื่อมและโลหะฐานของชิ้นงานจะได้รับอิทธิพลความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานอย่างมาก ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งที่ลดลง อีกทั้งความแข็งของวัสดุลวดเชื่อมที่ทำการเชื่อมมีความแตกต่างกับเนื้อโลหะฐาน โดยวัสดุของลวดเชื่อมที่นำมาใช้ในการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานเป็นลวดเชื่อมที่มีค่าความแข็งและความเปราะสูงมากกว่าโลหะฐานที่เป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 ที่มีความเหนียว (Ductile) มากกว่า ดังนั้นเมื่อแนวเชื่อมพอกจำนวน 3 ชั้น เกิดการเย็นตัวจะส่งผลให้แนวเชื่อมเกิดการหดตัว (Shrinkage) อย่างรุนแรง จึงเกิดการข้อบกพร่องในชิ้นงานหรือเกิดการแตกที่แนวเชื่อมชิ้นงาน ซึ่งไม่เหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเชื่อมพอกผิวชิ้นงาน

ในการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอก 1 ชั้น เป็นชิ้นงานที่มีอัตราน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) รองลงมา โดยเมื่อทำการทดสอบผ่านไป 30 นาที น้ำหนักที่หายไป คือ 0.1475 กรัม โดยการเชื่อมพอกผิว 1 ชั้นเป็นการเชื่อมพอกที่ในปัจจุบันมีการใช้งานเพื่อเชื่อมซ่อมมีดสับอ้อย เนื่องจากการเชื่อมพอก 1 ชั้นใช้เวลาในการเชื่อมที่ไม่นาน ประหยัดต้นทุนในการใช้ลวดเชื่อมเพื่อนำมาเชื่อมพอกชิ้นงาน และสามารถเพิ่มค่าความแข็งของชิ้นงานได้ แต่การเชื่อมพอกผิว 1 ชั้นจะส่งผลให้ความหนาของแนวเชื่อมพอกที่เกิดขึ้นยังไม่เพียงพอต่อความสึกหรอที่เกิดขึ้น

ในขณะที่เดียวกันชิ้นงานหมายเลข 33 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีการเชื่อมพอก 2 ชั้น เป็นชิ้นงานที่มีการต้านทานการสึกหรอได้มากที่สุด เนื่องจากผลการทดสอบมีอัตราน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) ที่น้อยที่สุด คือ 0.0850 กรัม เนื่องจากในกระบวนการเชื่อมพอกเป็นกระบวนการที่ทำให้เนื้อโลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลายพอกเคลือบพื้นผิวชิ้นงานไว้ เมื่อทำการเชื่อมพอกชิ้นงานเป็นจำนวน 2 ชั้น จะช่วยให้มีความหนาของเนื้อโลหะลวดเชื่อมมากเพียงพอ เกิดการปกคลุมพื้นผิวของโลหะฐานทั้งหมด เมื่อทำการทดสอบวัดค่าความแข็งของชิ้นงานในรูปแบบต่าง ๆ ชิ้นงานที่มีการเชื่อมพอกผิว 2 ชั้น จึงมีค่าความแข็งสูงที่สุด และมีค่าการต้านทานการสึกหรอมากที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมซ่อมมีดฟันอ้อยด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (Hot wire TIG) เพื่อทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างโลหะวิทยา ทั้งโครงสร้างทางมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) รวมไปถึงคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของแนวเชื่อม โดยการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานและการทดสอบอัตราการสึกหรอของชิ้นงาน เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเชื่อมซ่อมมีดฟันอ้อยที่ทำจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด SS400 โดยจากการศึกษาวิจัยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

5.1.1 การศึกษาโครงสร้างทางมหภาค (Macro structure)

ในการศึกษาโครงสร้างทางมหภาค (Macro structure) ของแนวเชื่อม เมื่อเพิ่มกระแสไฟในการเชื่อม (Arc current) มากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดความกว้างและมีความลึกของแนวเชื่อมของแนวเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น รวมไปถึงส่งผลให้ความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) และเกิดการเจือจาง (Dilution) ที่มากขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Travel speed) เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของแนวเชื่อมมีความกว้างและความลึกลดลง แต่จะส่งผลให้ความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานและอัตราเจือจางของแนวเชื่อมลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วการป้อนลวดเชื่อม (Wire feeding speed) จะส่งผลให้แนวเชื่อมมีลักษณะความกว้างและความลึกที่มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็จะมีความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานและการเจือจางที่ลดน้อยลง

5.1.2 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (Micro structure)

ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (Micro structure) ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้าง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 บริเวณ ได้แก่ 1. บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal zone) 2. บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุโลหะฐาน (Fusion zone) 3. บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ) และ 4. บริเวณวัสดุโลหะฐานที่ใช้ในการเชื่อม (Base metal zone)

1. บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal zone)

โครงสร้างทางโลหะวิทยาที่บริเวณนี้มีลักษณะโครงสร้างแบบ Dendritic มีลักษณะของเกรนแบบเท่ากัน (Equiaxial grains) โดยที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม มีลักษณะการเรียงตัวของเกรนที่ขอบในรูปแบบเกรนแท่ง (Columnar grains) ซึ่งลักษณะของการเรียงตัวโครงสร้างในลักษณะนี้เป็นการเรียงของวัสดุโลหะ ทองแดงอัลลอยด์ที่มีส่วนผสมหลายองค์ประกอบ (Multicomponent copper alloy) โครงสร้างในลักษณะนี้ให้คุณสมบัติในด้านความแข็งแรงที่สูง มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดี

2. บริเวณการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุโลหะฐาน (Fusion zone)

โครงสร้างทางโลหะวิทยาที่บริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีการเชื่อมต่อกันของเนื้อโลหะเชื่อมและโลหะฐาน โดยพื้นที่บริเวณที่อยู่ใกล้กับเส้นหลอมละลายของลวดเชื่อมกับวัสดุโลหะฐาน (Fusion line) โครงสร้างทางโลหะวิทยาจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการผลกระทบทางความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อม

3. บริเวณพื้นที่กระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ)

โครงสร้างทางโลหะวิทยาที่บริเวณนี้เป็นบริเวณใกล้กับบริเวณหลอมละลายของลวดเชื่อม (Fusion zone) จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบมาร์เทนไซต์ที่เล็กละเอียด (Needle-Martensite) เนื่องจากได้รับความร้อนจากกระบวนการเชื่อมสูง และเมื่อถัดลงมาจะมีโครงสร้างเป็นแบบออสเทนไนต์ (Austenite) คือมีลักษณะของเกรนที่เล็กและละเอียดมากขึ้น เนื่องจากได้รับความร้อนและการเย็นตัวของโลหะในบริเวณนี้จึงส่งผลให้เกรนมีขนาดที่ละเอียด

4. บริเวณวัสดุโลหะฐานที่ใช้ในการเชื่อม (Base metal zone)

โครงสร้างทางโลหะวิทยาที่บริเวณนี้เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลท์ (Pearlite) เนื่องจากที่บริเวณโลหะฐานนี้เป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 มีส่วนผสมทางเคมีเป็นคาร์บอนอยู่ที่ประมาณ 0.13% ถึง 0.18% ซึ่งมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.8% จึงถูกจัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำประเภทไฮโปยูเทกตอยด์ (Hypo-Eutectoid) โดยบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมชิ้นงาน ดังนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยาในบริเวณนี้

5.1.3 การศึกษาสมบัติทางกล (Mechanical properties)

ในการศึกษาสมบัติทางกล (Mechanical properties) ได้ทำการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานด้วยการวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers hardness test) และการวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test) จากการศึกษาพบว่าหากพิจารณาตัวแปรกระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อมที่แตกต่างกัน จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟในการอุ่นลวดไม่ได้ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ สิ่งส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานคือกระแสไฟในการเชื่อมชิ้นงานที่แตกต่างกัน หากกระแสไฟในการเชื่อมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นงานลดลง หากความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่มากจะส่งผลให้เนื้อโลหะเชื่อมจะมีความแข็งที่สูงขึ้น แต่หากความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำจะส่งผลให้เนื้อโลหะเชื่อมมีค่าความแข็งที่ลดลง หากเพิ่มความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม จะส่งผลให้ค่าความแข็งของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีค่าที่ลดลง และการเชื่อมพอกผอผิวชิ้นงาน 2 ชั้น จะให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงที่สุด

5.1.4 การศึกษาการทดสอบการต้านทานการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65

การทดสอบการต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM G65 พบว่าชิ้นงานที่มีการเชื่อมด้วยกระแสไฟในการเชื่อม 140 แอมแปร์ กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม 140 แอมแปร์ เป็นชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอมากที่สุด และที่การทดสอบชิ้นงานที่มีการเชื่อมด้วยกระแสไฟในการเชื่อม 130 แอมแปร์ กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม 130 แอมแปร์ เป็นชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอน้อยที่สุด

ในการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เชื่อมพอกผอผิวชิ้นงาน การเชื่อมพอก 2 ชั้น เป็นชิ้นงานที่มีการต้านทานการสึกหรอได้มากที่สุด เนื่องจากผลการทดสอบมีอัตราน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) ที่น้อยที่สุด เนื่องจากในกระบวนการเชื่อมพอกเป็นกระบวนการที่ทำให้เนื้อโลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลายพอกเคลือบพื้นผิวชิ้นงานไว้ เมื่อทำการเชื่อมพอกชิ้นงานเป็นจำนวน 2 ชั้น จะช่วยให้มีความหนาของเนื้อโลหะลวดเชื่อมมากเพียงพอ เกิดการปกคลุมพื้นผิวของโลหะฐานทั้งหมด เมื่อทำการทดสอบวัดค่าความแข็งของชิ้นงานในรูปแบบต่าง ๆ ชิ้นงานที่มีการเชื่อมพอกผิว 2 ชั้น จึงมีค่าความแข็งสูงที่สุด และมีค่าการต้านทานการสึกหรอมากที่สุด

5.1.5 การสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อม

โดยจากการดำเนินการทดลองการเชื่อมซ่อมมีดฟันอ้อยด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบอุ่นลวดร้อน (Hot wire TIG) ภายใต้ข้อจำกัดและขอบเขตการวิจัย สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในการเชื่อมพอกผิวชิ้นงานเพื่อยืดอายุการใช้งานได้ ดังนี้

ตารางที่ 5.1 การสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมพอก

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมพอก		คุณลักษณะของแนวเชื่อมที่ได้	
ตัวแปร	ค่า	คุณลักษณะ	ค่า
กระแสไฟในการเชื่อม (A)	140	ขนาดความกว้างของแนวเชื่อม (mm)	8.77
กระแสไฟในการอุ่นลวดเชื่อม (A)	120	ขนาดความลึกของแนวเชื่อม (mm)	3.27
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (mm/min)	70	ความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (J/mm)	1593.78
มุมมองสาในการเชื่อม (องศา)	15	อัตราเงาของแนวเชื่อม (%)	57.19
ความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (m/min)	1	ความแข็งเฉลี่ยของแนวเชื่อม (HV)	731.60
การเชื่อมพอก (ชั้น)	2 ชั้น	อัตราการสึกหรอ (g)	0.0850

จากตารางที่ 5.1 การสรุปค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมพอกเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้เชื่อมมีดสับอ้อย วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS400 เพื่อยืดอายุการใช้งานของใบมีด โดยผลลัพธ์ลักษณะและคุณสมบัติของแนวเชื่อมจะมีขนาดความกว้างและความลึกของแนวเชื่อม คือ 8.77 และ 3.27 ตามลำดับ มีความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงานประมาณ 1594 J/mm มีค่าความแข็งเฉลี่ยของแนวเชื่อม 731.60 HV (ประมาณ 61 HRC) และอัตราการสึกหรอ 0.0850 g

โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่หาได้นั้น อยู่ภายใต้ข้อจำกัดในการทดลองเชื่อมที่ได้มีการกำหนดไว้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่าง ๆ นอกเหนือจากงานวิจัยนี้ สามารถใช้ผลการทดลองและการศึกษาวิจัยนี้เป็นแนวทางในการเลือกปัจจัยที่เหมาะสมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำงานวิจัยนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของการศึกษาการเชื่อมเชื่อมมิตส์บอ้อยเพื่อยืดอายุการใช้งานเท่านั้น โดยข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อนำไปต่อยอดพัฒนางานวิจัยในอนาคตมีรายละเอียด ดังนี้

- 5.2.1 การดำเนินการทดลองเชื่อมทุกครั้ง ควรต้องมีการทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงาน กำจัดความชื้นและสิ่งปนเปื้อนก่อนทำการเชื่อมเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดข้อบกพร่องในเข้าไปผสมอยู่กับบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ซึ่งอาจจะเป็นต้นเหตุให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานได้
- 5.2.2 งานศึกษาวิจัยนี้มุ่งเน้นประเด็นในการหาค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมในเชื่อมเชื่อมมิตส์บอ้อย วัสดุ SS400 เท่านั้น ไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ในการนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อเชื่อมเชื่อม เช่น ต้นทุนในการเชื่อม ระยะเวลาในการเชื่อม เป็นต้น ในอนาคตจึงควรมีการคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ เพื่อใช้ในการประกอบการตัดสินใจในการนำไปปฏิบัติงานจริง
- 5.2.3 ควรมีการศึกษาการใช้งานเครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลองให้มีความชำนาญและคุ้นเคยก่อน รวมไปถึงควรมีการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมเพื่อให้เข้าใจในหลักการทำงานและรูปแบบการทำงานของเครื่องเชื่อมมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ สุณีรัตน์ หทัยรักษัธรรม. (ม.ป.ป.). โครงการศึกษาวิจัยผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร;สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย.
- คำพูน พรหมสุกะ, 2558. กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งทั้งสแตนคาร์ไบด์สำหรับอุปกรณ์งานดินการเกษตร โดย กระบวนการเชื่อมแก๊สออกซิเจนอะเซทิลีนและกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ไพบุลย์ หาญมนต์. 2552. การศึกษาอิทธิพลความร้อนในงานเชื่อมที่มีผลต่อการหลอมลึกความกว้างความสูงและบริเวณกระทบร้อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโตกระบวนการเชื่อมมิก. สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพเขตสาทร.
- วิชิต เลื่อมใส, สุรัชย์ ขจรเดชะศักดิ์ และ อุดม สมไชยา. (2554) การศึกษาและพัฒนาวิธีการทำงานที่มีผลต่อการโค้งงอของบานประตูเตาอบอ่อนจากการเชื่อมมิก. กลุ่มวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- สุรียา ลีมนา, 2553. การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงล้าของผิวเชื่อมพอก. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- สุพร ฤทธิภักดี, 2554. พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของผิวเชื่อมพอกแข็งบนเหล็ก AISI 1020. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
- ถนอม ลีตระกูล, 2555. "การพัฒนาเม็ดตัดในรถตัดอ้อยเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็ง," การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2555, จ.เพชรบุรี, หน้า 1666-1670.
- Asrofi, Mochamad & Hidayatulloh, Mochammad & Jatisukamto, Gaguk & Sutjahjono, Hary & Sakura, Rahma. (2020). The effect of temperature and volume fraction of mahoni (Swietenia mahogani) wood charcoal on SS400 steel using pack carburizing method: Study of hardness and microstructure characteristics. 7. 354-363. 10.3934/materci.2020.3.354.

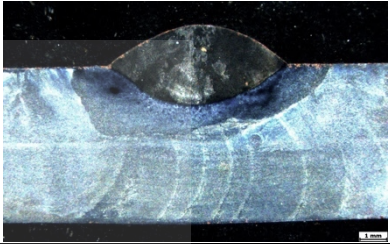
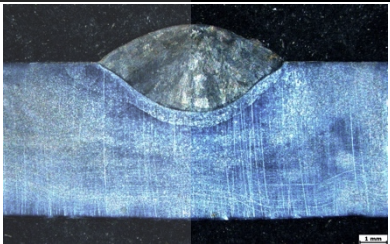
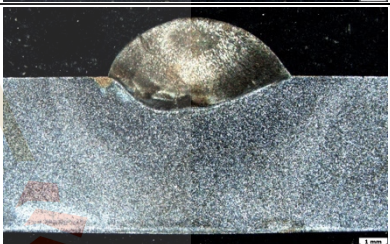
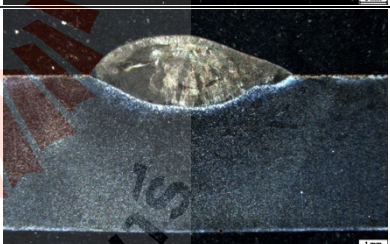

- Cao, Fujun & Chen, Shujin & Du, Chengchao. (2018). Investigation of hot-wire TIG welding based on the heat-conduction. *Energy Procedia*. 144. 9-15. 10.1016/j.egypro.2018.06.003.
- Erick Alejandro González Olivares, Victor Manuel Vergara Díaz, 2017. Study of the hot-wire TIG process with AISI-316L filler material, analyzing the effect of magnetic arc blow on the dilution of the weld bead. Antofagasta University.
- Darmo, Suryo & Prihadianto, Braam. (2022). The Effect Of Hard Facing Process On The Hardness And Microstructure Of Bucket Tooth For Different Manganese Content. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 13. 827-836. 10.21776/jrm.v13i3.1222.
- Gwidon W Stachowiak. (2005). *Wear Materials, Mechanism and Practice, Tribology in Practice Series*.
- Rosyadi, Ahmad & Gustiawan, Firman & Darsin, Mahros & Hermawan, Yuni & Asrofi, Mochamad. (2022). Optimization of electroplating thickness results for SS400 steel using the Taguchi method. *Jurnal POLIMESIN*. 20. 121-127. 10.30811/jpl.v20i2.2860.
- PRADEEP, & Ramesh, Ananthakesavachar & PRASAD, B. (2010). A review paper on hardfacing processes and materials. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2.
- Song, Shou-Xu & Liu, Yun-Dong & Ke, Qing-Di & Shen, Ye-Chao. (2013). Overlaying welding technology and performance of axle tube remanufacturing. *Advances in Manufacturing*. 1. 10.1007/s40436-013-0023-4.
- Spaniol, E. & Ungethüm, Tim & Trautmann, Marcus & Andrusch, K. & Hertel, Martin & Füssel, U.. (2020). Development of a novel TIG hot-wire process for wire and arc additive manufacturing. *Welding in the World*. 64. 10.1007/s40194-020-00871



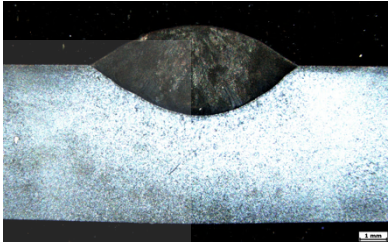
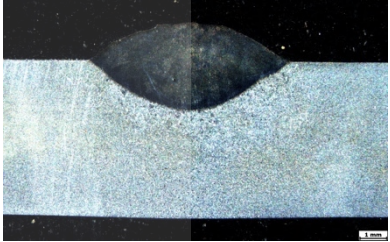


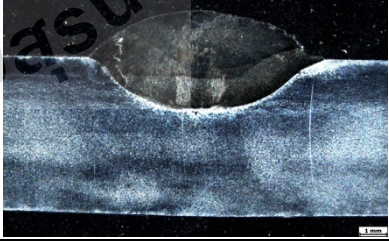
ภาคผนวก ก

รูปโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของชิ้นงาน

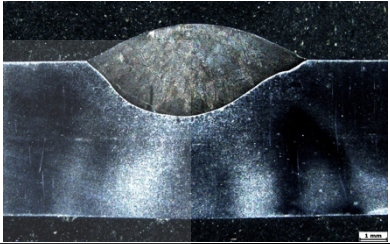
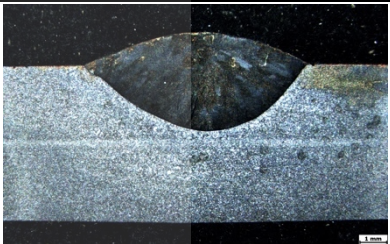
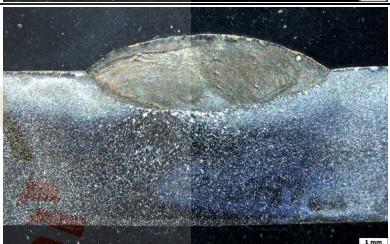
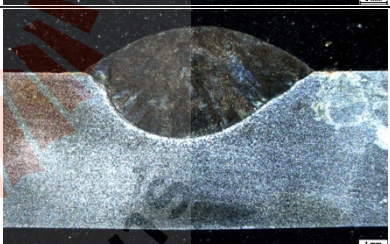
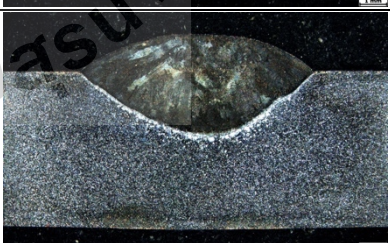
ตารางที่ ก.1 ภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

ชิ้นงาน	ตัวแปรในการเชื่อม		ลักษณะแนวเชื่อม
	กระแสไฟเชื่อม (A)	กระแสไฟอุ่นลวดเชื่อม (A)	
1		100	
2		110	
3	120	120	
4		130	
5		140	

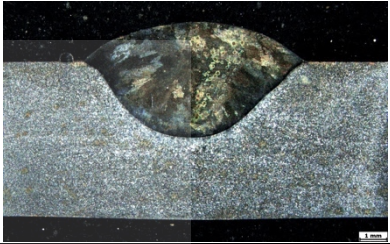
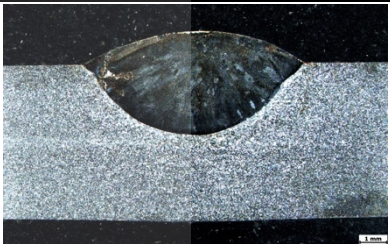
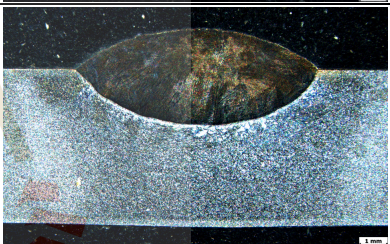

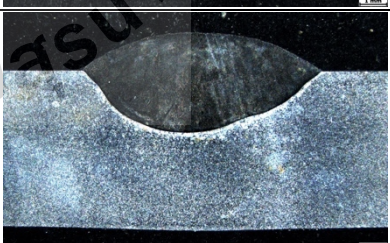
ตารางที่ ก.1 ภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

ชิ้นงาน	ตัวแปรในการเชื่อม		ลักษณะแนวเชื่อม
	กระแสไฟเชื่อม (A)	กระแสไฟอุ่นลวดเชื่อม (A)	
6		100	
7		110	
8	130	120	
9		130	
10		140	

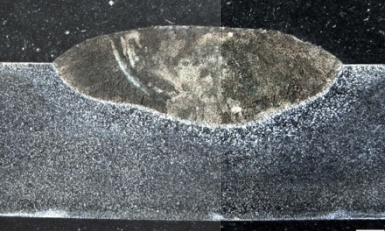
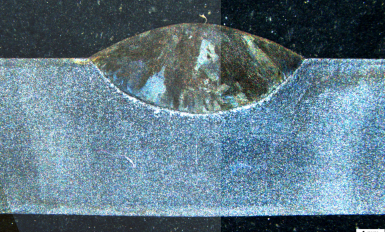
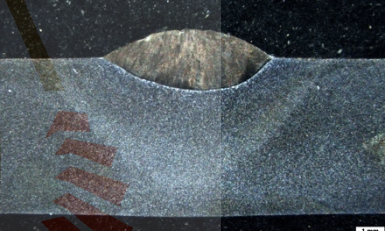

ตารางที่ ก.1 ภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

ชิ้นงาน	ตัวแปรในการเชื่อม		ลักษณะแนวเชื่อม
	กระแสไฟเชื่อม (A)	กระแสไฟอุ่นลวดเชื่อม (A)	
11		100	
12		110	
13	140	120	
14		130	
15		140	

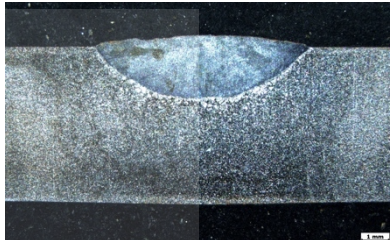
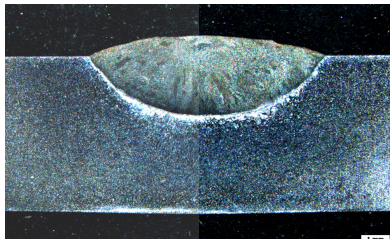
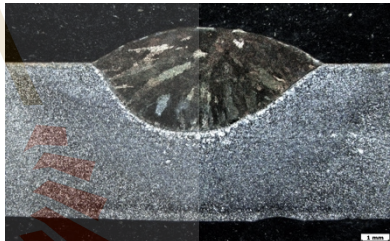
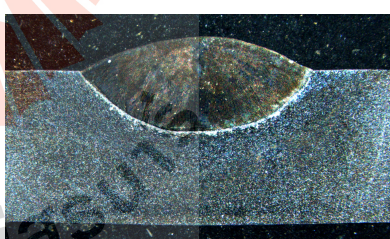
ตารางที่ ก.1 ภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองกระแสไฟในการเชื่อมและการอุ่นลวด

ชิ้นงาน	ตัวแปรในการเชื่อม		ลักษณะแนวเชื่อม
	กระแสไฟเชื่อม (A)	กระแสไฟอุ่นลวดเชื่อม (A)	
16		100	
17		110	
18	150	120	
19		130	
20		140	


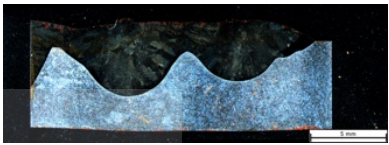

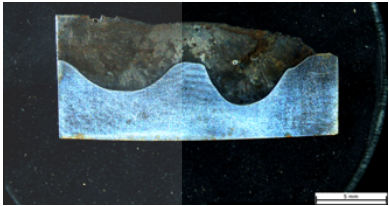

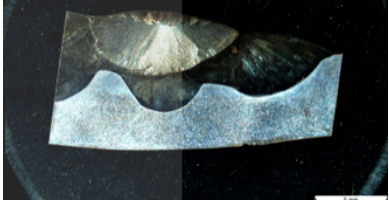
ตารางที่ ก.2 ตารางภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการเดินแนวเชื่อม

ชิ้นงาน	ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (มม./นาท)	ลักษณะแนวเชื่อม
21	70	
22	80	
23	90	
24	100	

ตารางที่ ก.3 ภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองความเร็วในการเชื่อม

ชิ้นงาน	ความเร็วเชื่อม (เมตร/นาที)	ลักษณะแนวเชื่อม
25	0.5	
26	1	
27	1.5	
28	2	

ตารางที่ ก.4 ภาพโครงสร้างชิ้นงานในการทดลองเชื่อมพอกผิวแข็งชิ้นงาน

ชิ้นงาน	การเชื่อมพอก	แนวเชื่อม	ลักษณะแนวเชื่อม
29	1 ชั้น		
30	2 ชั้น		
31	3 ชั้น		



ตาราง ข.1 การวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV) ในการทดลองปรับกระแสไฟ

ชั้นงาน	บริเวณเนื้อเชื่อม					บริเวณกระหนว้น						บริเวณเนื้อโลหะฐาน					
	-3.00	-2.50	-2.00	-1.50	-1.00	-0.50	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
1	636.10	640.00	621.00	635.20	620.00	180.00	198.00	170.00	140.00	149.00	179.00	146.80	135.90	150.22	157.90	140.00	145.90
2	696.50	680.00	695.00	672.00	694.65	185.50	183.00	149.00	159.00	183.27	185.10	142.80	140.61	123.20	139.30	141.35	160.00
3	850.50	830.00	852.00	840.00	790.00	134.50	125.00	135.70	140.00	132.27	150.00	136.10	133.91	120.54	132.60	134.65	148.23
4	734.90	740.00	720.00	759.00	720.00	149.40	180.00	168.00	189.00	147.17	142.60	133.30	130.00	127.32	129.80	140.50	140.80
5	880.00	840.00	872.00	850.00	855.00	143.40	163.00	190.00	170.00	141.17	144.58	132.30	130.11	125.00	128.80	130.85	129.62
6	624.10	600.00	620.35	621.85	602.55	141.20	130.65	142.65	139.66	138.97	129.00	140.40	138.21	139.23	136.90	138.95	137.72
7	612.60	630.22	598.21	610.35	600.89	175.90	178.32	180.45	174.36	170.65	180.55	151.20	149.01	150.03	147.70	149.75	148.52
8	686.00	650.42	630.55	683.75	650.95	134.90	130.55	139.85	130.32	132.67	135.78	129.50	127.31	128.33	126.00	128.05	126.82
9	580.20	570.32	550.48	577.95	550.65	140.80	146.23	135.32	140.55	138.57	128.60	129.70	127.51	128.53	126.20	128.25	127.02
10	575.90	553.14	570.48	573.65	546.65	143.10	139.32	140.85	130.98	140.87	145.65	131.90	129.71	130.73	128.40	130.45	129.22
11	506.70	500.55	510.32	504.45	480.45	165.50	155.48	166.70	170.55	163.27	165.50	148.30	146.11	147.13	144.80	146.85	145.62
12	472.30	480.65	501.55	470.05	510.45	147.20	140.55	150.85	142.32	144.97	135.98	140.00	137.81	138.83	136.50	138.55	137.32
13	709.50	698.50	710.65	700.55	650.65	141.00	160.85	142.20	139.46	130.23	148.12	144.40	142.21	143.23	145.88	142.95	141.72
14	590.45	550.14	570.48	550.85	560.12	155.10	152.60	156.30	153.56	152.87	142.90	132.60	130.41	131.43	129.10	131.15	129.92
15	481.00	450.65	450.65	478.75	479.15	136.00	133.50	137.20	134.46	133.77	123.80	131.70	129.51	130.53	128.20	130.25	129.02
16	482.70	480.70	460.85	485.50	480.85	149.70	147.20	150.90	148.16	147.47	140.58	149.40	147.21	148.23	145.90	147.95	146.72
17	451.60	440.32	470.45	430.54	449.75	147.00	144.50	155.22	145.46	144.77	134.80	138.30	136.11	137.13	134.80	136.85	135.62
18	613.50	600.85	625.25	600.75	585.85	151.70	149.20	152.90	150.16	140.55	130.54	127.60	125.41	126.43	124.10	126.15	124.92
19	543.10	498.65	500.88	540.85	530.00	143.80	141.30	145.00	142.26	141.57	131.60	128.90	126.71	127.73	125.40	127.45	126.22
20	503.80	480.78	502.55	501.55	490.56	138.40	135.90	148.78	136.86	136.17	135.65	137.40	135.21	136.23	133.90	135.95	134.72

ตาราง ข.2 การวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV) ในการทดลองปรับการเดินแนวเชื่อม

ชั้นงาน	บริเวณเนื้อเชื่อม					บริเวณกระหน่ำร้อน						บริเวณเนื้อโลหะฐาน					
	-3.00	-2.50	-2.00	-1.50	-1.00	-0.50	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
21	476.6	455.68	465.85	450.22	475.15	133.8	130.55	135.48	133.65	130.85	138.65	128.9	125.25	135.65	130.88	129.21	130.9
22	473.7	468.22	450.65	479.48	478.21	140	145.84	138.98	140.88	149.65	138.48	132.1	130.66	135	138.6	129.5	132.5
23	595.3	550.56	580.48	555.74	590.96	149.7	145.02	148.55	145.98	148.88	137.55	146.9	145.89	150.2	139.4	148.5	148.6
24	580.4	600.2	590.23	560.45	585.68	145.5	150.68	145.65	147.14	158.65	150	147.6	145.11	148.6	139.5	145.9	145.5

ตาราง ข.3 การวัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV) ในการทดลองปรับความเร็วป้อนลวด

ชั้นงาน	บริเวณเนื้อเชื่อม					บริเวณกระหน่ำร้อน						บริเวณเนื้อโลหะฐาน					
	-3.00	-2.50	-2.00	-1.50	-1.00	-0.50	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
25	800.10	790.50	805.50	775.65	790.55	140.20	150.98	148.32	145.33	135.65	129.90	125.65	122.85	130.65	129.56	125.88	129.65
26	639.40	620.55	648.56	640.15	625.56	146.10	140.56	148.66	145.65	140.36	128.80	128.65	135.66	125.22	128.65	120.65	128.25
27	528.50	530.65	520.66	535.35	520.12	132.00	130.56	135.88	134.87	130.48	126.50	120.55	125.98	125.98	129.55	135.06	125.02
28	463.30	458.48	465.15	469.65	466.55	136.90	130.55	129.65	128.55	135.98	127.40	125.85	120.56	126.80	130.02	130.66	125.78

ตาราง ข.4 การวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test)

ชิ้นงาน	Rockwell hardness test			
	#1	#2	#3	เฉลี่ย
1	49.10	44.30	48.30	47.23
2	47.70	48.70	49.00	48.47
3	59.90	60.10	60.30	60.10
4	57.80	59.00	55.30	57.37
5	61.30	58.60	59.70	59.87
6	47.40	48.50	47.20	47.70
7	47.30	45.30	42.50	45.03
8	48.50	50.20	50.20	49.63
9	46.60	45.80	48.10	46.83
10	48.90	48.40	49.90	49.07
11	41.70	42.40	42.80	42.30
12	38.40	39.80	38.40	38.87
13	48.40	50.90	48.90	49.40
14	43.40	43.90	43.50	43.60
15	42.70	40.60	42.60	41.97
16	40.60	40.60	39.80	40.33
17	39.50	39.40	38.50	39.13
18	48.80	49.50	50.00	49.43
19	47.80	48.10	47.20	47.70
20	41.50	39.80	41.10	40.80
21	41.20	43.20	43.90	42.77
22	39.60	36.60	39.80	38.67
23	45.50	46.80	41.20	44.50
24	41.30	41.50	41.30	41.37
25	56.10	57.20	57.70	57.00
26	51.80	50.90	51.70	51.47
27	39.10	38.40	38.80	38.77
28	44.40	45.00	41.80	43.73



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Jongkol Srithorn, Kingkan Kongkanjana (2023). The Study Of Parameters Affecting Mechanical Properties And Microstructure Of Ss400 Carbon Steel And Mg316 LSI Filler Material By Using Hot- Wire TIG Welding Process. The 17th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2023), 23 – 24 February 2023, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand



The 17th South East Asian Technical University Consortium: SEATUC 2023
23 – 24 February 2023 Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND

THE STUDY OF PARAMETERS AFFECTING MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF SS400 CARBON STEEL AND MG316 LSI FILLER MATERIAL BY USING HOT-WIRE TIG WELDING PROCESS.

Jongkol Srithorn ⁽¹⁾, Kingkan Kongkanjana ⁽²⁾
School of Industrial Engineering, Suranaree University of Technology. ^{(1),(2)}
Jongkol@sut.ac.th⁽¹⁾, M6301217@g.sut.ac.th⁽²⁾

ABSTRACT

TIG hot-wire welding is a gas-shielded tungsten welding process that has a unique advantage over conventional TIG welding in that the welding filler wire is pre-heated to nearly melting point. This results in less heat input to the workpiece than is conventional, because of less heat input entering the workpiece, there is less dilution of the weld metal and base metal. This allows the properties of the weld to not deviate from the requirements. Therefore, research is required to determine the appropriate hot-wire TIG welding parameters. Because improper welding will influence the mechanical properties of the material. The objective of this research was to study the parameters which influence the mechanical properties and microstructure of carbon steel grade SS400 using MG316 LSI filler wire for welding by varying the arc current and hot-wire current. For the Vickers hardness test, it was found that welds using 110 A welding current parameters and 70A heating current gave the highest hardness values of 402 HV. The macrostructure of the weld reveals that the increased arc current affects the size and width of the weld bead. The higher the welding current Welds are wide and flat. And finally, in the microstructure test of the weld, it was found that the structure of the weld was needle-like. Which is similar to the Widmanstätten patterns structure.

Keywords: *Hot-wire TIG, Microstructure, Mechanical properties, Filler material, Carbon steel*

1. INTRODUCTION

The welding technique is now being explored in numerous industries. Technology is developing rapidly. The TIG welding procedure is a helpful welding method. Because this type of welding allows to create clean and beautiful welds due to gas cover. and easy to control welds.

However, The hot-wire TIG welding process is superior at reducing the amount of heat input to the workpiece. due to before the filler wire becomes fed into the arc, the filler wire is pre-heated nearly to its melting point. (Lashchenko GI., 2012) Because of this, the heat input that enters the workpiece is lower than normal TIG. With less heat input entering the workpiece, there

is less dilution of the weld and base metal. This allows the properties of the weld to not deviate from the requirements. The hot-wire TIG is appropriate for applications that require for workpieces with a high level of hardness and durability. For example, workpieces that are required to have a long service life, such as metal molds, or sugar cane shredders in the industry have to be subjected to constant impacts, This results in rapid wear. Nonetheless, if the welding process uses a welding arc current that is too strong, it will result in a high dilution rate of the weld metal and base metal, resulting in the required mechanical qualities disappearance. Hence, to achieve the most effective and appropriate welding results, it is necessary to study the suitable TIG hot-wire welding parameters.

F. Cao, S. Chen and C. Du. (2018) said the hot-wire TIG welding has improved in weld bead shape and increase the welding speed. Due to the low chilling effect of the welding wire on the welding arc, the hot-wire welding efficiency with a wire temperature of 220 °C was increased by more than 100%.

Vergara, Victor & Gonzalez, Erick & Flores, Cristian. (2016). Study the implementation and study of the TIG Hot-Wire welding process. They found that when compared to the TIG Cold-Wire welding process, The research showed that compared Hot-wire TIG welding to cold-wire TIG welding process, The hot-wire TIG welding can produce more satisfying welds and has a lower dilution rate.

Tanya Na, et al. (2021). Study of Mechanical and Metallurgical Properties of Cold and Hot Reciprocating Wire TIG Welding on AISI 1035 Carbon Steel. They studied different types of TIG welding: cold wire, hot wire, cold wire reciprocating, and hot wire reciprocating. After researching the macrostructure and microstructure, it was discovered that hot wire reciprocating produced the greatest results in terms of the joint's tensile properties and hardness.

The objective of this research was to study the parameters which influence the mechanical properties and microstructure of carbon steel grade SS400 using MG316 LSI filler wire for welding by varying the arc current and hot-wire current.

2. EXPERIMENT

2.1 Experiment apparatus

The base metals materials used in this research are SS400 carbon steel plate with dimension of 100x200x5 mm. (Figure 1)

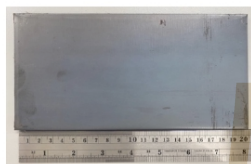


Figure 1. Base metal workpiece for experiment SS400 carbon steel.

The material used for the experiment is welded with solid wire filler material Stainless grade MG 316LSI with diameter of 0.8 mm. (Figure 2) and Metal composition were featured in Table 1.

Table 1. Metal composition of filler material

Element	C	Cr	Ni	Mo	Mn
%Composition of MG 316LSI	0.02	18.9	11.8	2.2	2.1
	Si	P	S	N	Cu
	0.81	0.02	0.01	0.05	0.23

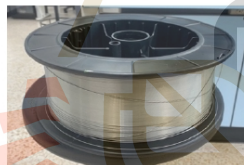


Figure 2. filler material Stainless-Alloy grade MG 316LSI

2.2 Technique

2.2.1 Experiment Design

For the experiment of TIG hot wire welding, Bead on Plate (BOP) welding was used in the experimental method. (Figure 3.)

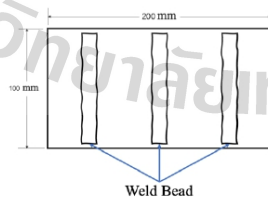


Figure 3. Schematic drawing of the Bead on Plate (BOP) welds

The parameters are welding current, voltage, hot wire current, travel speed, tip angle, wire feeding speed and gas flow rate as shown in Table 2.

Table 2. Parameters of the experiment.

Welding Parameters	Value
Welding current (A.)	110, 120, 130, 140
Welding Voltage	10.1, 14.1, 14.4, 14.6
Hot wire current (A.)	70, 80, 90, 100
Travel speed (mm/min)	85
Tip angle (degree)	20
wire feeding speed (mm/min)	1.3
Gas flow rate (L/min)	15

The parameter that varies is the welding current. The current used in welding will have all 4 levels, Which are 110,120,130, and 140 A. and the hot wire current varies by 4 levels 70, 80, 90, and 100 A.

The welding voltage is adjusted by the welding machine in accordance with the welding current used. Fixed parameters are travel speed which is 85 mm/min, Tip angle is 20 degrees, wire feeding speed is 1.3 mm/min and gas flow rate (Argon) is 15 L/min. The example of a welding workpiece is shown in Figure 4.

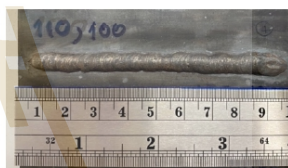


Figure 4. Welded Sample

2.2.2. Experiment procedure

In the experiment to investigate the TIG hot wire welding parameters, a total of 16 welds were produced after welding the workpiece in accordance with all parameters, as shown in Table 3.

Table 3. Parameters of the experiment procedure.

Arc current (A)	Wire feeding speed (mm/min)	Hot wire current (A)
110	1.3	70
		80
		90
		100
120	1.3	70
		80
		90
		100
130	1.3	70
		80
		90
		100
140	1.3	70
		80
		90
		100

After welding the workpiece according to all parameters, The next step is to cut the workpiece with a EDM wire-cut machine. and bring the workpiece to Metallographic hot mounting (Figure 5) And then take the workpiece to surface preparation by polish all 8 sandpaper which is no. 80, 100, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 and polish with 0.3 μm alumina powder. Etching the specimen with Carpenter acid (85 g Ferric chloride + 24 g Cupric chloride + 122 ml Ethanol + 122 ml Hydrochloride acid + 6ml Nitric acid). (E. Soonsun, 2019)



Figure 5. Metallographic hot mounting Sample

After workpiece preparation. The next step is to take the workpiece for analysis of Macrostructure and Microstructure By using a Fluorescence Microscope and measuring the hardness with a Vickers hardness test.

3. ANALYSIS

3.1 Hardness Test

This experiment is looking for a parameter that produces a high hardness of weld bead due to the results of a hardness test that can be used to investigate a material's properties including wear resistance (W. Somnuk, 2006). Thus, The arc current and hot wire current with the highest hardness are chosen using the welding current that provides the greatest hardness. Vickers hardness test of the workpiece revealed that the hardest value was 402 HV, which was welded using 110 A of welding current and 70 A of heating current. as shown in Table 4.

Table 4. hardness test results

Arc current (A)	Hot wire current (A)	Hardness Vickers (HV)
110	70	402
	80	363
	90	354
	100	345
120	70	395
	80	359
	90	345
	100	326
130	70	396
	80	392
	90	382
	100	376
140	70	393
	80	382
	90	386
	100	375


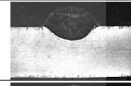
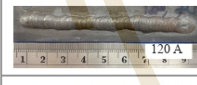
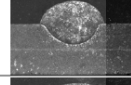

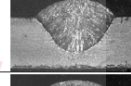

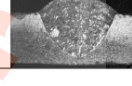
A hot wire current of 70A results to a hardness of 395 HV at a welding current of 120A. The hardness value is 396 HV when the welding current is 130 A and the hot wire current is 70 A, and 393 HV when the welding current is 140 A and the hot wire current is 70 A.

It can be observed that if the welding currents are the same, The hot wire current affects the hardness of the weld. If there is an increase in the hot wire current, the hardness will decrease because of the increased heat, the grain of the wire rod material is enlarged and the hardness of the workpiece decreases.

3.2 Macrostructure

For the Investigate macrostructure of the experiment, It was found that the size and shape of the weld are directly influenced by the welding current. as shown in Table 5.

Table 5. Weld shape at a varying arc current

Weld beads	Cross-sectional areas	Weld width (mm)
		6.64
		7.31
		9.31
		9.10

When the welding current was increased, the resulting weld was found to be larger when compared to the picture of the macrostructure of the weld at the same hot wire current at 70A. From the result, Welding current of 110 A, the weld width is 6.64 mm and when the current is increased to 120 A, the weld width is increased to 7.31 mm. At the welding current of 130 and 140 A, the weld size will increase from the previous welding current But this time, the welding current of 140 A has a weld width of 9.10 mm, which is less than 130 A with a width of 9.31 mm. This is probably a result of inconsistent welding speed. Therefore, the weld width is not constant throughout the line.

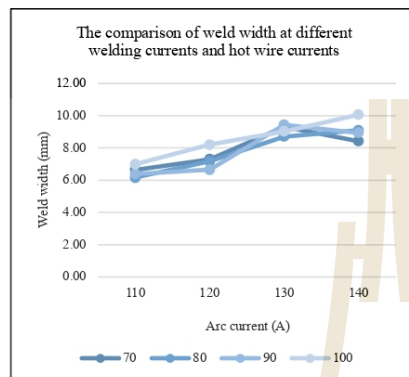


Figure 6. The comparison of weld width at different welding currents and hot wire currents

The increased welding current results in larger weld bead from the melting of the wire. The heat input that entering the workpiece is also greater (as shown in Table 6). When investigate by microscopic pictures to analyze the penetration depth, the depth is larger.

Table 6. The result of calculating the heat input

Arc current (A)	Hot wire current (A)	Voltage (V)	Travel speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)
110	70	10.1	85	7.84
	80	10.1	85	7.84
	90	10.1	85	7.84
	100	10.1	85	7.84
120	70	14.1	85	11.94
	80	14.1	85	11.94
	90	14.1	85	11.94
	100	14.1	85	11.94
130	70	14.4	85	13.21
	80	14.4	85	13.21
	90	14.4	85	13.21
	100	14.4	85	13.21
140	70	14.6	85	14.43
	80	14.6	85	14.43
	90	14.6	85	14.43
	100	14.6	85	14.43

The following equation was used to calculate the welding heat input:

$$HI = \frac{U \times I \times \eta}{v}$$

where HI represents the heat input in kJ/mm, U represents the arc voltage in volts (V), I represents the welding current in amperes (A), η represents the thermal efficiency coefficient and v represents the welding speed in mm/min. η of TIG is taken as 0.6 (Zhou, Chilou & Dai, et al., 2022)

3.3 Microstructure

The microstructure of the welded specimen was studied using a reflected light microscope at 50X magnification to examine the metallurgical structure of the specimen. It will be inspected at the weld area of the test specimen as shown in Figure 7.

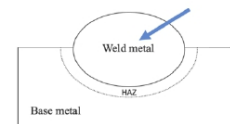


Figure 7. Inspection area

Microstructure examination of this research. A appropriate weld line will be selected, i.e. a weld bead that is consistent, has an appropriate penetration rate, Which is neither too little nor too much to penetrate. Due to The penetration affects the dilution of the welding material. This has a significantly impacted on the material's mechanical properties. (N. Phuraya & I. Phung-On, 2008)

After analyzing the macrostructure, it was found that the appropriate weld line was weld bead that use the arc current at 110A with 70A hot wire current (Figure 8.) Welds formed by 120A arc current and hot wire current is 70 A (Figure 9.). The weld bead that formed by 130A air current and 70A Hot wire current. (Figure 10.) and the weld caused by a current of 140A and a hot wire current of 90 A (Figure 11.).



Figure 8. Microstructure of welds at a welding current of 110 A, and Hot wire current of 70 A.



Figure 9. Microstructure of welds at a welding current of 120 A, and Hot wire current of 70 A.

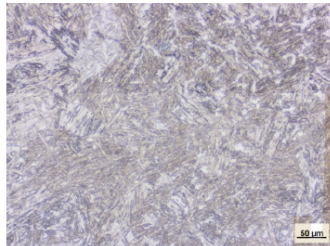


Figure 10. Microstructure of welds at a welding current of 130 A, and Hot wire current of 70 A.

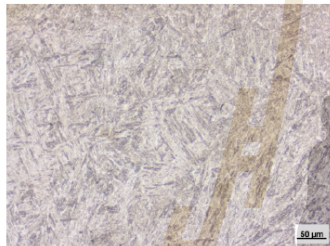


Figure 11. Microstructure of welds at a welding current of 140 A, and hot wire current of 90 A.

The comparative study of the structure of the workpiece revealed that the weld metal area, which is located above the base metal. Most of the structure looks like a sharp needle that protrudes perpendicular to the metal's grain. This structure is similar to the Widmanstätten patterns structure. It is the second order phase and provides basket-weave-like crystallization and structural direction. This resulting structure creates residual stresses in the core area and increases the hardness of the metal. (Poonnayom P. et al., 2016)

4. CONCLUSIONS

1. The study of parameters affecting the mechanical properties and microstructure of SS400 metal by hot-wire TIG welding process. The experimenting with beads on a plate thickness of 5 mm. The greatest hardness value, 402 HV, is produced using a welding current of 110A and a heating current of 70A.

2. For the experiments when the hot wire currents are equal. The increase in welding current directly affects the shape and size of the weld bead. If the current is increased, The weld line is wider and more flat.

3. Experiment when welding currents are equal. Increasing the hot-wire current will affect the shape and hardness of the weld. the hardness will decrease because of the increased heat, the grain of the wire rod material is enlarged and the hardness of the workpiece decreases.

REFERENCES

Vergara, Victor & Gonzalez, Erick & Flores, Cristian. (2016). Implementação e Estudo do Processo de Soldagem TIG Hot Wire (Implementation and study of the TIG Hot-Wire welding process).

Vuong, Gia & Minh, Nguyen & Nguyen, Duc - Toan. (2019). Mechanical Properties of SS400 Steel Plate at Elevated Temperatures. *Applied Mechanics and Materials*. 889. 51-57. 10.4028/www.scientific.net/AMM.889.51.

Xue, Jinxin & Wu, Hao & Zhou, Chilou & Zhang, Yuanming & He, Mohan & Yan, Xinrui & Xie, Huiyu & Yan, Rui & Yin, Yansheng. (2022). Effect of Heat Input on Hydrogen Embrittlement of TIG Welded 304 Austenitic Stainless Steel. *Metals*. 12. 1943. 10.3390/met12111943.

Zhou, Chilou & Dai, Pengzhi & Wu, Hao & He, Mohan & Liu, Xianhui & Chu, Paul. (2022). Effect of the ferrite morphology on hydrogen embrittlement of MAG welded 304 austenitic stainless steel. *Applied Surface Science*. 606. 154866. 10.1016/j.apsusc.2022.154866.

Na, Tanmay & Chandra, Mukesh & Sharma, Sumit & Panda, Sudhansu. (2021). Study of Mechanical and Metallurgical Properties of Cold and Hot Reciprocating Wire TIG Welding on AISI 1035 Carbon Steel. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 102. 10.1007/s40033-021-00249-2.

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

P. Poonnayom, P. Yaemphuan, V. Wattanajitsiri, S. Triwanapong and Kittipong Kimapong. (2016). Microstructure and Wear resistance of Hard-facing Weld Metal on fc25 grey cast Iron surface.

Eakkarat Soonsun. Study on the overlay of alloy c276 by FCAW process. pp. 39-40, 2019.

Somnuk Watanasriyakul. Material Testing. Greenworldmedia, Bangkok 2549.

Payares-Asprino, Carolina. (2021). Prediction of Mechanical Properties as a Function of Welding Variables in Robotic Gas Metal Arc Welding of Duplex Stainless Steels SAF 2205 Welds Through Artificial Neural Networks. *Advances in Materials Science*. 21. 75-90. 10.2478/adms-2021-0019.

P. Anantha, N. Baskar, K. Devakumaran. (2017). A Study on Process Characteristics and Performance of Hot Wire Gas Tungsten Arc Welding Process for High Temperature Materials. *Materials Research [online]*. v. 20, n. 1 pp. 76-87. Available from: <<https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0321>>

Lashchenko GI. Combined fusion welding technologies (Review). *The Paton Welding Journal* 2012;8:29-35.

The 17th South East Asian Technical University Consortium: SEATUC 2023
23 – 24 February 2023 Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND

PHOTOS AND INFORMATION



Jongkol Srithorn received the B.E. (1999) from King Mongkot's University of Technology Thonburi, M.E. (2001) from Chulalongkorn University, and Ph.D. (2009) in Manufacturing Engineering and Operations Management from The University of Nottingham. She is currently a lecturer. Department of Industrial engineering, Suranaree University of Technology.



Kingkan Kongkanjana received a B.E. (2019). She currently studies for a Master's degree in Industrial engineering from Suranaree University of Technology. Her current research is the study of sugar cane shredder repairing for life extension by using hot-wire TIG welding process

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกึ่งกาญจน์ กองกาญจนะ เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2540 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2563 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมระบบอุตสาหการและสิ่งแวดล้อม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาเมื่อ พ.ศ. 2566 และได้ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยวิจัยในขณะที่กำลังศึกษา

ผลงานวิจัย : ได้นำเสนอบทความ เรื่อง The study of parameters affecting mechanical properties and microstructure of SS400 carbon steel and MG 316 LSI filler material by using hot- wire TIG welding process. ในงานประชุมวิชาการ The 17th South East Asian Technical University Consortium : SEATUC 2023 ในวันที่ 23 – 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และได้นำเสนอบทความเรื่องการศึกษาดูแลความปลอดภัยของเล่นเด็กในจังหวัดนครราชสีมา (The study of children's toy safety management in Nakhon Ratchasima province.) ในงานประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2566 (The conference of Industrial Engineering network : IE network 2023) ในวันที่ 11-12 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 ณ โรงแรมไพบร่ตตัน แกรนด์ พัทยา จังหวัดชลบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี