



ผลของการรีดเย็นและกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม  
อะลูมิเนียมเกรด AA7075-T651

นายวสันต์ อุดมผล

โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

ผลของการรีดเย็นและกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมอะลูมิเนียม  
เกรด AA7075-T651

นายวสันต์ อุดมผล อส.บ. (อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต)

โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบโครงการวิจัยอุตสาหกรรม

..... ประธานกรรมการโครงการวิจัยอุตสาหกรรม  
(รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

..... กรรมการ  
(ผศ.ดร.บวร โชค ผู้พัฒนา)

..... กรรมการ  
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

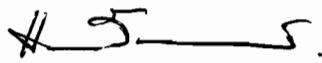
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การริ่ดเข้ันและกระบวนกรทงควมร้ันหล้ันการเข้ันต่อควมเจ้ันของแนวเข้ันอะลูมิเนียม  
เกรด AA7075-T651

นายวสันต์ อุดมผล อส.บ. (อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต)

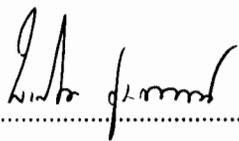
โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมกรเข้ัน  
คณะวิศวกรรมศาสตร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบโครงการวิจัยอุตสาหกรรม



.....  
(รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

ประธานกรรมการโครงการวิจัยอุตสาหกรรม



.....  
(ผศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์)

กรรมการ



.....  
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

กรรมการ

ลิขสิทธ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อโครงการวิจัยอุตสาหกรรม	ผลของการรีดเย็นและกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อความแข็งของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด AA7075-T651
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายวสันต์ อุดมผล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการเชื่อม
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้ เป็นการศึกษาผลของการรีดเย็นและกระบวนการให้ความร้อน หลังการเชื่อมที่ส่งผลต่อความแข็ง บริเวณแนวเชื่อมของอะลูมิเนียมเกรด AA7075-T651 ซึ่งการทดลองนี้ ใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุม (GMAW) โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 สภาวะ คือ การบ่มตามธรรมชาติ (Natural Aging) และการบ่มเทียม (Artificial Aging) ทั้ง 2 แบบ กระทำด้วยเงื่อนไข 2 อย่างคือ ขึ้นรูปเย็นและไม่ขึ้นรูปเย็น (Cold Working) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปเย็นเหล่านี้ ได้ทำการรีดเย็นที่ 5 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ การบ่มตามธรรมชาติได้กระทำที่เวลาแตกต่างกันดังนี้ 7 14 และ 21 วัน การบ่มเทียมได้กระทำที่เวลาแตกต่างกันดังนี้ 6 12 และ 24 ชั่วโมง ชิ้นงานทดสอบทั้งหมดได้ทำการทดสอบความแข็งที่บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ในการเชื่อม (HAZ) และเนื้อโลหะงาน (Base Metal) จากผลการทดสอบได้พบว่า ความแข็งสูงสุดของชิ้นงานที่ผ่านสภาวะการบ่มตามธรรมชาติมีความแข็ง 163.6 HV ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของการรีดเย็น ณ เวลา 21 วัน ขณะที่สภาวะการบ่มเทียมของชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น จะมีความแข็ง 175.3 HV ณ เวลาการบ่มเทียม 24 ชั่วโมง จะสังเกตได้ว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นที่ผ่านการบ่มเทียมจะมีความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่บ่มตามธรรมชาติ ดังนั้น กระบวนการขึ้นรูปเย็นจึงมีผลกระทบต่อความแข็ง และการบ่มแข็ง (Precipitation Hardening) ตรงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ในการเชื่อมของชิ้นงานที่บ่มตามธรรมชาติ ขณะที่ความแข็งของชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นกับความแข็งของชิ้นงาน ที่ผ่านสภาวะการบ่มเทียมตรงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จะมีความแข็งกลับคืนมาใกล้เคียงกับเนื้อโลหะงานเดิม

คำสำคัญ : การขึ้นรูปเส้น / การเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด 7075-T651 / การให้ความร้อนหลังการเชื่อม

Industrial Research Project Title	Effect of Cold Rolling and Postweld Heat Treatment on Hardness of AA7075-T651 Weldment
Industrial Research Project Credits	6
Candidate	Mr. Wasan Udampol
Industrial Research Project Advisor	Assoc.Prof.Dr. Chaowalit Limmaneevichitr
Program	Master of Engineering
Field of Study	Welding Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2549

#### Abstract

This objective of industrial research project is to study effects of cold rolling and postweld heat treatment on hardness of AA7075-T651 weldment by gas metal arc welding (GMAW) process. The experimental procedure was divided in two major conditions: postweld natural aging (PWNA) and postweld artificial aging (PWAA) of specimens. Both were done either with or without cold working process. These specimens with cold-worked condition were done at 5 , 10 or 20 percents. The PWNA were done with different aging time i.e. 7 , 14 and 21 days. The PWAA were also done with different aging time i.e. 6 , 12 and 24 hours. All specimens were tested for their hardness at weldment, heat affected zone (HAZ) and base metal (BM). It was found that the maximum hardness of sample with PWNA condition was 163.6 HV with 10 percent cold-rolled and 21 day aging time while the maximum hardness of sample with PWAA condition was 175.3 HV with as-received condition and aging time 24 hours. It appears that the as-received sample with 24 hours PWAA has higher hardness than that of PWNA condition. The cold rolling process affected on both hardness and precipitation hardening at HAZ on PWNA specimens, while the hardness of as-received samples with PWAA condition in HAZ was recovered to reach the hardness close to that of BM region.

Keywords : Cold Rolling / Welding 7075-T651 Aluminum Alloys / Postweld Heat Treatment

## กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จด้วยดี และเสร็จสิ้นสมบูรณ์ด้วยความร่วมมือ และการช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย เนื่องจากการทำวิจัยหัวข้อ “ผลของการรีดเย็นและกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อความแข็งของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด AA7075-T651” เป็นงานวิจัยที่ต้องใช้ระยะเวลาในการทดลอง และต้องใช้เครื่องมือรวมทั้งอุปกรณ์ทดลอง นอกจากนี้ยังต้องใช้เทคนิคทางด้านงานเชื่อมและด้านโลหวิทยา และที่สำคัญคือบุคคลที่มีความชำนาญในด้านต่าง ๆ ที่คอยให้คำปรึกษาในการทำวิจัยในครั้งนี้ ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณในความสนับสนุนจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เขาวลิต ลิ้มมณีจิตร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและควบคุมงานวิจัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์แนะนำในการดำเนินงานวิจัย การเขียนงานวิจัย ตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ สำหรับกำลังใจ การสนับสนุนทางด้านการศึกษาและการเรียนรู้ต่าง ๆ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องคนอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จึงขอขอบพระคุณ มา ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ญ
รายการสัญลักษณ์	ท
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฒ
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 การทำให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้น (Strengthening Mechanism)	6
2.2 การเชื่อมอะลูมิเนียม	15
2.3 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม (Postweld Heat Treatment)	27
<b>3. การดำเนินงานวิจัย</b>	<b>36</b>
3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์	36
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	41
3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง	48

<b>4. ผลการทดลอง</b>	<b>52</b>
4.1 ผลโครงสร้างมหภาคและความแข็งก่อนการเชื่อม	52
4.2 ผลความแข็งและผลโครงสร้างมหภาคจากให้ความร้อนหลังการเชื่อม	57
<b>5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	<b>73</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>85</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>86</b>
ก ผลค่าความแข็ง อะลูมิเนียม 7075 T651	87
ข ผลโครงสร้าง อะลูมิเนียม 7075 T651	112
<b>ประวัติผู้ทำวิจัย</b>	<b>153</b>

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป [1]	3
2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 7075 [7]	19
2.3 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 7020 และอะลูมิเนียมเกรด 7022 คิดเป็นร้อยละ (%) น้ำหนัก [10]	28
2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม [10]	28
2.5 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม CO <sub>2</sub> Laser Beam (LB1) (LB2) [11]	34
2.6 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม ทั้งสแตนเลสปกคลุม [11]	34
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสีแผ่นเกรด 7075-T651 ในการทดลอง (น้ำหนักคิดเป็นร้อยละ)	36
4.1 ค่าความแข็งผิวหน้าวัสดุก่อนทำการเชื่อมหน่วยเป็น HV (Face)	54
4.2 ค่าความแข็งด้านตัดขวางของวัสดุก่อนทำการเชื่อมมีหน่วยเป็น HV (Cross Section)	56
4.3 ค่าความแข็งการให้ความร้อนของชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ PWNA มีหน่วยเป็น HV	58
4.4 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ PWAA มีหน่วยเป็น HV	59
4.5 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ PWNA มีหน่วยเป็น HV	60
4.6 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ PWAA มีหน่วยเป็น HV	62
4.7 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ PWNA มีหน่วยเป็น HV	65
4.8 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ PWAA มีหน่วยเป็น HV	66
4.9 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 แบบ PWNA มีหน่วยเป็น HV	68
4.10 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 แบบ PWAA มีหน่วยเป็น HV	70
5.1 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging 7 วัน (PWNA 7 Day) มีหน่วยเป็น HV	73
5.2 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging 14 วัน (PWNA 14 Day) มีหน่วยเป็น HV	74
5.3 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging 21 วัน (PWNA 21 Day) มีหน่วยเป็น HV	76
5.4 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (PWAA 6 hr) มีหน่วยเป็น HV	77

- 5.5 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (PWAA 12 hr) มีหน่วยเป็น HV 79
- 5.6 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (PWAA 24 hr) มีหน่วยเป็น HV 80

## รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 ตัวอย่างการรีดเย็นและลักษณะเกรนที่ได้จากการรีดเย็น [3]	7
2.2 ตัวอย่างการรีดร้อนและเกรนที่ได้จากการรีดร้อน [3]	8
2.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างความหยาบในการรีดระหว่างแรงที่พันทราภัยกับความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งจากความเร็วต่ำและสูงขึ้น [4]	9
2.4 การเปรียบเทียบความแตกต่างความหยาบในการรีดระหว่างแรงที่ใช้กับความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งจากความเร็วต่ำและสูงขึ้น [4]	9
2.5 การเปรียบเทียบความแตกต่างความหยาบในการรีดระหว่างการใส่แผ่นงานกับความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งที่ระดับลดลง [4]	10
2.6 การเปรียบเทียบความแตกต่างความหยาบในการรีดระหว่างการใส่แผ่นงานกับความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งที่ระดับลดลงสูง [4]	11
2.7 การเปรียบเทียบความแตกต่างในการใช้ความเร็วหมุน 0.826 เมตรต่อวินาที ช่วยลดได้ถึงร้อยละ 48 ซึ่งผิวลูกกลิ้งมีความหยาบ 0.3 $\mu\text{m}$ [4]	11
2.8 การเปรียบเทียบความแตกต่างความหยาบที่ผิวหน้าแผ่นงานที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาทีกับการลดลงถึงร้อยละ 56 ที่ผิวลูกกลิ้งมีความหยาบ 1.8 $\mu\text{m}$ [4]	12
2.9 แสดงการเปรียบเทียบการหล่อและการรีดที่ร้อยละ 50 และกรรมวิธีการเชื่อมแบบ FSW [5]	13
2.10 การเปรียบเทียบ โครงสร้างวัสดุที่หล่อมา กับ โครงสร้างจากศูนย์กลางรอยเชื่อม [5]	14
2.11 การเปรียบเทียบ โครงสร้างระหว่าง วัสดุที่ผ่านการหล่อมา และวัสดุที่ผ่านการรีดมา ร้อยละ 50 [5]	15
2.12 หลักการเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุม [6]	15
2.13 อุปกรณ์การเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุม [6]	16
2.14 ลักษณะการถ่ายเทโลหะในการเชื่อมแบบอาร์คแก๊สปกคลุม ชนิดถ่ายเทโลหะแบบพ่นเป็นละออง [6]	17
2.15 การเร่งให้เกิดการตกตะกอน ทำให้มีความแข็งแรงกระจายตัวไป 50-70 nm [7]	20
2.16 Dark Field จาก TEM แสดงการเกิดการตกตะกอนขนาด 10-20 nm ในวัสดุ [7]	20
2.17 เกรนสม่ำเสมอในรอยเชื่อมที่นูนออกมา [7]	21
2.18 ขอบเขตของรอยนูนจากแนวเชื่อมที่มีขนาดเกรนที่ละเอียดมากจากกรรมวิธีการเชื่อม FSW [8]	23
2.19 อัตรา Strain ที่ 490 องศา ณ $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ [8]	24

2.20	อัตรา Strain ที่ 490 องศา ณ $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ เปรียบเทียบโดยใช้ผล Xing Gang [8]	25
2.21	ตัวอย่างชิ้นงานที่เกิดการยึดที่อัตรา Strain ที่ 490 องศาเซลเซียส [8]	25
2.22	การเปลี่ยนแปลงความเค้น โดยอัตราการยึดตัวประมาณ 22 [8]	26
2.23	ความแข็งที่อุณหภูมิสูง จากการจำลองในการใช้เงื่อนไขทั้ง 2 แบบในการเชื่อม โดยผ่านกระบวนการ การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Post Weld Artificial Aging โดยรูป (a) คือ อะลูมิเนียม 7020 และรูป (b) คือ อะลูมิเนียม 7022 [10]	30
2.24	สิ่งที่เกิดขึ้นกับ โครงสร้างแผ่นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ได้จากการมอง EDS [11]	32
2.25	แสดงเศษเล็ก ๆ ที่มองจาก EDS ในรูปที่ 2.31 [11]	33
2.26	โครงสร้างของรอยเชื่อมแบบ Laser Beam 1 (LB1) [11]	33
2.27	ความแข็งหลังจากการเชื่อม	34
2.28	ผลของความแข็งที่ได้จากการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 26 ชั่วโมง [11]	35
3.1	เครื่องรีดเย็น (Cold Rolling Machine)	37
3.2	เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Chemical Emission Spectrometer)	38
3.3	เครื่องเชื่อมแก๊สเฉื่อยปกคลุม (Metal Inert Gas Welding Machine)	38
3.4	เตาไฟฟ้าชนิดขดลวดต้านทาน (Electric Resistance Furnace)	39
3.5	เครื่องตรวจสอบความแข็ง (Microhardness)	40
3.6	กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Microscope)	40
3.7	ลักษณะการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี (Chemical Emission Spectrometer Testing)	41
3.8	ทิศทางการรีด	41
3.9	ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5	42
3.10	ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10	42
3.11	ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20	43
3.12	ตำแหน่งการกวดความแข็งผิวหน้าและด้านตัดขวางชิ้นงาน และตำแหน่งการตัดชิ้นงาน เพื่อนำไปตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคจากการรีดเย็น	44
3.13	ลักษณะการเตรียมรอยต่อ	44
3.14	(1) และ (2) เป็นการจับยึดชิ้นงาน (3) และ (4) เป็นการดำเนินการเชื่อม	45
3.15	แผนภูมิการทดลอง	47
3.16	ตำแหน่งจุดกดชิ้นงาน	49
3.17	การตรวจเช็คความแข็ง	50

- 4.1 ตำแหน่งการตัดชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (1) คือผิวหน้า (2) คือด้านตัดขวาง และ (3) คือด้านข้าง ตามลำดับ 52
- 4.2 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานที่ไม่รีดเย็นก่อนทำการเชื่อม ที่กำลังขยาย 100X 53
- 4.3 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ก่อนทำการเชื่อม ที่กำลังขยาย 100X 53
- 4.4 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ก่อนทำการเชื่อม ที่กำลังขยาย 100X 53
- 4.5 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ก่อนทำการเชื่อม ที่กำลังขยาย 100X 54
- 4.6 ตำแหน่งการกวดความแข็งผิวหน้าชิ้นงาน 54
- 4.7 กราฟความแข็งผิวหน้าชิ้นงานก่อนการเชื่อม 55
- 4.8 โครงสร้างด้านตัดขวางชิ้นงาน 7075-T6 [11] 55
- 4.9 ตำแหน่งการกวดความแข็งด้านตัดขวางชิ้นงาน 56
- 4.10 กราฟความแข็งด้านตัดขวางชิ้นงานก่อนการเชื่อม 56
- 4.11 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณรอยเชื่อมด้านขวา ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น โดยให้ความร้อนแบบ PWNA 7 วัน จาก (1) เป็นเนื้อเชื่อม (2) และ (3) เป็นขอบแนวเชื่อม และ (4) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 50X และ 100X 57
- 4.12 กราฟความแข็งการให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานไม่ได้รีดเย็นแบบ PWNA 58
- 4.13 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวาง บริเวณรอยเชื่อมด้านซ้ายชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น โดยให้ความร้อนแบบ PWAA 6 hr จาก (1) และ (4) เป็นขอบแนวเชื่อม (2) เป็นเนื้อเชื่อม (3) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 50X และ 100X 59
- 4.14 กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ PWAA 60
- 4.15 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณรอยเชื่อมด้านซ้ายชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ PWNA 14 Day จาก (2) เป็นเนื้อเชื่อม (1) และ (4) เป็นขอบแนวเชื่อมและ (3) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 50X และ 100X 61
- 4.16 กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ PWNA 62
- 4.17 กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ PWAA 63
- 4.18 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณรอยเชื่อมด้านขวาชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 โดยให้ความร้อนแบบ PWAA 12 hr จาก (1) เป็นเนื้อเชื่อม (2) และ (3) เป็นขอบแนวเชื่อม และ (4) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 50X และ 100X 63
- 4.19 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณรอยเชื่อมด้านขวาชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 โดยให้ความร้อนแบบ PWNA 7 วัน จาก (1) เป็นเนื้อเชื่อม (2) และ (3) เป็นขอบแนวเชื่อม (4) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 50X และ 100X 64
- 4.20 กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ PWNA 66

4.21	โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณรอยเชื่อมด้านซ้ายชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ PWAA 12 hr จาก (2) เป็นเนื้อเชื่อม (1) และ (4) เป็นขอบแนวเชื่อม (3) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X และ 100X	67
4.22	กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ PWAA	67
4.23	โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณรอยเชื่อมด้านขวาชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 โดยให้ความร้อนแบบ PWNA 7 วัน จาก (1) เป็นเนื้อเชื่อม (2) และ (3) เป็นขอบแนวเชื่อม (4) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X และ 100X	69
4.24	กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 แบบ PWNA	70
4.25	โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณรอยเชื่อมด้านซ้ายชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 โดยให้ความร้อนแบบ PWAA 12 hr จาก (1) และ (4) เป็นขอบแนวเชื่อม (2) เป็นเนื้อเชื่อม (3) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X และ 100X	71
4.26	กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 แบบ PWAA	71
5.1	กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 7 วัน	74
5.2	กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 14 วัน	75
5.3	กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 21 วัน	76
5.4	กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง	78
5.5	กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง	79
5.6	กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง	81
5.7	สมบัติทางกลและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการรีดเย็น และการอบคืนตัว [12]	82
5.8	เฟสไดอะแกรมอะลูมิเนียม สังกะสี [14]	83

### รายการสัญลักษณ์

PWNA	=	Postweld Natural Aging
PWAA	=	Postweld Artificial Aging
T76	=	การผ่านกระบวนการอบคลายความเค้น
T73	=	การผ่านกระบวนการทางความร้อนและบ่มแข็งให้วัสดุต้านทานการกัดกร่อน
T6	=	การผ่านกระบวนการทางความร้อนเร่งให้ตกตะกอน
TX51	=	การผ่านกระบวนการยืดขยาย
T651	=	การผ่านกระบวนการอบอ่อนและยืดขยายคลายความเค้น
FSW	=	กรรมวิธีการเชื่อมโดยใช้การเสียดสี
GMAW	=	การเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุม
HAZ	=	บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม
LBW	=	กรรมวิธีการเชื่อมโดยใช้ลำแสงเลเซอร์

### ประมวลคำศัพท์และคำย่อ

Stress	=	ความเค้น
Strain	=	ความเครียด
Dislocation	=	เส้นระนาบอะตอม
Concentration	=	จุดรวมพลังงานความหนาแน่นสูง
Slop	=	การลาดเอียงของเส้นตรง
Equiaxed	=	โครงสร้างการแข็งตัวที่ละเอียด
Second – Phase	=	เฟสทุติยภูมิ
Dendritic	=	เซลล์โครงสร้างการเริ่มต้นแข็งตัว
Spatter	=	สะเก็ดเชื่อม
Slag	=	ขี้ตะกรัน
Weldability	=	ความสามารถในการเชื่อม
Lack of Fusion	=	การกัดขอบรอยหลอมลึก
Hot Crack	=	การแตกร้อน
Blowholes	=	โพรงอากาศ
Viscosity	=	ความหนืด
Precipitation	=	การตกตะกอน หรือ การบ่มแข็ง
Postweld Heat Treatment	=	กระบวนการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเพื่อปรับปรุงสมบัติวัสดุ
Dwell	=	เวลาที่ใช้กดชิ้นงาน

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้อะลูมิเนียมมีบทบาทในการใช้งานด้านอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ซึ่งมีทั้งอะลูมิเนียมหล่อ (Cast Aluminum) และอะลูมิเนียมขึ้นรูป (Wrought Aluminum) ในที่นี้จะกล่าวถึงอะลูมิเนียมขึ้นรูป (Wrought Aluminum) ซึ่งถูกนำมาใช้งานในการเชื่อมมากกว่า มีการแบ่งกลุ่มตามส่วนผสมหลัก ออกเป็น 8 กลุ่มด้วยกัน ซึ่งจะมีการแบ่งโดยใช้ตัวเลขหลักพัน เป็นตัวบอกส่วนผสมหลัก เช่น 1xxx , 2xxx , 3xxx , 4xxx , 5xxx , 6xxx , 7xxx และ 8xxx อะลูมิเนียมขึ้นรูป (Wrought Aluminum) ยังได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่นำกลับมาปรับปรุงสมบัติทางความร้อนได้อีก (Heat Treatable) ได้แก่กลุ่ม 2xxx , 6xxx และ 7xxx และประเภทที่นำกลับมาปรับปรุงสมบัติทางความร้อนอีกไม่ได้ (Non Heat Treatable) ได้แก่กลุ่ม 1xxx , 3xxx , 4xxx , 5xxx และ 8xxx ในกลุ่มแรกจะถูกนำมาใช้กับการเชื่อมมากที่สุด เพราะสามารถที่จะนำกลับมาให้ความร้อน เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ให้ดีขึ้นได้ ในกลุ่มนี้ 6xxx จะถูกใช้งานสำหรับการเชื่อมมากที่สุด เพราะว่าการเชื่อมได้ง่าย เนื่องจากส่วนผสมหลักที่มีแมกนีเซียมกับซิลิคอน (Al-MgSi) ซึ่งต่างจาก 2xxx ที่มีส่วนผสมหลักเป็นทองแดง (Al-Cu) และ 7xxx ที่มีส่วนผสมหลักเป็นสังกะสี (Al-Zn) ในทางการค้า 2xxx และ 7xxx จะมีราคาที่สูงกว่า 6xxx เพราะมีความแข็งแรงที่สูงกว่า จึงถูกนำไปใช้งานเฉพาะด้าน เช่น 7xxx ที่เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมและสังกะสี จะถูกนำไปใช้กับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น โครงสร้างเครื่องบิน ด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวของอะลูมิเนียมชนิดนี้ จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะนำมาทำการทดลองเพื่อหาวิธีการที่จะเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้นไปอีก โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปเย็น และได้เลือกกรรมวิธีการรีดเย็นมาใช้ในการทดลองซึ่งจะทำให้จุดครากของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น สามารถนำไปใช้กับงานที่มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ ที่ต้องการความแข็งแรงสูง และนำมาทำการทดลองเชื่อม โดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding) เป็นกรรมวิธีการทดลองในการต่อวัสดุ ซึ่งการเชื่อมอะลูมิเนียม มักจะมีปัญหาเกี่ยวกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการเชื่อม จะมีความแข็งแรงลดลงต่ำกว่าตัววัสดุมาก การทดลองนี้จึงได้มีการปรับปรุงสมบัติ หลังการเชื่อมโดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อม โดยใช้กรรมวิธีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging และการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging เพื่อปรับปรุงสมบัติจากการเชื่อมที่ส่งผลต่อการนำไปใช้งานให้ดียิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลกระทบทางโครงสร้างมหภาค จากการรีดเย็นอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 7075-T651 ในกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุม
2. เพื่อศึกษาสมบัติความแข็งแรงในเนื้อเชื่อมและวัสดุ จากการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ระหว่างการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging และการให้ความร้อน หลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบทางโครงสร้างมหภาค จากการรีดเย็นของแผ่นโลหะผสมอะลูมิเนียมและสังกะสี และผลกระทบสมบัติทางความแข็งแรงจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อม โดยงานวิจัยนี้มีขอบเขตการทดลองดังนี้

1. วัสดุที่นำมาทำการทดลอง จะเป็นอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 7075-T651 ขนาดกว้าง 6 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร หนา 0.65 เซนติเมตร
2. ใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุม โดยใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุม ลวดเชื่อม 5356 เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร
3. ใช้กรรมวิธีการรีดเย็น (Cold Rolling) เป็นกระบวนการที่ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้น
4. ใช้การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging และการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Post Weld Artificial Aging
5. ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ด้วยกล้องจุลภาค Micro Scope
6. ตรวจสอบความแข็งแรงด้วยเครื่อง Micro Hardness

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบว่า อะลูมิเนียม 7075-T651 มีความแข็งแรงขึ้น โดยการรีดเย็นที่ส่งผลต่อความแข็งแรงจากกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุม
2. ทำให้ทราบว่าความแข็งแรงที่ดีที่สุด จากการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ระหว่างการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Post Weld Natural Aging และการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Post Weld Artificial Aging
3. นำผลความแข็งแรงที่ได้ เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์และใช้งานได้จริง

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### อะลูมิเนียม (Aluminum)

ในปี พ.ศ. 2497 สมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา (The Aluminum Association of America) ได้จัดโลหะผสมของอะลูมิเนียมขึ้นรูป เป็นหมวดหมู่ตามส่วนผสมและใช้ตัวเลข 4 หลักเป็นสัญลักษณ์ในการกำกับชื่อของโลหะ ซึ่งในปัจจุบันการกำกับชื่อตามนี้เป็นที่รู้จัก และใช้กันอย่างแพร่หลายจนเป็นสากลนิยม ในความหมายของตัวเลข 4 หลัก เลขหลักที่หนึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุดในการแสดงกลุ่มของโลหะผสมซึ่งมีอยู่ 8 กลุ่ม ตามตารางที่ 2.1 เช่น 1xxx แทนโลหะที่มีอะลูมิเนียมไม่น้อยกว่าร้อยละ 99.0 โดยน้ำหนัก เลขหลักที่สองใช้สำหรับกำกับ เมื่อมีการดัดแปลงส่วนผสมของโลหะให้ผิดไปจากโลหะผสมดั้งเดิม ตัวเลข 0 แสดงว่าเป็นโลหะผสมดั้งเดิม ตัวเลข 1-9 แสดงว่า เป็นส่วนที่ได้จากการดัดแปลงให้ผิดไปจากเดิม เช่น โลหะผสม 2024 (4.5Cu , 1.5Mg , 0.5Si , 0.1Cr) เทียบกับโลหะผสม 2218 (4.0Cu , 2.0Ni , 1.5Mg , 0.2Si) ซึ่งสังเกตได้ว่าโลหะผสม 2218 มีนิกเกิลผสมเพิ่มเติมเข้าไป ตัวเลขหลักที่สามและหลักที่สี่ใช้แสดงชนิดย่อย ๆ ของโลหะผสมที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ความแตกต่างนี้ มักจะเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกัน เช่น โลหะผสม 2014 (4.4Cu , 0.8Si , 0.8Mn , 0.4Mg) และโลหะผสม 2017 (4.0Cu , 0.8Si , 0.5Mn , 0.5Mg , 0.1Cr) เป็นต้น เฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1xxx ตัวหลักที่สามและหลักที่สี่จะแสดงปริมาณของอะลูมิเนียมที่เป็นจุดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ที่ปรากฏภายหลังร้อยละ 99 เช่น 1060 และ 1080 หมายถึงอะลูมิเนียมขึ้นรูปที่มีอะลูมิเนียมอยู่ร้อยละ 99.60 และร้อยละ 99.80 ตามลำดับ [1]

### ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป [1]

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1xxx	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99.0
2xxx	ทองแดง
3xxx	แมงกานีส
4xxx	ซิลิกอน
5xxx	แมกนีเซียม
6xxx	แมกนีเซียม กับ ซิลิกอน
7xxx	สังกะสี
8xxx	ไททาเนียม กับ ลิเทียม

อะลูมิเนียมที่ใช้ในโครงการนี้ เป็นอะลูมิเนียมที่ได้มาจากการขึ้นรูป (Wrought Aluminum) และจัดอยู่ในประเภทที่นำกลับมาปรับปรุงสมบัติทางความร้อนได้อีก (Heat Treatable) จะถูกนำมาใช้กับการเชื่อมมากที่สุด เนื่องจากทำการเชื่อมได้ง่ายกว่าประเภทที่นำกลับมาปรับปรุงสมบัติทางความร้อนอีกไม่ได้ (Non Heat Treatable) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกเกรด 7xxx ที่มีส่วนผสมหลักเป็นสังกะสี (Al-Zn) เพราะมีความแข็งแรงที่สูงที่สุดในประเภทที่นำกลับมาปรับปรุงสมบัติทางความร้อนได้อีก จึงถูกนำไปใช้กับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงน้ำหนักเบา เช่น งานด้านอากาศยาน เป็นต้น จึงอะลูมิเนียมเกรดนี้มาทำการทดลองเพื่อหาวิธีการที่จะเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้นไปอีก โดยกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) และได้เลือกกรรมวิธีการรีดเย็น (Cold Rolling) เป็นกรรมวิธีเพิ่มความแข็งแรง และนำไปเชื่อม โดยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding) และปรับปรุงสมบัติหลังการเชื่อม โดยให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging และการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging

คุณลักษณะของกลุ่ม 7xxx คือ สามารถนำกลับมาให้ความร้อนได้ มีความแข็งแรงที่สูงมาก โดยเฉพาะสมบัติความเหนียวที่มีสูง ค่าประมาณความแข็งแรงทางกลจะอยู่ในช่วง 220 - 610 MPa หรือ 32 - 88 ksi และมีสมบัติการต่อที่ดี เนื่องจากส่วนผสมของ อะลูมิเนียม สังกะสี แมกนีเซียม ทองแดง ทำให้เกิดความแข็งแรงที่สูงมาก ซึ่งในทางการค้าไม่นำมาต่อ โดยกรรมวิธีการเชื่อมจะเป็นการห้ามุดแทน ด้านการใช้งานในอุตสาหกรรม เมื่ออดีตที่ผ่านมา จะใช้ทำโครงสร้างเครื่องบิน ด้วยขั้นตอนการออกแบบที่เข้มงวดต่อการแตกร้าว ประกอบกับการพัฒนาสมบัติความเหนียว ดังเช่น อะลูมิเนียมเกรด 7015 , 7175 และ 7475 สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมเหล่านี้ ได้มีการควบคุมปริมาณสิ่งเจือปนโดยเฉพาะ ธาตุเหล็กและซิลิคอนให้มีจำนวนเพียงเล็กน้อย เหมาะสมกับความแข็งแรงและความเหนียวที่ด้านทานการแตกหัก ในด้านการต้านทานการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศจะด้อยกว่ากลุ่ม 5xxx และ 6xxx ด้วยเหตุนี้ในการซ่อมแซม จึงต้องทำการเคลือบสำหรับอะลูมิเนียมที่เป็นแผ่นงานบางหรือแผ่นงานหนา ดังนั้นจึงมีกรรมวิธีการ ทำให้แข็งแรงด้วยการพัฒนา และปรับปรุงการต้านทานการสึกกร่อนและในรูปแบบการแตกเมื่อเกิดการกัดกร่อนจากความเค้น (Stress Corrosion Cracking) และได้ให้สัญลักษณ์เป็น T76 และ T73 ตามลำดับ กรรมวิธีการทำให้แข็งแรงนี้จำเป็นกับงานที่มีการรับแรงด้านข้าง หรือเรียกอีกอย่างว่า ด้านความหนา ซึ่งแรงเหล่านี้เกิดจากชั้นบรรยากาศ หรือสภาพแวดล้อมทั่ว ๆ ไป การใช้งานอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ จึงถูกกำหนดมาเพื่อใช้เป็นโครงสร้างปีก ส่วนประกอบอื่นที่รับแรงของเครื่องบิน [2] อะลูมิเนียมที่ผ่านการกรรมวิธีการให้ความร้อนเพื่อปรับปรุงสมบัติ นำมาขึ้นรูปโดยกรรมวิธีขึ้นรูปแบบเย็นและการทำ Artificial Aging ทำให้เกิดการเร่งในการตกตะกอน เพื่อทำให้แข็งแรงจะแทนสัญลักษณ์ด้วย T6 สำหรับแผ่นที่ถูกรีดเย็นมาจะแทนสัญลักษณ์ด้วย TX51 ส่วนอะลูมิเนียมที่ผ่านกรรมวิธีเบื้องต้นของการทำให้แข็งแรง

T6 และนำมาคลายความเค้น โดยการทำให้ขยายร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 2 จะแทนสัญลักษณ์ด้วย T651 [2]

## 2.1 การทำให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้น (Strengthening Mechanism)

โลหะสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยกลไกการสร้างความแข็งแรงได้หลายวิธี เมื่อโลหะผ่านการขึ้นรูปเย็น และเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร เช่น การรีดเย็น จะส่งผลทำให้เกิดการขัดกันเอง และทำให้ลดโอกาสเกิดการเคลื่อนตัวของ Dislocation ในลำดับต่อไป และจำเป็นต้องใช้แรงกระทำที่สูงขึ้น ซึ่งหมายถึงความแข็งแรงสูงขึ้นนั่นเอง ในงานปัจจุบันนี้ มีกระบวนการที่ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้น (Strengthening Mechanism) เพื่อที่จะนำอะลูมิเนียม ไปใช้กับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง ในงานด้านต่างๆ ทำได้โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. การลดขนาดเกรนลง (Grain Size Reduction  $\sigma_y = \sigma_o + kyd^{-1}$ )
2. การขึ้นรูปเย็น
  - การเพิ่มความเค้นเมื่อเส้น Dislocation เพิ่มความหนาแน่นมากขึ้น
3. การทำให้เกิดความแข็งโดยสมบรูณ์ (Solid Solution Hardening)
4. การทำให้แข็งแรงโดยทำให้เกรนเป็นเพิลไลต์ (Hardening Due to Pearlite  $\sigma_y = \sigma_o + KS^{-1}$ )
5. การอบชุบและการอบปรับสภาพทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Quenching and Tempering)
6. การแข็งตัวเนื่องจากการตกตะกอน (Precipitation Hardening) [3]

### 2.1.1 การขึ้นรูปแบบเย็น

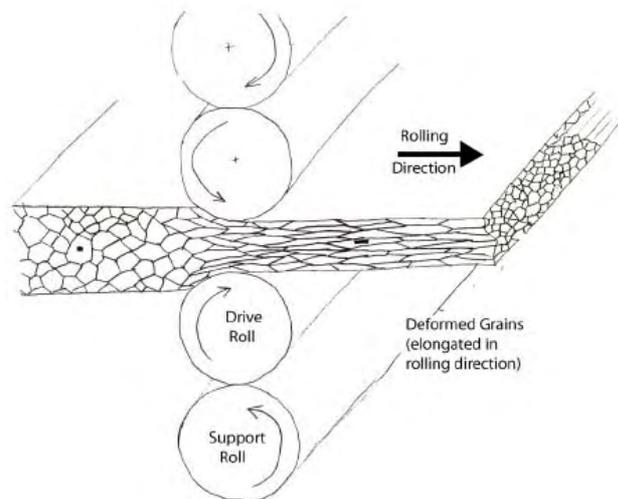
การขึ้นรูปแบบเย็น หมายถึง กระบวนการรีดขึ้นรูป เพื่อให้วัสดุหรือโลหะ เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชนิดถาวรในที่ ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ทั้งนี้โดยไม่ทำให้เกิดผลึกใหม่ขึ้น กระบวนการขึ้นรูปแบบเย็นจะประกอบไปด้วย

1. การดัดงอ (Bending)
2. การรีดเย็น (Cold Rolling)
3. การอัดรีด (Extruding)
4. การบีดงอ (Squeezing)
5. การรีดขึ้นรูป (Shear Spinning)
6. การตักยืด (Stretching)
7. การงอตรง (Straight Bending)
8. การตีขึ้นรูป (Shot Penning)
9. การขึ้นรูปพิมพ์ลึก (Deep Drawing)

10. การกระแทกขึ้นรูป (Forging)

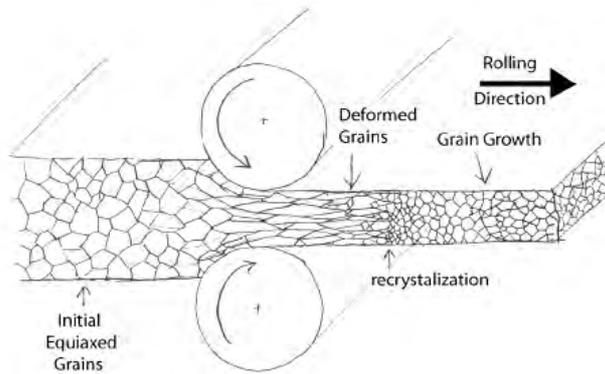
11. การแท่งขึ้นรูป (Hobbling)

จะเห็นได้ว่าการขึ้นรูปเย็นเป็นวิธีการหนึ่ง ที่ช่วยทำให้วัสดุมีความเค้นสูงขึ้น เมื่อเส้น Dislocation ในวัสดุเพิ่มความหนาแน่นมากขึ้น ข้อดีของกระบวนการขึ้นรูปเย็นคือ จะใช้อุณหภูมิน้อย ในการขึ้นรูป (ประมาณ 20 – 25 องศาเซลเซียส) มีความสวยที่ผิวชิ้นงานเรียบสะอาดและเงางาม ชิ้นงานที่ได้มีขนาดที่เที่ยงตรงและแน่นอนสม่ำเสมอดีมาก ได้ความแข็งแรงและแข็งมากขึ้นกว่าเดิม แต่จะมีข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปแบบเย็นคือ จะมีการเกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) มาก โดยจะทำให้เกรนของโลหะเกิดการแตกหักได้ง่าย อีกทั้งต้องลงทุนเสียค่าใช้จ่ายมาก ในการติดตั้งเครื่องจักรที่มีกำลังมาก ๆ และที่มีขนาดใหญ่ [3] การขึ้นรูปเย็นเป็นกลไกที่แตกต่างจากการขึ้นรูปร้อน (Hot Working) ของเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของออสเตไนท์ เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น เนื่องจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การแข็งตัวเนื่องจากการเร่งให้มีการเกิดการตกตะกอนทำให้แข็งแรงขึ้น กล่าวคือ สารละลายของแข็งที่อิ่มตัว เกิดเป็นตะกอนละเอียดกระจายอยู่ภายในผลึกเกรน ลักษณะของการแข็งตัวเนื่องจากการตกตะกอนเปลี่ยนแปลงไปตามธาตุโลหะที่ผสมอยู่



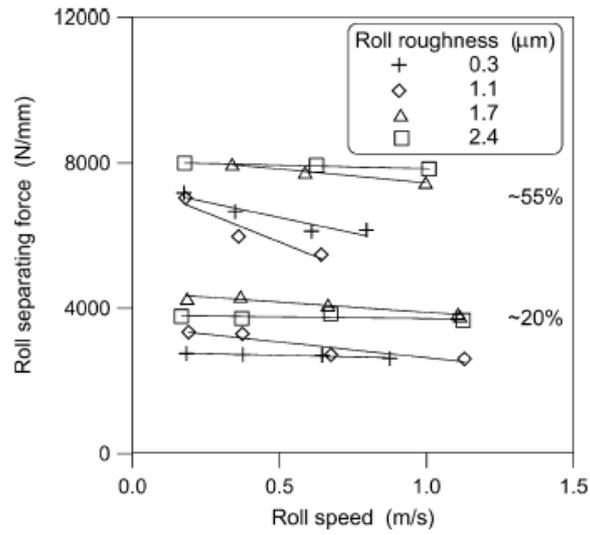
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการรีดเย็นและลักษณะเกรนที่ได้จากการรีดเย็น [3]

การรีดเย็น หมายถึง การขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความยาว เช่น โลหะแผ่น เหล็กเส้น ใอบีม จากโลหะแท่งหรือโลหะแผ่น ซึ่งการรีดร้อน เป็นการรีดที่อุณหภูมิสูง สำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่ หรือรีดยาก ผิวชิ้นงานจะหยาบ การรีดเย็นเป็นการรีดที่อุณหภูมิต่ำสำหรับงานขนาดเล็ก บาง ผิวชิ้นงานจะเรียบสวยมีความเที่ยงตรงสูง การควบคุมอุณหภูมิระหว่างการรีด โดยเฉพาะในขั้นสุดท้าย มีความสำคัญเพราะจะมีอิทธิพลต่อโครงสร้างโลหะ [3]

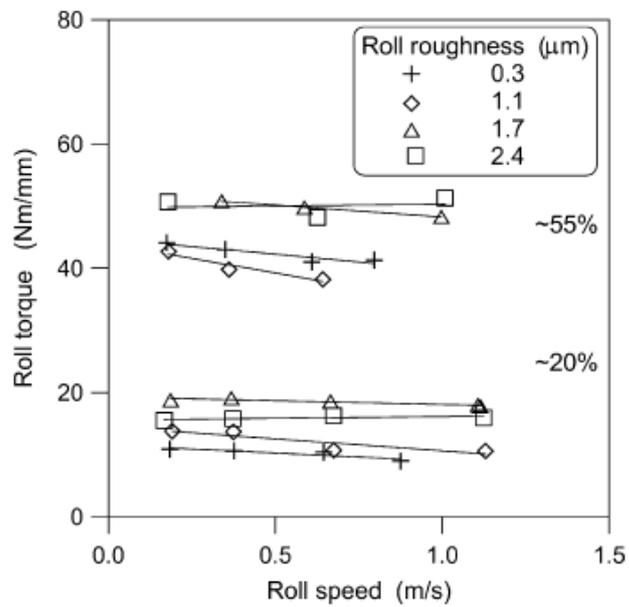


รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการรีดร้อนและเกรนที่ได้จากการรีดร้อน [3]

ผลกระทบของความขรุขระจากงานรีดเย็น จากกำลังการรีดม้วน ที่ดันแผ่นไปตามทิศทางการรีด ได้ถูกศึกษาโดยการใช้ น้ำมันหล่อลื่นร้อยละ 5 กับ Oley Alcohol เพิ่มเข้าไป แผ่นอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ยาวที่รีดเย็นที่ความเร็วระดับต่าง ๆ ในการลดขนาดจะใช้ลูกกลิ้งที่มีความหยาบ ซึ่งจะมีการพันทรายไล่ตามขนาด 0.3-2.4  $\mu\text{m}$  และกำลังการพันที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.3

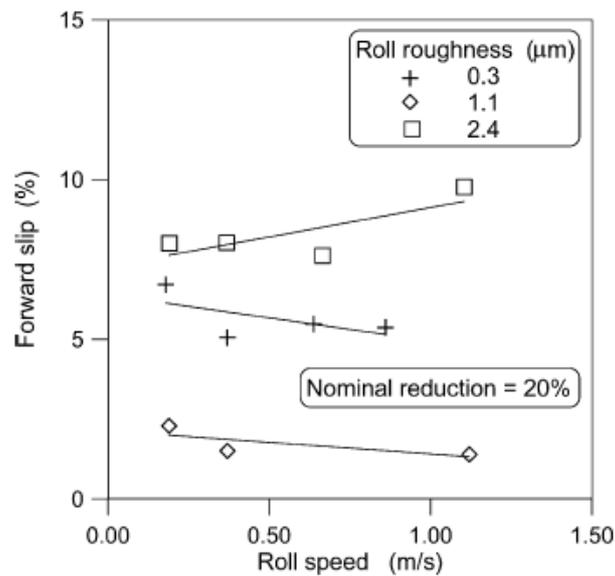


รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างความหยาบในการรีดระหว่างแรงที่พื้นทรายกับความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งจากความเร็วต่ำและสูงขึ้น [4]

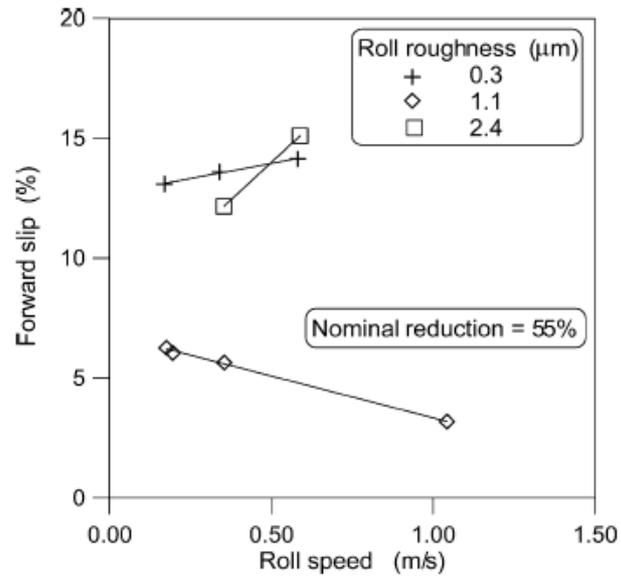


รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบความแตกต่างความหยาบในการรีดระหว่างแรงที่ใช้กับความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งจากความเร็วต่ำและสูงขึ้น [4]

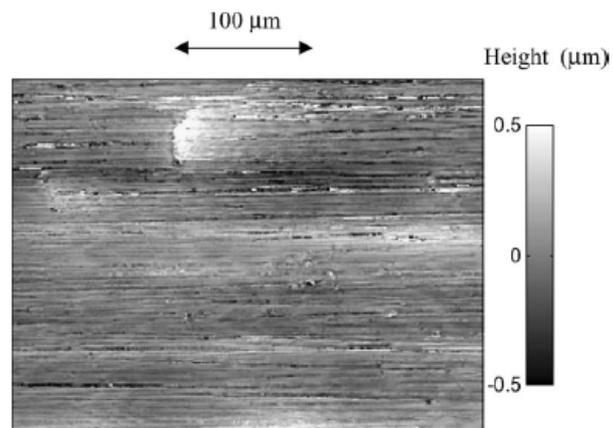
รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า แรงจากการรีดแผ่นงานและการวัดชิ้นงานที่ยื่นออกไป จากการรีด สัมประสิทธิ์ของการเสียดสี ถูกคำนวณโดยใช้สูตรของ R. Hill ที่ได้ทำการวิจัย โดยใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์กับสภาพที่เป็นพลาสติกที่ มหาลย์ออกฟอร์ดในลอนดอนประเทศอังกฤษ และปัจจัยในการเสียดสีที่อยู่ด้านบนที่กดชิ้นงาน การรีดและผิวหน้าจากการรีดที่ตรวจสอบดู ภายใต้งู๋เอินไข กรรมวิธีที่ขาดหายของการสัมผัส ที่เกิดขึ้นได้มีการศึกษากลไกการเสียดสี ความขรุขระที่สูงดูเหมือนสารหล่อลื่นไม่เพียงพอที่บริเวณแถวหน้า ขณะที่สมบัติความเหนียว เป็นรอยยาวกับทุกชิ้นงาน และรอยจากแรงมาจากความเร็วในการรีด จะเกิดการกระจายของรอยยาว ที่มาจากการต้านทานเสียดสี เพิ่มขึ้นความขรุขระเพิ่ม ทำให้สิ่งนั้นเกิดจากความเร็วในการรีด แผ่นงานอะลูมิเนียมที่ได้จากการรีด ผลที่ได้จะอยู่ในรูปที่ 2.5 โดยการใช้น้ำมันแร่ที่ใช้เป็นสารหล่อลื่น ส่วนในรูปที่ 2.6 จะเป็นผลจากการรีดที่ลดความขรุขระลง พร้อมกับการลดอัตราการผลิต เนื่องจากว่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรอิสระของการเสียดสีและปัจจัยการเสียดสี ในลักษณะแปรผกผันกันเช่นเดียวกัน กับกลไกการตัดชิ้นงานที่เครื่องตัดด้วยเครื่องขนาดใหญ่ การเกิดของรอยไถลกับชิ้นงานที่มีความอ่อนกว่า



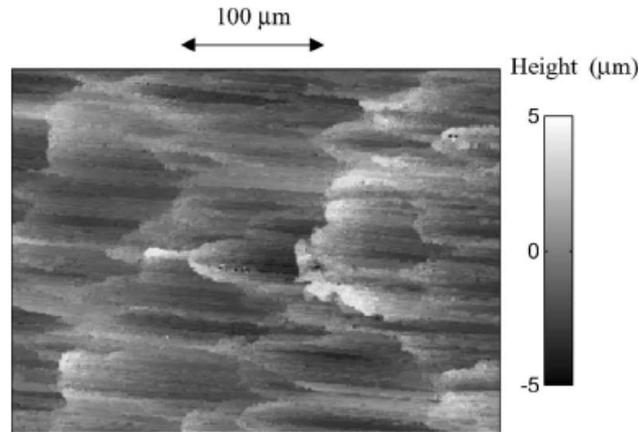
รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบความแตกต่างความหยาบในการรีดระหว่างการใส่แผ่นงานกับความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งที่ระดับลดลง [4]



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบความแตกต่างความหยาบในการรีดระหว่างการใช้แผ่นงานกับความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งที่ระดับลดลงสูง [4]



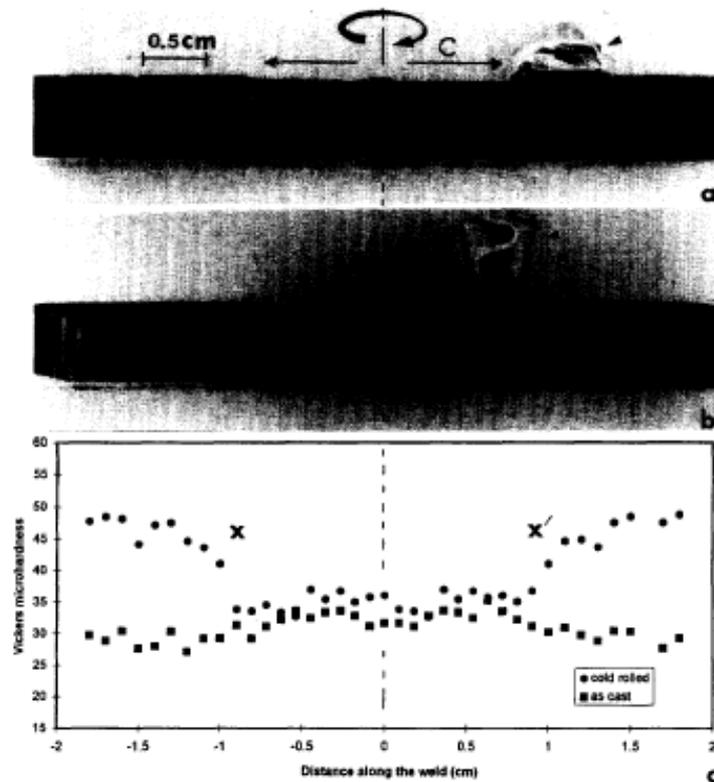
รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบความแตกต่างในการใช้ความเร็วหมุน 0.826 เมตรต่อวินาที ช่วยลดได้ถึงร้อยละ 48 ซึ่งผิวลูกกลิ้งมีความหยาบ 0.3 μm [4]



**รูปที่ 2.8** การเปรียบเทียบความแตกต่างความหยาบที่ผิวหน้าแผ่นงานที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาทีกับการลดลงถึงร้อยละ 56 ที่ผิวลูกกลิ้งมีความหยาบ 1.8  $\mu\text{m}$  [4]

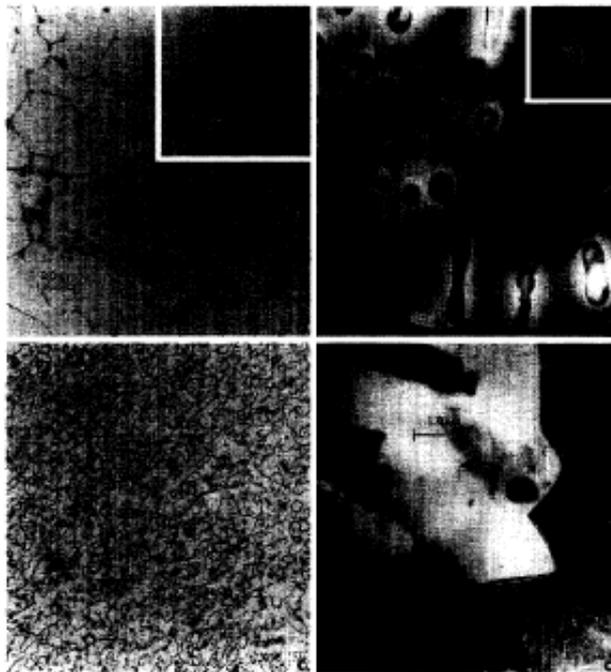
การรีดจะมีความขรุขระ 1.1  $\mu\text{m}$  การกระจายของความต้านทานแรงเสียดทาน ดูเหมือนจะระดับเดียวกัน สิ่งนั้นจะเกิดจากกำลังของแรงกดจากการรีด ที่ยังคงสูงกว่าการต้านทานของลูกกลิ้งที่เป็นโลหะที่ทำให้เกิดรูปร่าง จากรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 จะเห็นความเป็นไปได้ของการใช้สารหล่อลื่นที่ดูเหมือนกันจะบ่งบอกกับผลกระทบในผลที่ได้ ตัวแปรของกรรมวิธีการรีด จะส่งผลโดยตรงว่างานจะมีผิวขรุขระมากน้อยเพียงไร ผิวหน้าลูกกลิ้งจะเรียบน้อย ถ้ามีแรงการกดน้อยถ้ามีการรีดที่ยาวจะแสดงให้เห็นถึงความชัดเจน อย่งไรก็ดี การรีดออกไปตามยาวตรงๆ ที่ผิวหน้าขนาดกลไกการต้านทานจะสามารถเปลี่ยนให้เห็นได้จากผิวหน้าของการรีด ดังนั้นที่ดีที่สุดคือ การรีดความเร็วที่สูง จะให้ผิวงานที่เรียบกว่า แผ่นชิ้นงานที่ผ่านการหลอมมา และนำไปรีดเย็นที่ร้อยละ 50 [4] และจากการเชื่อม FSW นี้ ได้มีการเปรียบเทียบ 2 แบบ (จากการหลอมมาและการรีดเย็นร้อยละ 50) ในช่วงที่มีความแข็งดก้างเปลี่ยนไป และความสัมพันธ์ทางโครงสร้าง ที่ได้จากผลกระทบของการคืนตัวอย่างรวดเร็วในกรรมวิธีการเชื่อมแบบ FSW ส่วนผสมของแผ่นงาน 1100 ในข้อกำหนดจากการหลอมมานั้น ทำให้เกิด Equiaxed เซลล์โครงสร้าง Dendritic (แสดงถึงเศษของ Second Phase) เฉลี่ยขนาดได้ 28  $\mu\text{m}$  ที่กลับทางจากการรีดเย็นที่ลดลงมาร้อยละ 50 แผ่นงาน ที่หลอมมาและแผ่นงานที่รีดเย็นมา เมื่อโดนกดความหนาจากปกติ 0.63 เซนติเมตร และทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธี FSW ที่มีช่วงความเร็ว การหมุนเกินช่วงที่วัสดุไม่สิ้นเปลือง เหล็กคาร์บอนปลายแหลม และที่ต่าง ๆ ในการแปลงการไหล (หรือความเร็วอีกด้าน) การตั้งค่าสัมประสิทธิ์ของ FSW ได้กำหนดให้มีความสอดคล้องกับตัววัสดุคือ อะลูมิเนียมเกรด 6061 และอะลูมิเนียมเกรด 1100 จะใช้ความเร็วในการหมุน 400 รอบต่อนาที และสัมพันธ์กับความเร็วกลับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที (ความเร็วในการเชื่อมจะสัมพันธ์จาก 2.4 นิ้วต่อนาที) และได้มีการขัดชิ้นงานเพื่อดู

โครงสร้างทางโลหะวิทยา พบขนาดออกไซด์เล็ก ๆ ของอะลูมิเนียมและซิลิกาที่มีลักษณะของสารแควนลอยด์ที่กลุ่มลอยตัว การวัดความแข็งจะกระทำหลังจากการกัดกรด



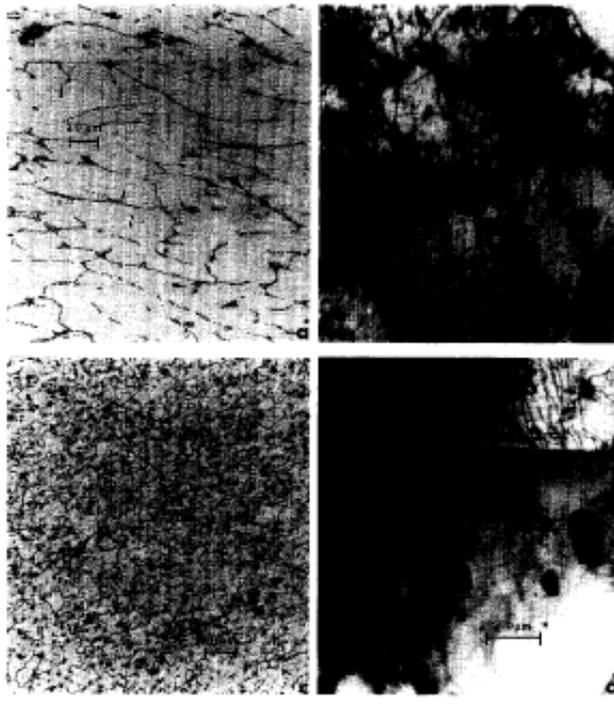
รูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบการหล่อและการรีดที่ร้อยละ 50 และกรรมวิธีการเชื่อมแบบ FSW [5]

ภาพตัดขวางที่ 2.9 (a) และ (b) ตามความสัมพันธ์การหาความแข็ง ภาพที่ 2.9 (c) ตามเส้นผ่านศูนย์กลางแสดง ในรูปที่ 2.9 (a) และ (b) แม้ว่าจะไม่แตกต่างในทางความร้อน ที่ไม่ขึ้นกับเวลา สำหรับ 2 รอยเชื่อม สิ่งนั้นมันซึ่งแตกต่างจากความแข็งในบริเวณรอยเชื่อม การรีดเย็นร้อยละ 50 และบริเวณที่เชื่อมโดย FSW ที่มีความแข็งกว่าวัสดุที่หล่อมาอย่างเห็นได้ชัด แต่รอยเชื่อมจะแสดงถึงความชัดเจน (x) และกระจาย (x') เขตของการเปลี่ยนแปลง ระหว่างตัววัสดุหลักกับรอยเชื่อม ซึ่งเขตของการเปลี่ยนนี้ที่รอยเชื่อมจะแตกต่างจากการสังเกตใน FSW ในการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึกเกรนจะเกี่ยวพันกับการเปลี่ยนเขต ในบริเวณรอยเชื่อมที่ใกล้ขนาดเกรนเล็ก ๆ จะเห็นได้ชัดเจน ซึ่งขนาดเกรนใหญ่ ๆ จะเกี่ยวพันกับเขตของการกระจาย



**รูปที่ 2.10** การเปรียบเทียบโครงสร้างวัสดุที่หล่อมา กับโครงสร้างจากศูนย์กลางรอยเชื่อม [5]

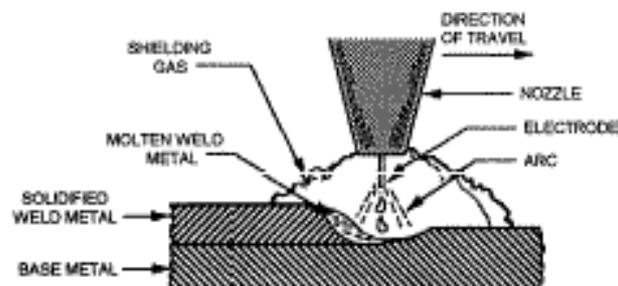
การกลับมาตกผลึกที่แสดงอยู่ในภาพเป็น Equiaxed ในรอยเชื่อม การเร่งให้เกิด Dendritic ในวัสดุโลหะงาน ซึ่งเป็นเนื้อเดียวกันที่กระจายไปภายในเนื้อเชื่อม ช่วยลดโครงสร้างเกรนที่จะกลับมาตกผลึก (รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบ (a) และ (b) และ (c) และ (d)) สามารถจะอธิบายในรูปที่ 2.10 (b) นั้นคือ เศษเฟสที่ 2 ในโลหะชิ้นงานที่จำเป็นภายใต้ ผลึกที่เป็น 4 เหลี่ยม จะเป็นหน้าตัดหรือว่าหลายหน้าตัดอื่น ๆ โดยความแตกต่าง ในการเร่งให้เกิดการรวม สำหรับบริเวณกรรมวิธีการเชื่อมแบบ FSW จะแสดงในรูปที่ 2.17 (d) ได้อธิบายการคำนึงถึงผลที่ตามมา จากความไม่สม่ำเสมอของกรรมวิธี FSW ซึ่งมันดูเหมือนว่าจะมีจำนวนเศษ ที่จะรวมตัวในการหลอมรวมในรอยเชื่อม จากการ FSW อย่างไม่ดี สิ่งนั้นไม่ได้แสดงให้เห็นว่า จะมีการกลับมาตกผลึกอีกครั้ง หรือจะมีการเกาะตัวสำหรับการตกผลึกในบริเวณที่มีการ FSW นี้เป็นการกำหนดปัจจัยที่ก่อให้เกิดการผลึกคืนให้เกิดพลาสติก ปรับเข้าหาจากบริเวณที่มีการ FSW รูปแบบนั้น จะเป็นเมตริกในชิ้นงานที่ผ่านการหล่อมาคือ จะมีคุณสมบัติ เซลล์ของเส้น Dislocation จะคล้าย ๆ ในการหล่อ (โครงสร้าง Columnar) 1100 และการเจือขนาดจะมีขนาด  $4\ \mu\text{m}$  สามารถดูในรูปที่ 2.10 (d) โครงสร้างของเกรนที่กลับมาตกผลึกในบริเวณที่มีการ FSW มีจำนวนความหนาแน่นที่ต่ำ และรูปที่ 2.11 เป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างวัสดุ [5]



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่าง วัสดุที่ผ่านการหล่มา และวัสดุที่ผ่านการรีดมา ร้อยละ 50 [5]

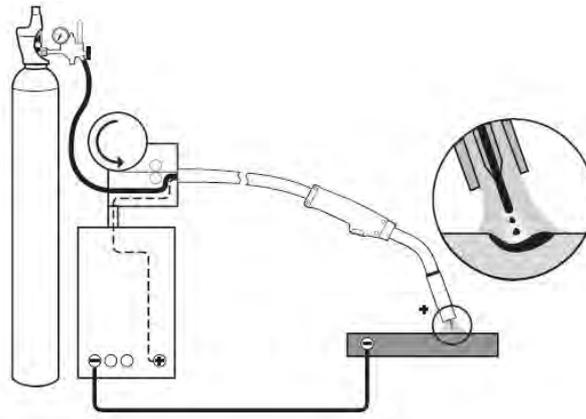
## 2.2 การเชื่อมอะลูมิเนียม

กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุม (Gas Shielded Arc Welding) การเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุม เป็นวิธีการเชื่อมซึ่งใช้แก๊สปกคลุม (Shielding Gas) ฟันปกคลุมบริเวณรอยเชื่อม เพื่อป้องกันการอาร์คและบ่อหลอมละลายไว้จากบรรยากาศ แก๊สปกคลุมที่ใช้ตามปกติ คือ แก๊สฮีเลียม แก๊สอาร์กอน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สผสมระหว่างแก๊สต่าง ๆ



รูปที่ 2.12 หลักการเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุม [6]

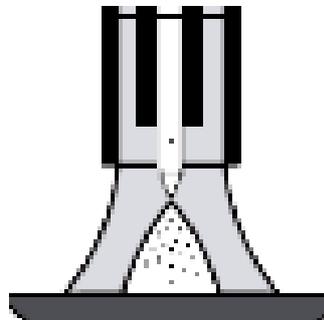
การเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุม ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะแบ่งออกเป็นสองแบบ ได้แก่ ไม่สูญเสียอิเล็กโทรด (Non Consumable Electrode Type) และ แบบสูญเสียอิเล็กโทรด (Consumable Electrode Type) ซึ่งการเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุม คุณลักษณะของการเชื่อมจะขึ้นอยู่กับแก๊สที่ใช้ทั้งการเชื่อมแบบไม่สิ้นเปลืองอิเล็กโทรด และแบบสิ้นเปลืองอิเล็กโทรด ในการเชื่อมแบบสิ้นเปลืองอิเล็กโทรดจะใช้เส้นลวด (Welding Wire) เป็นอิเล็กโทรด และใช้แก๊สเพื่อปกคลุม เช่น แก๊สฮีเลียม แก๊สอาร์กอน ซึ่งจะเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า การเชื่อมแบบมิก (MIG ; Metal Inert Gas Arc Welding) การเชื่อมแบบสิ้นเปลืองอิเล็กโทรดอีกแบบหนึ่งเรียกว่า การเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปกคลุม (Co<sub>2</sub> Arc Welding) การเชื่อมแบบนี้ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ แก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สฮีเลียม เป็นแก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมในปัจจุบัน การเชื่อมแบบสิ้นเปลืองอิเล็กโทรดใช้แก๊สปกคลุม มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การเชื่อมแบบ Gas Metal Arc Welding (GMAW) ซึ่งมีองค์ประกอบตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 อุปกรณ์การเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุม [6]

การเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding) การเชื่อมแบบนี้ ลวดเชื่อมจะถูกป้อนติดต่อกัน โดยอาร์คจะเกิดขึ้นระหว่างปลายลวดเชื่อมกับโลหะงาน แก๊สคลุมอาร์คที่ใช้คือ ฮีเลียม อาร์กอน หรือแก๊สผสมระหว่าง ฮีเลียมกับอาร์กอน บางครั้งอาจผสมแก๊สออกซิเจนไว้ในแก๊สผสมประมาณร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 5 หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 20 กับแก๊สอาร์กอน เพื่อช่วยทำให้อาร์คได้เรียบ ผลที่ได้ของกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุมมีลักษณะดังนี้

1. เนื่องจากอาร์คของการเชื่อมมีขนาดเล็ก แต่รุนแรง อาร์คได้เรียบและมีสะเก็ดเชื่อม (Spatter) เพียงเล็กน้อยจึงทำให้เชื่อมได้ง่าย
2. เนื่องจากใช้กระแสที่มีความหนาแน่นสูง เป็นกระแสเชื่อม จึงทำให้ลวดเชื่อมมีอัตราการหลอมเหลวสูง ซึ่งมีผลทำให้มีประสิทธิภาพของการเชื่อมสูง
3. มีขี้ตะกรัน (Slag) เกิดขึ้นน้อย
4. รอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุม มีความเหนียว มีอำนาจการยึดหยุ่น ไม่มีรูพรุน และไม่ไวต่อการเกิดรอยแตกร้าว และข้อบกพร่องอื่น ๆ น้อย รอยเชื่อมจึงมีสมบัติความพิเศษกว่ารอยเชื่อม ซึ่งได้จากการเชื่อมแบบอื่น การเชื่อมแบบอาร์คใช้แก๊สปกคลุมใช้ใน งานเชื่อมด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะเหมาะสมสำหรับเป็นกรรมวิธีเชื่อมเหล็กกล้าที่มีคุณภาพ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กความเค้นแรงดิ่งสูง และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ที่ไม่สามารถเชื่อม โดยกรรมวิธีแบบอื่น ๆ



**รูปที่ 2.14** ลักษณะการถ่ายเทโลหะในการเชื่อมแบบอาร์คแก๊สปกคลุม ชนิดถ่ายเทโลหะแบบผันเป็นละออง [6]

รูปที่ 2.14 เป็นรูปแบบการถ่ายเทโลหะ เริ่มต้นจากเป็นหยดน้ำ จนถึงเป็นละอองผัน จะมีหลายสถานะ เช่น เกิดจากการเลือกใช้ชนิดขั้วกระแสจากเครื่องเชื่อม เครื่องเชื่อมกระแสตรงที่มีแรงเคลื่อนคงที่ เป็นคุณลักษณะของเครื่องเชื่อม ซึ่งใช้กับการเชื่อมแบบอาร์คแก๊สปกคลุม

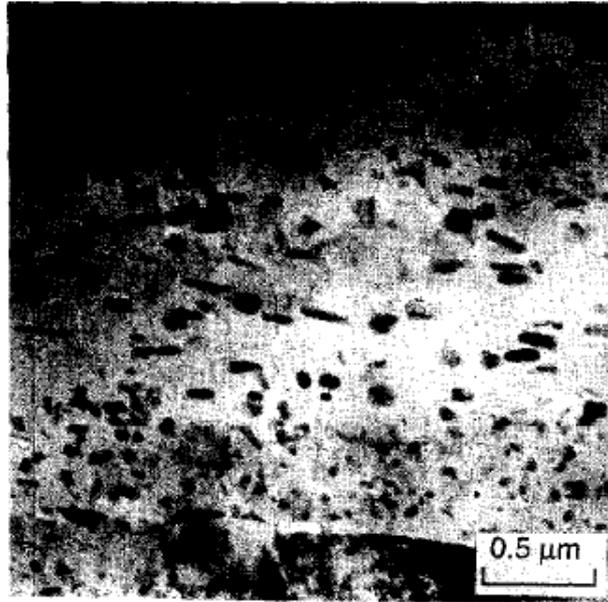
อะลูมิเนียมและโลหะผสมอะลูมิเนียม มีสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากเหล็กกล้า ข้อแตกต่างนี้จะเห็นได้ชัดเจนในเรื่องความสามารถในการเชื่อม (Weldability) เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียม มีความร้อนจำเพาะ และความสามารถในการนำความร้อนที่สูง ดังนั้นการให้ความร้อน เพื่อให้เพียงบางส่วน of ชิ้นงานหลอมเหลวนั้นทำได้ยาก วัสดุชนิดนี้จะเกิดออกไซด์ได้ง่าย และออกไซด์อะลูมิเนียม ( $Al_2O_3$ ) ที่เกิดขึ้น มีจุดหลอมเหลวสูง ออกไซด์เหล่านี้จะป้องกันไม่ให้น้ำโลหะที่เติมลงไป ในรอยต่อหลอมเข้ากับโลหะชิ้นงาน (Lack of Fusion) เนื่องจากอะลูมิเนียมมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง ดังนั้นชิ้นงานจะบิดตัวได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการแตกร้อน (Hot Crack) ได้ง่ายด้วย อีกทั้งความสามารถในการรวมตัวกับก๊าซไฮโดรเจน ในโลหะผสมอะลูมิเนียม ในสภาพของเหลวที่แตกต่างไปจากสภาพที่เป็นของแข็งมาก ในขณะที่แข็งตัวจะเกิดควันลอยออกมา ดังนั้น ถ้าหากอัตราการแข็งตัวสูง ๆ เกิดขึ้น ควันที่ลอยออกมาก็ตกติดอยู่ในเนื้อวัสดุ ทำให้เกิดเป็นรูอากาศ (Blowholes) ขึ้น อะลูมิเนียมหรือโลหะผสมอะลูมิเนียมมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ดังนั้น พวกวัสดุเปลวปลอม ซึ่งอยู่ในบ่อหลอมละลายจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำโลหะได้ยาก นั่นคือวัสดุเปลวปลอมเหล่านั้น จะคงอยู่ในรอยเชื่อม เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ และน้ำโลหะที่หลอมมีความหนืด (Viscosity) จำทำให้บริเวณหลอมตัวและหยดได้ง่าย ปัญหาของการเชื่อมอะลูมิเนียมหรือโลหะผสมอะลูมิเนียมเหล่านี้ สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้วิธีการเชื่อมแบบแก๊สเฉื่อย (Inert Gas Welding) นอกจากนี้การใช้กรรมวิธีใหม่ ๆ ตลอดจนใช้เทคนิคที่เหมาะสมก็สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้มาก ซึ่งจะเป็นผลให้ความสามารถในการเชื่อมอะลูมิเนียมดีขึ้น การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) เป็นกระบวนการที่ได้รับความร้อนจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อมที่ป้อนเข้ามาแบบต่อเนื่องกับชิ้นงาน ทำให้ลวดเชื่อมและชิ้นงานบริเวณการอาร์คหลอมละลายรวมตัวกันเป็นแนวเชื่อม บริเวณการอาร์คจะได้รับการปกคลุมจากแก๊ส ที่จ่ายมาจากแหล่งกำเนิดภายนอก แบ่งออกตามชนิดของแก๊สคลุมได้ 2 ชนิด คือ การเชื่อมมิก (MIG : Metal Inert Gas) ใช้แก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอนหรือฮีเลียม หรือทั้งสองอย่างผสมกันมาใช้เป็นแก๊สปกคลุม อีกชนิดหนึ่งคือ การเชื่อมแมก (MAG : Metal Active Gas) จะใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สปกคลุม [6] ในการเชื่อม Friction Stir (FSW) นั้นได้มีเทคนิคใหม่ ๆ เพื่อใช้ต่อรอยต่อของอะลูมิเนียม จากเทคนิคพื้นฐานของการเสียดสีจะเกิดความร้อนที่ผิวหน้าทั้ง 2 ผิวระหว่างชิ้นงานที่จะทำการต่อกัน ผลที่ได้จากการต่อจะทำให้เกิดความร้อนระหว่างผิวหน้าเกิดการกระจายทำให้แข็งตัว การเชื่อมแบบหลอม โดยกรรมวิธีอื่น ๆ สำหรับอะลูมิเนียม จะยากในทางปฏิบัติ การนำไปใช้ส่วนมาก จะใช้การอาร์คกับอะลูมิเนียมเกรด 2024 และจะมีขอบเขตในความสามารถของการเชื่อมอีกด้วย ซึ่งอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่ถูกแนะนำให้ใช้การเชื่อมแบบหลอม อะลูมิเนียมทั้งหมดสามารถเชื่อม โดยแรงเสียดทานได้ แต่ต้องทำการเตรียมผิวหน้าให้สะอาดหมดจด จากออกไซด์ซึ่งเป็นปัญหาหลัก การเชื่อม Friction Stir มีความพิเศษในการต่อรอยต่ออะลูมิเนียม คือ ออกไซด์ที่ผิวหน้าจะไม่เป็นปัญหา สำหรับกรรมวิธีนี้ ไม่ต้องการเทคนิคการทำความสะอาดที่พิเศษก่อนการเชื่อม ถึงแม้ว่าชิ้นงานจะได้รับ

ความร้อนเพิ่มขึ้น ระหว่างทำการเชื่อม Friction Stir อุณหภูมิจะไม่ถึงจุดหลอมเหลว บ่อหลอมละลายที่ได้จากการเชื่อม จะไม่เป็นโครงสร้าง Dendritic ซึ่งมันจะไม่ลดคุณสมบัติทางกล เครื่องมือจะเป็นชนิดวัสดุไม่สิ้นเปลือง ชิ้นงานที่ทำการเชื่อม ในการเลือกครั้งแรก การหมุนของเครื่องมือทำให้เกิดความร้อนในการเสียดสี และการเกิดพลาสติกในชิ้นงาน ประเด็นสำคัญในการประเมินการเชื่อม Friction Stir คือรอยต่อที่ดี รวมไปถึงการควบคุมโครงสร้าง และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกล ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการเชื่อมแบบหลอมเหลว ที่จะทำให้เกิดความราบเรียบเพื่อทำให้ได้รอยเชื่อมที่ดีได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง เกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกล เริ่มที่จะมีกรรมวิธีการแจ้งตัวการเชื่อม Friction Stir สามารถลดระดับความเสี่ยงที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลได้

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 7075 [7]

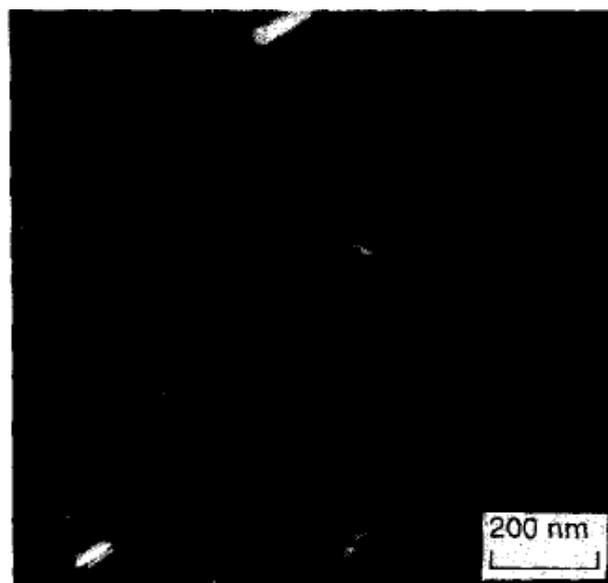
น้ำหนัก (ร้อยละ)	Al	Zn	Mg	Cu	Cr
มาตรฐาน	90.07	5.6	2.5	1.6	0.23
จากการทดสอบ	93.88	2.4	2.9	0.7	0.12

อะลูมิเนียมเกรด 7075-T6 มีสาเหตุการเกิดเกรนที่ยาวขึ้น เนื่องจากชนิดของ Fe และ Si ที่มีอยู่เป็นส่วนประกอบที่เด่นชัดของโลหะเบา (LM) การกลับมาดตะกอน ทำให้มีความแข็งแรงนั้นสามารถมองเห็นจาก TEM เพียงทางเดียวแสดงในรูปที่ 2.15



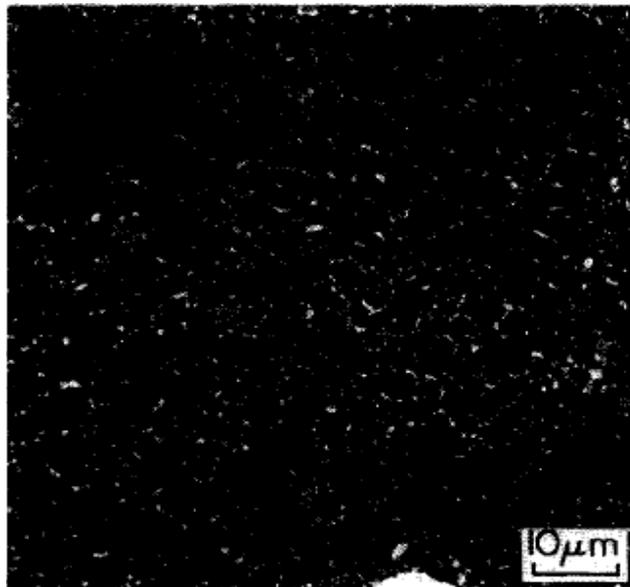
รูปที่ 2.15 การเร่งให้เกิดการตกตะกอน ทำให้มีความแข็งแรงกระจายตัวไป 50-70 nm [7]

ในการศึกษานี้มี 2 กลุ่มที่มีการตกตะกอนทำให้แข็งแรงคือ 50 - 75 nm และ 10 - 20 nm ตามลำดับ รูปที่ 2.15 เป็นการตกตะกอนขนาดใหญ่ (50 - 75 nm) ตามแบบที่บ่งบอกดังเช่น  $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$  ขณะที่ตรงกันข้ามกับ Mg ( $Zn_2, AlCu$ ) อาจเป็นไปได้ทั้งหมด ไม่เพียงแต่การตกตะกอนที่มีอยู่ถึงแม้ว่า การวิเคราะห์ที่กระจายไปตามจำนวนที่ตกตะกอน แม้ว่าปฏิกิริยาเหล่านั้นใน Dark Field จะเหมือนกันกับการตกตะกอนขนาดใหญ่ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Dark Field จาก TEM แสดงการเกิดการตกตะกอนขนาด 10-20 nm ในวัสดุ [7]

สามสิ่งที่อยู่ในการตกตะกอน ที่บริเวณขอบเกรนทั้งกลุ่มจะมีขนาด 30-40 nm ที่มีลักษณะทั่วไปเป็นชิ้นเล็ก ๆ ยาว ๆ จะไม่มีการกระจาย การศึกษาจะไม่ระบุถึงสิ่งเหล่านี้ แม้ว่าจะเกิดขึ้นก่อนที่จะศึกษา จะมีการกระตุ้นสิ่งเหล่านี้เหมือนกับประเภท  $MgZn_2$  ตำแหน่งรอยร่อนที่ได้จากการเชื่อม จะมีการกลับมาตกผลึกอีกครั้ง โดยสร้างเกรน Equiaxed ที่ละเอียดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 4 nm แสดงในรูปที่ 2.17

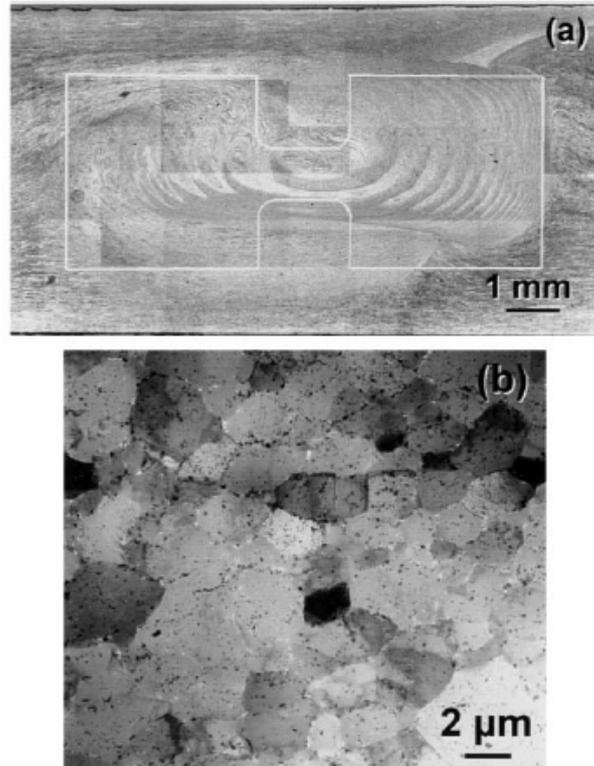


รูปที่ 2.17 เกรนสม่ำเสมอในรอยเชื่อมที่นูนออกมา [7]

การเชื่อม Friction Stir แสดงให้เห็นว่า ใช้ต่ออะลูมิเนียมเกรด 7075 ได้ แม้ว่าจะเกิดการเปลี่ยนที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม (HAZ) โครงสร้างเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมเหลวเป็นอย่างมาก จุดสำคัญในการเปลี่ยนโครงสร้างในอะลูมิเนียม 7075 ถูกตรวจสอบในการศึกษานี้ว่าจะกลับมาตกผลึก เป็นเกรนยาวที่ละเอียด (10-20 nm) ตกตะกอนให้มีความแข็งแรงในรอยร่อนที่ได้จากการเชื่อม อุณหภูมิในการใช้ Thermocouple ประมาณ 425 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงจะเอา Thermocouple ออก ซึ่งจะบอกได้ว่า ไม่ค่อยมีความแม่นยำเท่าไรนัก การเปลี่ยนโครงสร้างถูกประเมิน โดยใช้อุณหภูมิที่เบี่ยงเบน ผลที่ได้จากการตกตะกอนทั้งหมดและการกลับมาตกผลึกทำให้แข็งแรง  $\{Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$  และ  $Mg(Zn_2, AlCu)\}$  เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส และสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส ขนาดของการกระจายของ 2 รูปแบบ ของการกลับมาตกตะกอนทำให้แข็งแรง ในเขตที่มีผลกระทบกับคุณสมบัติทางกล ทำให้รู้ว่าจะต้องต่ำกว่า

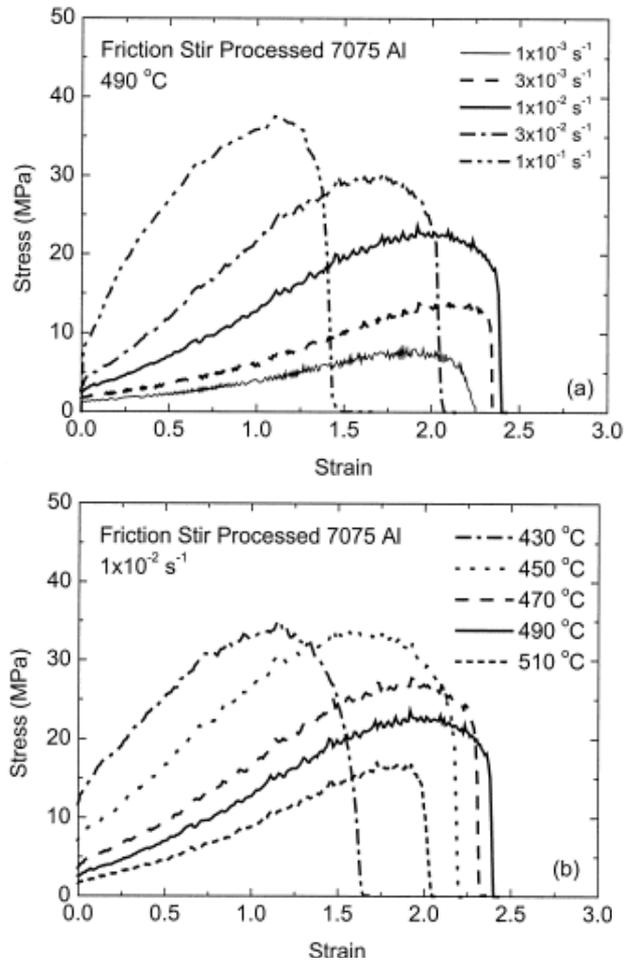
400 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมเกรด 7075 ถูกต่อโดยการใช้นวัตกรรมวิธีการเชื่อม Friction Stir ซึ่งมีความแตกต่างจากการเชื่อมแบบหลอม สิ่งนี้ได้แสดงให้เห็นการแข็งตัว จากการหลอมเหลว คุณลักษณะของเนื้อเชื่อม จะกลับมามีผลึกอีกครั้งมีขนาดเกรน 7-4  $\mu\text{m}$  ความหนาแน่น ในการเคลื่อนที่ของรอยุน ที่ได้จากการเชื่อมจะต่ำกว่าโลหะ การตกตะกอนบ่งชี้ว่าจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อกระบวนการเชื่อมเสร็จสิ้นลง โดยมีจำนวนขนาดใหญ่กลับมามีผลึก ขณะที่เย็นลง กรรมวิธีเช่นนี้ เป็นการต่อที่ไม่ใช่การเชื่อมอะลูมิเนียมแต่เป็นการหลอมเพียงภายนอก ที่เริ่มมีการหล่อหลอมของโครงสร้าง [7]

อีกประเด็นหนึ่ง ในการใช้งานโดยทั่วไป ของอะลูมิเนียมที่เกิดจากการเป็น Superplastic จะมีปัญหา กับปริมาณที่พอเหมาะ ในอัตราการยืดที่จะเกิด Superplasticity โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในทางการค้า อะลูมิเนียม จะขึ้นอยู่กับกระบวนการเครื่องมือที่ให้ความร้อน เป็นตัวแปรที่จะทำให้ได้ผลที่ดีที่สุด กรรมวิธีการเชื่อม Friction Stir ทำให้เกิดรอยต่อที่น่าสนใจสำหรับอะลูมิเนียม เทคนิคที่ว่านี้ ได้ถูกพัฒนาโดย The Welding Institute (TWI) การหมุนของเครื่องมือตามขวาง ส่งผลให้เกิดการเกิดพลาสติกที่หนาแน่นขึ้น ถึงว่าจะใช้แบบ “Stirring” แหล่งกำเนิดความร้อนจะถูกผลิตโดยการเสียดสีระหว่างบ่าเครื่องมือและผิวปลายโลหะ ดังแบบที่การเกิดพลาสติกของเครื่องมือในการสัมผัสกัน ผลนี้จากขอบเขตที่มีการเคลื่อนไหวนั้น จะทำให้ได้เกรนที่ละเอียดมากในแถวเดียวขนาดเกรน 3  $\mu\text{m}$  ในอะลูมิเนียม 7075 กรรมวิธีนี้เป็นที่ยอมรับว่าทำได้ง่ายที่ทำให้ได้เกรนละเอียด Friction Stir Processing (FSP) จึงถูกใช้ในอะลูมิเนียม 7075 เพราะว่าผลที่ได้รับจะเพิ่มสมบัติ Superplastic อัตรา Strain ที่พอเหมาะในการเกิด Superplastic ที่  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  มีอุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียส สำหรับ FSP ในการเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ช่วยปรับเกรนได้เป็นอย่างมากซึ่งมีผลกับอัตรา Strain ผลที่ได้นี้เป็น สิ่งกระตุ้นความเป็นไปได้ที่น่าสนใจ สำหรับตัวอย่างการใช้เทคนิค FSP ในการเพิ่มขนาดเกรนกับ สมบัติโลหะ ที่ถูกเลือกมาเป็นแผ่นเกรด 7075-T651 มีความหนา 6.35 มิลลิเมตร เชื่อมต่อแบบ แนวเดียวและเตรียมชิ้นงานไว้ศึกษา Tensile หนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร



**รูปที่ 2.18** ขอบเขตของรอยุนจกแนวเชื่อมที่มีขนาดเกรนที่ละเอียดมากจากกรรมวิธี  
การเชื่อมFSW [8]

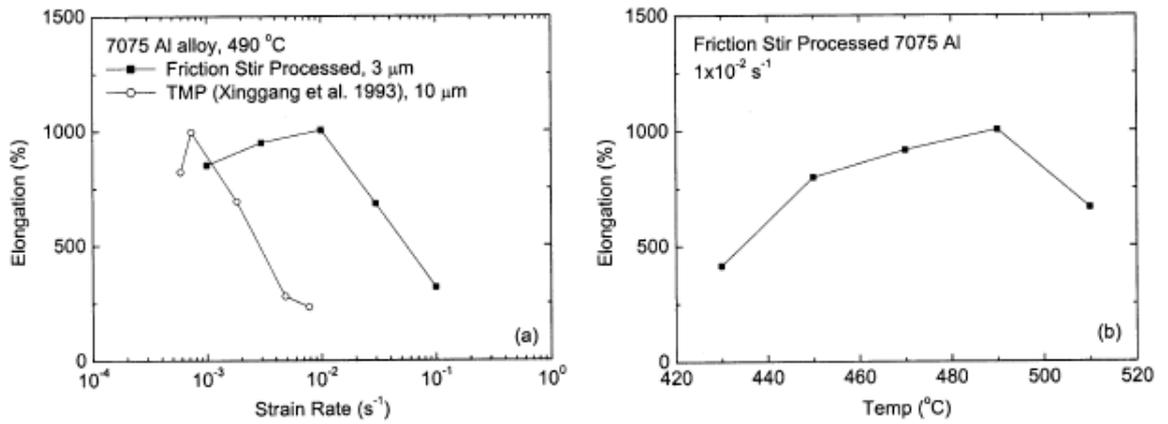
จากรูปที่ 2.18 (a) จะใช้เทคนิคการสร้างภาพ ให้มองเห็นได้ทางสายตาถึง ภาพตัดตามขวางของ  
ขอบเขตกรรมวิธี Friction Stir รอยุนของ Friction Stir จะแสดงขอบเขตที่ชัดเจน ของการเกิด  
Plastic ที่กว้าง มีเกรนที่ละเอียดเกิดขึ้น ซึ่งละเอียดกว่าโครงสร้างที่เป็นมันทั่วๆ ไป รูปที่ 2.18 (b)  
ได้แสดงความชัดเจนของแหล่งที่เกิด TEM ของขอบเขตรอยุนที่ได้จากการเชื่อม ขนาดเกรน  
โดยเฉลี่ยถูกคำนวณ โดยเส้นกึ่งกลางที่การปฏิบัติหยุด (ขนาดเกรน =  $1.78 \times$  เส้นกึ่งกลางที่หยุด)  
มีขนาด  $\pm 0.4 \mu\text{m}$



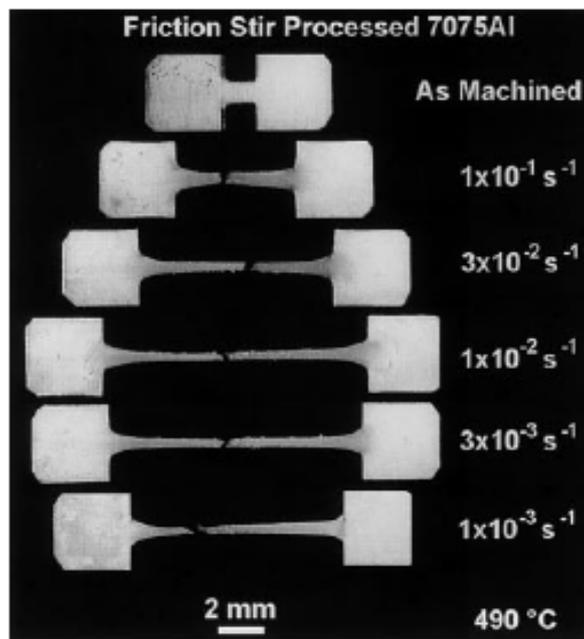
รูปที่ 2.19 อัตรา Strain ที่ 490 องศา ณ  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  [8]

ลักษณะของ Stress Strain ในรอยนูน FSP ได้แสดงในรูปที่ 2.19 บทบาทของอัตรา Strain และ อุณหภูมิ อัตรา Strain ที่พอเหมาะที่เกิดการขยายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียส เป็น  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  อย่างไรก็ดี อัตรา Strain ที่สม่ำเสมอจนถึง  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  ได้มีความสัมพันธ์กับการขยายตัวที่สูงมาก Curves ที่ได้ทั้งหมดจะแสดงถึง Strain ที่กว้างทำให้แข็งขึ้น ระดับถัดไปของ Strain ทำให้ Stress สูง จากที่กำหนด ณ อัตรา Strain จาก  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  อุณหภูมิที่พอเหมาะ สำหรับการขยายตัวที่สูงสุด ที่ 490 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงของความอ่อนตัวจากอัตรา Strain และอุณหภูมิที่แสดงใน รูปที่ 2.19 ความอ่อนตัวที่  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  ที่ 490 องศาเซลเซียส จะน้อยกว่าร้อยละ 1000 จากการ เปรียบเทียบข้อมูลของ Xing Gang ได้ถูกรวมอยู่ในรูปที่ 2.20 (a) การเพิ่มขึ้นในอัตรา Strain ที่พอเหมาะ โดยมากกว่าจำนวนเป็นสิ่งสำคัญมาก ความอ่อนตัวที่  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  ที่ 490 องศาเซลเซียส คือร้อยละ 318 จะพิจารณาสีงนั้นที่ต้องการ ความอ่อนตัวสำหรับการควบคุมการเกิดที่ต่ำกว่าร้อยละ 200 ความอ่อนตัว Superplastic ดังที่อัตรา Strain สูง อะลูมิเนียมจะเป็นสินค้าที่ดีมาก ๆ สิ่งนี้ได้แสดงความมี

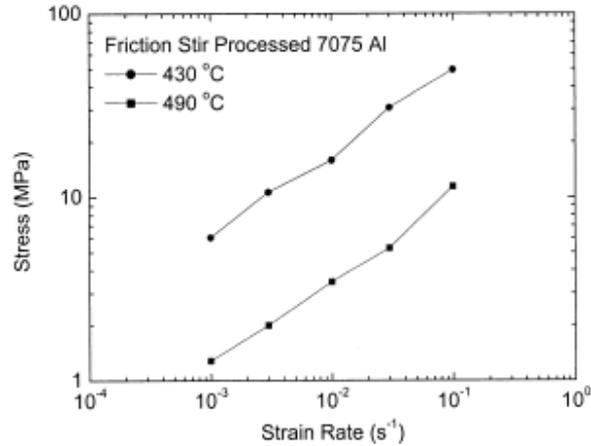
ประสิทธิภาพของกรรมวิธี Friction Stir ทำให้ค่อย ๆ ก่อเป็นโครงสร้าง ในขั้นตอนแรกนั้นจะมีหน้าที่ทำให้อัตรา Strain สูงเป็น Superplastic การเกิด Superplastic จากตัวอย่างจะเกิดที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียส ได้แสดงในรูปที่ 2.21 รูปแบบการขยายตัวในขอบเขต Gage จะเป็นชนิดที่มาจาก Superplastic



รูปที่ 2.20 อัตรา Strain ที่ 490 องศาเซลเซียส ที่ 1x10<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> เปรียบเทียบโดยใช้ผล Xing Gang [8]



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างชิ้นงานที่เกิดการยืดที่อัตรา Strain ที่ 490 องศาเซลเซียส [8]



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงความเค้น โดยอัตราการยืดตัวประมาณ 22 [8]

การเปลี่ยนแปลง Stress กับอัตรา Strain ได้แสดงในรูปที่ 2.22 ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส และ 490 องศาเซลเซียส เห็นได้ชัดจาก Stress ประมาณ 2.2 จำนวนทั้งหมดนี้ ได้ยึดถือตามทฤษฎี Stress มีองค์ประกอบ 2 ช่วง สำหรับขอบเกรนที่เคลื่อนจะสัมพันธ์กับกลไกการเกิดพลังงานที่กระตุ้น จะได้จากการประเมินค่า 239 kJ/mol จำนวนเหล่านี้ จะมากที่สุด เมื่อถูกการกระตุ้นของพลังงานจาก Lattice หรือขอบเกรนกระจายด้วยตัวเองจะมีพลังงานถึง 142 kJ/mol และ 84 kJ/mol ตามลำดับ โดยทั่วไปพลังงานในการกระตุ้นที่จะทำให้เกิด Superplasticity ในอะลูมิเนียมจะลดลง เมื่อมีการกระจายของขอบเกรน ได้มีการบันทึกสิ่งนั้นเป็นช่วงใช้ในการศึกษา ปริมาณเพียงเล็ก ๆ น้อย ๆ จาก Second Phase จะตกตะกอนโดยอาศัยอุณหภูมิ จากการเพิ่มของจำนวนเศษเล็ก ๆ น้อย ๆ ที่ตกตะกอนที่ต่ำ การทดสอบที่อุณหภูมิ จะลดพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ของ Superplastic สิ่งนี้มักมีความชัดเจนจากการกระตุ้นของพลังงาน และจะเกิดอุปสรรคในการอธิบายของปริมาณ จากสภาวะที่แสดงออกทั้งหมด จากผลในการนำเสนอเป็นจุดสำคัญ มันได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้จากการทดลองเป็นตัวอย่าง ที่เลือกใช้กรรมวิธี Friction Stir ทำให้มีอิทธิพลต่ออัตรา Strain สูงที่เกิด Superplasticity ในอะลูมิเนียมที่ใช้ในทางการค้า ในข้อเท็จจริงที่จะทำอย่างไรให้เกิด Superplasticity ตลอดทั้งความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมโดยใช้กรรมวิธี Friction Stir ซึ่งมันมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิคอันนี้ ทำให้ได้มาซึ่งเกรนที่ละเอียดมาก จากการเกิดโครงสร้างโดยตรง ในโลหะผสม ผลจากข้อมูลเหล่านี้ 3 องค์ประกอบในขั้นตอนกรรมวิธีการผลิต สามารถโนภาพได้ดังนี้ : Cast + Friction Stir Process + Superplastic Forge or Form จากผลนี้จะแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของกรรมวิธี Friction Stir ในการทำให้เกิดโครงสร้างซึ่งเป็นไปตาม อัตรา Strain สูงที่ทำให้เกิด Superplasticity ในอะลูมิเนียมที่ใช้ในปัจจุบัน ปริมาณ Superplasticity ที่พอเหมาะจะสังเกตได้ใน กรรมวิธี Friction Stir อะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียส [8]

### 2.3 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม (Postweld Heat Treatment)

Postweld Heat Treatment (PWHT) คือ การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมด้วยวิธีการต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมบัติแนวเชื่อม ในวิธีการ Postweld Heat Treatment ได้รวบรวมวิธีการต่าง ๆ ที่สามารถให้ความร้อน เพื่อปรับปรุงสมบัติ เมื่อมีความต้องการที่จะ Postweld Heat Treatment จะกระทำตาม Code เป็นข้อกำหนด ในการนำไปใช้งานตามความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปเมื่อมีความต้องการที่จะ Postweld Heat Treatment จุดประสงค์ก็เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานการแตกเปราะ และช่วยคลายความเค้นตกค้างในวัสดุนั่นเอง ผลที่ตามมาคือความแข็งแรงจากการ Postweld Heat Treatment จะลดลงและมีการเพิ่มความแข็งแรงกับตัววัสดุ [9] ในกลุ่มอะลูมิเนียมที่มีสังกะสีเป็นส่วนผสม หรือเรียกโดยทั่วไปว่า อะลูมิเนียมสังกะสี จะมีผลจากการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อม ดังเช่น พฤติกรรมที่ทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมอ่อนลงของอะลูมิเนียมเกรด 7020 และอะลูมิเนียมเกรด 7022 ในการเชื่อม โดยใช้หลักการจำลอง และการเชื่อมจริง ผลที่ได้จากการหลอมของบริเวณที่ได้รับผลกระทบ จากความร้อนของตัวโลหะสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ โซนที่มีการหลอมละลายและโซนที่ได้รับความร้อนมากเกินไป สมบัติของโซนที่มีการหลอมละลายจะมีการโตของเกรน และการกลับคืนของความแข็งแรงอีกครั้ง ซึ่งอะลูมิเนียม 7022 จะมีความต้านทานแนวโน้มของการทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมอ่อนลงมากกว่าอะลูมิเนียม 7020 ในระหว่างโซนที่มีการหลอมละลาย และโซนที่ได้รับความร้อนมากเกินไป มันเป็นการหลอมที่มีระดับของการทำให้อ่อนลง ที่ขึ้นอยู่กับทำให้พลังงานที่ใช้ในการเชื่อม ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมสูง จะนำมาซึ่งการทำให้อ่อนลงในแบบต่าง ๆ และความกว้างของพื้นที่ที่ทำการให้อ่อนลง ตำแหน่งที่กว้างใหญ่เป็นระยะจากขอบบ่อหลอมละลาย (Fusion Line) ความแข็งแรงในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน สามารถกลับคืนมาได้ โดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อม โดยเฉพาะโซนที่มีการหลอมละลาย ไปจนถึงการกลับมาของความแข็งแรง การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging มีผลกระทบมากกว่า การให้ความร้อนแบบ Postweld Natural Aging อะลูมิเนียมกลุ่มที่มีสังกะสีเป็นส่วนผสม จะมีสมบัติตามกระบวนการการตกตะกอน กล่าวโดยทั่วไปโลหะผสมประเภทนี้ จะมีความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อยกับแนวโน้มนั้น จากการได้รับความร้อนที่มากเกินไป นอกจากนี้ ยังได้ตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับการตอบสนองกับอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วไม่ค่อยดีนัก โดยเฉพาะกรณีที่ได้จากการเชื่อม ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุจะอยู่ในตารางที่ 2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมจะอยู่ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 7020 และอะลูมิเนียมเกรด 7022  
คิดเป็นร้อยละ (%) น้ำหนัก [10]

โลหะผสม	สังกะสี (Zn)	แมกนีเซียม (Mg)	ทองแดง (Cu)	โครเมียม (Cr)	แมงกานีส (Mn)	ไททาเนียม (Ti)	อะลูมิเนียม (Al)
7020	5.02	1.45	0.06	0.14	0.27	0.04	สมดุล
7022	4.98	3.85	0.68	0.14	0.17	0.01	สมดุล

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม [10]

ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม	เงื่อนไขการใช้พลังงานในการเชื่อมต่ำ	เงื่อนไขการใช้พลังงานในการเชื่อมสูง
โวลต์แรงดันไฟฟ้า (V)	27	27
แอมแปร์กระแสไฟฟ้า (A)	200	200
ความเร็วในการเคลื่อนที่หัวเชื่อม (เซนติเมตรต่อนาที)	55	30
แก๊สปกคลุม	อาร์กอน	อาร์กอน
อัตราการไหลของแก๊ส (ลิตรต่อนาที)	15	15
ชนิดลวดเชื่อมและเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อม (มิลลิเมตร)	AlMg5 1.2	AlMg5 1.2
ประเภทกระแสไฟฟ้า	DCEP	DCEP
ประสิทธิภาพในการเชื่อม (ร้อยละ)	65	65
พลังงานที่ใช้ในการเชื่อม (จูล์นต่อมิลลิเมตร)	590	1,080

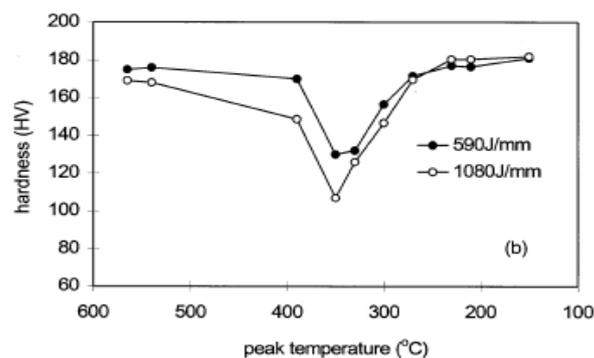
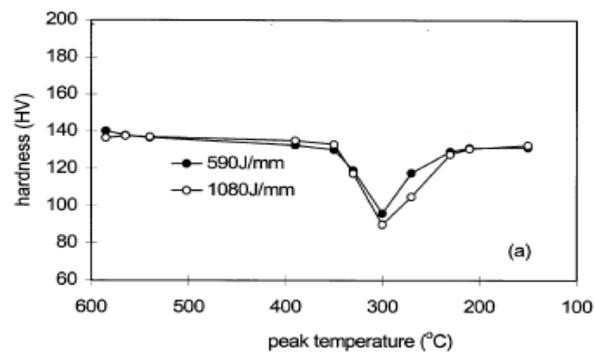
อะลูมิเนียมเกรด 7020 และอะลูมิเนียมเกรด 7022 ก่อนข้างที่จะเป็นรูปแบบใหม่ กับการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งนำไปใช้กับโครงสร้างที่ต้องการความเบาอะลูมิเนียมเกรด 7020 เป็นโลหะที่มีความแข็งแรงปานกลางในองค์ประกอบอะลูมิเนียม และมีปริมาณสังกะสีร้อยละ 5.0 แมกนีเซียมร้อยละ 1.5 ขณะที่อะลูมิเนียมเกรด 7022 มีความแข็งแรงสูง มีปริมาณสังกะสีร้อยละ 5.0 แมกนีเซียมร้อยละ 3.5

และทองแดงร้อยละ 0.7 ระหว่างการเชื่อมมีความแตกต่างของโครงสร้าง มักจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของรอยเชื่อมที่กลับมาตกผลึกใหม่อีกครั้ง เกรนจะโตขึ้น และรูปแบบใหม่ของการตกตะกอน (Precipitate) พิจารณาจากความแข็งแรง ซึ่งการโตของเกรนจะมีอิทธิพลบทบาทในกรณีของกลุ่มอะลูมิเนียม ที่สามารถนำกลับไปปรับปรุงสมบัติทางความร้อนไม่ได้ แต่อิทธิพลรองในกลุ่มอะลูมิเนียมที่สามารถนำกลับไปปรับปรุงสมบัติทางให้ความร้อนได้ ความแข็งแรงโดยส่วนใหญ่ทำให้เกิดโดยการตกตะกอนรูปแบบใหม่ การตกตะกอนรูปแบบใหม่ได้รวมเป็นลำดับของปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงได้ เริ่มจากการละลายจากการตกตะกอน ต่อมาจะเกิดการโต หรือการเปลี่ยนแปลงในการเกิดของการตกตะกอนที่ปะติดปะต่อ ไปจนถึงรูปแบบที่ไม่ปะติดปะต่อ (จากการได้รับความร้อนที่มากเกินไป) และการเกิดการตกตะกอนโดยตรงที่ปะติดปะต่อ จากกระบวนการแข็งตัว ที่วัสดุจะเกิดการตกตะกอนโดยตรง ที่ไม่ปะติดปะต่อจากกระบวนการแข็งตัวที่อุณหภูมิสูง (รูปแบบการตกตะกอนที่เสี่ยงต่อความเสียหาย) แต่ละปฏิกิริยาของรูปแบบของผลกระทบกับสมบัติทางกลของวัสดุ ดังนั้น เกิดผลโดยตรงกับความสัมพันธ์ต่อสมบัติทางกล และการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยา สมบัติทางกลสามารถใช้เป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลง แม้ว่าพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงโดยทั่วไป ของอะลูมิเนียมกลุ่มที่มีสังกะสีเป็นส่วนผสม (Al-Zn-Mg Alloy) จะรู้ว่ามีรายละเอียดมากที่จะเข้าใจ ระหว่างบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ในการเชื่อมที่ทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อมอ่อนตัว คือ ลักษณะเฉพาะของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับโลหะผสมชนิดนี้ ในการทดลองลักษณะนี้ มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้พื้นฐานความเข้าใจ ในการอ่อนตัวของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม เป็นสมบัติของอะลูมิเนียมเกรด 7020 และอะลูมิเนียมเกรด 7022 ขณะเชื่อมอาร์ค และพบว่าการกระทำภายนอกที่กระทำกับวัสดุ 2 ชนิดนี้ จะเป็นผลกระทบโดยการให้พลังงานที่ใช้ในการเชื่อม (Heat Input) และการให้ความร้อน หลังการเชื่อม เพื่อหาอิทธิพลที่โน้มน้าว ในการให้ความร้อนต่อสมบัติของโครงสร้างวัสดุ ถูกจำแนกออกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1. การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging เป็นเวลา 3 เดือนที่อุณหภูมิห้อง
2. การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส
3. การอบอ่อนชิ้นงาน 8 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 100 องศาและ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

การวัดความแข็งของการจำลอง และการเชื่อมจริง ได้ใช้การทดสอบ Vickers Hardness ส่วนในทางโครงสร้างได้นำชิ้นงานไปตัด โดยนำเอาชิ้นงานที่มองด้านตัดขวางไปกัดกรด และนำไปถ่ายภาพจาก Transmission Electron Microscopy (TEM) ในจำนวนการคำนวณผลกระทบ จากการ

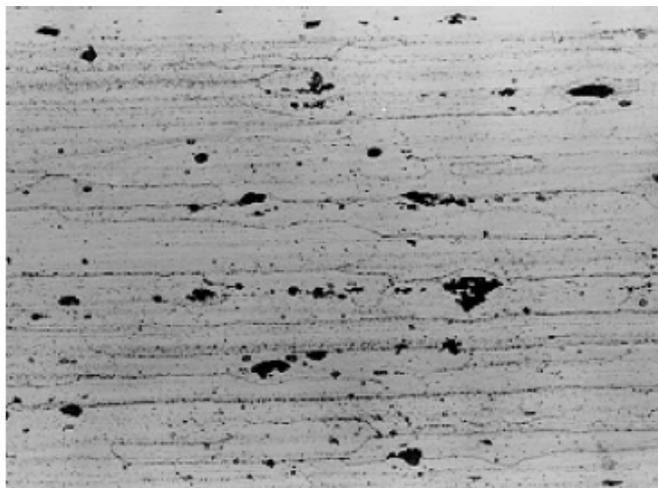
เชื่อมจริงที่เกี่ยวกับความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7020 และอะลูมิเนียมเกรด 7022 ในชิ้นงานที่ทดลองทั้ง 2 แบบ การบอกถึงความอ่อนตัวของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมของกลุ่มอะลูมิเนียมที่นำกลับมาปรับปรุงสมบัติความร้อนได้อีก มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการตกตะกอนลักษณะใหม่ ในส่วนที่สูญเสียความแข็งในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ในการเชื่อม สามารถกลับคืนมาได้จากการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ในการแยกประเภทของผลกระทบจากการให้ความร้อน ในรายละเอียดของความแข็งที่ได้จากการจำลอง HAZ จะวัดความแตกต่างหลังจากการให้ความร้อน สิ่งนั้นเป็นที่เด่นชัดถึงความแข็งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบ จากความร้อนในการเชื่อม ที่ได้จากการเชื่อมสามารถกลับคืนมาได้อย่างสมบูรณ์ โดยการทำให้ Solution Treatment ตามด้วยการทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว แล้วมาทำการให้ความร้อนอีกครั้ง อย่างไรก็ตามการอบให้ความร้อนนี้จะประสบความสำเร็จ เมื่อมีอัตราการเย็นลงอย่างรวดเร็วที่สูง โดยทั่วไป อะลูมิเนียมสังกะสี จะมีขอบเขตในเรื่องนี้ ในการทดสอบขั้นต้นได้นำไปใช้กับอะลูมิเนียมเกรด 7022 อัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะมีบทบาททำให้เกิดอิทธิพลในวัสดุชนิดนี้



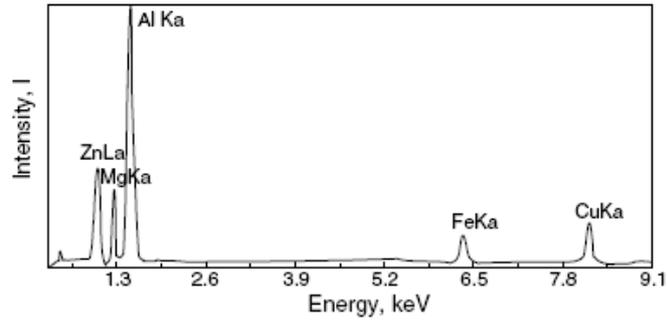
**รูปที่ 2.23** ความแข็งที่อุณหภูมิสูง จากการจำลองในการใช้เงื่อนไขทั้ง 2 แบบในการเชื่อม โดยผ่านกระบวนการ การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging โดยรูป (a) คืออะลูมิเนียมเกรด 7020 และ รูป (b) คือ อะลูมิเนียมเกรด 7022 [10]

อิทธิพลของพลังงานที่ใช้ในการเชื่อม ที่ทำให้พฤติกรรมบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการเชื่อม มีความอ่อนตัวลงของอะลูมิเนียมเกรด 7020 และอะลูมิเนียมเกรด 7022 ความแข็งที่ได้จากการจำลอง โดยการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging อิทธิพลที่เห็นได้ชัดนี้จะอยู่ในรูปที่ 2.30 มีความสำคัญตรงที่พลังงานที่ใช้ในการเชื่อม จะเป็นตัวกำหนดของความอ่อนตัวจากเหตุนี้สรุปได้ว่า พลังงานที่ใช้ในการเชื่อมสูง จะทำให้เขตการอ่อนตัวกว้างออกไปจากขอบบ่อ หลอมละลายไกลออกไปอีก สิ่งนี้สามารถเข้าใจได้ง่าย ๆ ว่าอัตราการเย็นตัวลดลงด้วยการเพิ่มพลังงานที่ใช้ในการเชื่อม ผลที่ตามมาคือ ถ้าเวลามากก็จะทำให้เกิดการได้รับความร้อนที่มากเกินไป ทำให้เขตนี้กว้างออกไปอีกจากขอบบ่อหลอมละลาย จะสรุปสิ่งที่เกิดขึ้นได้ว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของอะลูมิเนียมเกรด 7020 และอะลูมิเนียมเกรด 7022 สามารถแบ่งย่อย ๆ ได้ตามสมบัติทางกลจากความอ่อนตัวของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมเป็น โซนที่มีการหลอมละลาย และโซนที่ได้รับความร้อนมากเกินไป ลักษณะของโซนที่หลอมละลายจะละลายโดยการตกตะกอนที่สมบูรณ์ช่วงอุณหภูมิสูงระหว่าง 350 องศาเซลเซียส สำหรับอะลูมิเนียมเกรด 7020 และ 410 องศาเซลเซียส สำหรับอะลูมิเนียมเกรด 7022 ลักษณะของโซนที่ได้รับความร้อนมากเกินไป โดยการตกตะกอนที่สมบูรณ์ช่วงอุณหภูมิสูงระหว่าง 230 องศาเซลเซียสและ 350 องศาเซลเซียส สำหรับอะลูมิเนียมเกรด 7020 กับ 230 องศาเซลเซียสและ 410 องศาเซลเซียส สำหรับอะลูมิเนียมเกรด 7022 อะลูมิเนียมเกรด 7022 มีความทนทานต่อแนวโน้ม บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมมีความอ่อนตัวมากกว่าอะลูมิเนียมเกรด 7020 ในระหว่าง โซนที่หลอมละลาย และโซนที่ได้รับความร้อนมากเกินไป ระดับพลังงานที่ใช้ในการเชื่อม จะส่งผลต่อความอ่อนตัว พลังงานที่ใช้ในการเชื่อมสูง จะทำให้ความอ่อนตัวมีมาก และขยายเป็นพื้นที่กว้างใหญ่ จากขอบบ่อหลอมละลาย ความแข็งใน HAZ สามารถกลับคืนได้จากการอบให้ความร้อน หลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging จะมีมากกว่า การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging [10] ส่วนในกรรมวิธีการเชื่อม Laser Beam (LBW) ที่ใช้กับงานเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด 7075-T6 ได้เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความเร็วในการเชื่อมกับกรรมวิธีการเชื่อมทั้งสแตนเลสสปีคคูลุม (GTAW) สมบัติทางกลและโครงสร้างของรอยเชื่อมได้มีการพัฒนา โดยการทดสอบ Tensile ความแข็ง (Hardness) ของการมองภาพถ่าย Energy Dispersive X-ray (EDS) ผลได้แสดงให้เห็นระหว่างความแข็ง และ Tensile Strength ของการเชื่อม Laser Beam สูงกว่ากรรมวิธีการเชื่อมทั้งสแตนเลสสปีคคูลุม (GTAW) ซึ่งได้แสดงถึงปริมาณความแข็งของขอบเขตที่มีการอ่อนตัวในการเชื่อม Laser Beam หลังจากการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 26 ชั่วโมง มันทำให้ดีขึ้น แต่ก็ไม่สามารถจะเทียบเท่ากับตัววัสดุเอง (BM) เพราะว่าความอ่อนของบ่อหลอมละลาย (FZ) จากการเชื่อม Laser Beam ไม่สามารถทำให้กลับมาสู่สภาพเดิมได้ หลังจากการให้ความร้อน และหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging [7] ทั้งนี้อะลูมิเนียมเกรด 7075 ถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

สิ่งต่างแทนวัสดุตัวเดิม และใช้ในงานอากาศยาน เพราะว่ามันมีความแข็งแรงสูง มีความไวต่อการเย็นตัวอย่างรวดเร็วต่ำ ช่วงของการทำ Solution Heat Treatment ที่ช่วงอุณหภูมิกว้าง และสมบัติของการเย็นตัวโดยปกติเร็ว ในการนำเสนอในที่นี้ ได้ใช้กรรมวิธีการต่อทางกลอย่างรวดเร็ว เนื่องจากแนวโน้มของการเกิดการแตกในเนื้อเชื่อม และการอ่อนตัวในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม (HAZ) ผลจากรูปแบบกรรมวิธีการเชื่อม สิ่งนั้นได้มีการเข้มงวดในส่วนที่เครื่องมือบกร่องในการจับยึด ซึ่งเป็นอุปสรรคทำให้การประกอบซ้ำ มีความคืบเสถียรและเกิดการกัดกร่อนแบบ Galvanic ข้อสำคัญอยู่ที่คุณภาพของการเชื่อมอะลูมิเนียม เพราะว่าได้ขยายอิทธิพลกับการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม การเปรียบเทียบรูปแบบเทคนิคการเชื่อม Laser Beam ที่เหมาะสมสำหรับอะลูมิเนียม ด้วยสมบัติของการเชื่อมที่มีความเร็วสูง ความยืดหยุ่นของอุปกรณ์การเชื่อม Laser Beam ความหนาแน่นของพลังงานที่สูงของลำแสง และการบิดงอที่ต่ำ ในความพิเศษของการนำ Laser Beam ไปเชื่อมต่องานอะลูมิเนียมที่ผ่านการบ่มแข็ง (Age Hardening Aluminum Alloy) เพราะโดยทั่วไปจะมีการให้พลังงานที่ใช้ในการเชื่อมที่ต่ำ ขนาดบ่อหลอมละลาย และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมจึงมีขนาดเล็ก แม้ว่าจำนวนที่ทำการศึกษาก็ได้มาจากการออกแบบเงื่อนไขของ Laser Beam และการให้ความร้อนหลังการเชื่อม การกำหนดขอบเขตที่แน่ชัดของอะลูมิเนียมซึ่งประกอบด้วย Al-Li-Cu Alloy , Al-Mg-Mn Alloy , Al-Mg- Si-Cu Alloy , และ Al-Mg-Si Alloy เหล่านี้ มีการศึกษาที่น้อยมากทางด้านสมบัติทางกล และพฤติกรรมความเสียหายของการเชื่อมในอะลูมิเนียมเกรด 7075 จากการศึกษาอะลูมิเนียมเกรด 7075 เป็นที่ยอมรับ แต่อะลูมิเนียมนั้นไม่สามารถนำมาเชื่อมได้ เพราะว่าจะมีการระเหยของสังกะสี และแมกนีเซียมสูงเกินไป ที่สูงมาก จะส่งผลกระทบต่อทำให้แข็งแรง (Hardening) และผลจากการลดของ Tensile Strength กับความอ่อนตัว อย่างไรก็ตาม เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยี CO<sub>2</sub> Laser สำหรับเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ด้วยกรรมวิธีการผลิตที่สม่ำเสมอ คุณภาพการเชื่อมสูง ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมจะอยู่ในตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.6

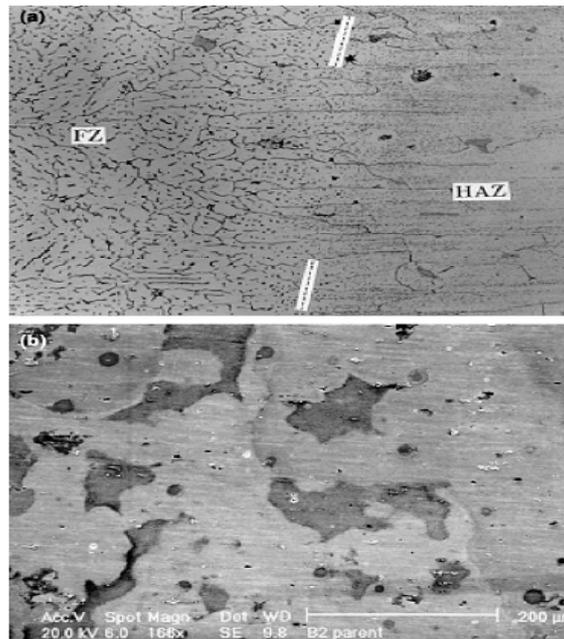


รูปที่ 2.24 สิ่งที่เกิดขึ้นกับ โครงสร้างแผ่นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ได้จากการมอง EDS [11]



รูปที่ 2.25 แสดงเศษเล็ก ๆ ที่มองจาก EDS ในรูปที่ 2.31 [11]

รูปที่ 2.24 จะแสดงถึง Matrix Grain เป็นแนวขาว ในภาพที่เป็นสาเหตุที่เกิดกับแผ่นงานอะลูมิเนียม 7075-T6 ได้จากการดูภาพ Energy Dispersive X-ray (EDS) ในภาพที่ 2.25 นั้นเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เศษเล็ก ๆ ของอะลูมิเนียม (Al) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) แมกนีเซียม (Mg) ที่เพิ่มเข้าไป ทำให้เรา รู้ได้ว่า การปรากฏที่สัมพันธ์กันของเฟส  $MgZn_2$  และ  $MgAlCu$  ทำให้มีความแข็งแรงอีกครั้ง สำหรับ อะลูมิเนียม 7075 โครงสร้างของบ่อหลอมละลาย (FZ) ในการเชื่อม Laser Beam 2 (LB-2) และในการเชื่อมแบบอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่ม Cellular Dendritic ที่ละเอียดจากโครงสร้างการแข็งตัวในการสังเกตโดยตัวของบ่อหลอมละลาย ในกรรมวิธีการเชื่อมแบบ Laser Beam การเปรียบเทียบจากการเชื่อม Laser Beam สิ่งที่สำคัญคือ Cellular Dendritic ที่หายจากการแข็งตัว ในการหลอมของการเชื่อมทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่มดูได้จากรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 โครงสร้างของรอยเชื่อมแบบ Laser Beam 1 (LB1) [11]

ตารางที่ 2.5 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม CO<sub>2</sub> Laser Beam (LB1) (LB2) [11]

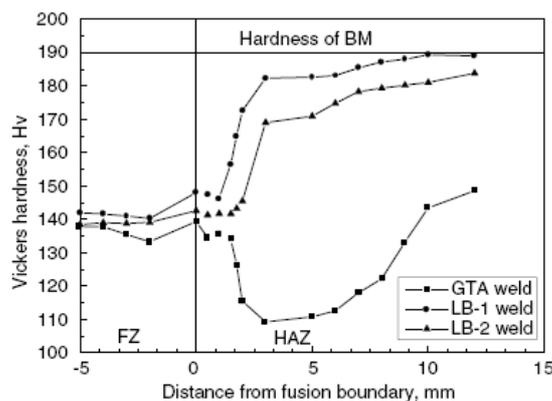
	LB-1 (low)	LB-2 (high)
Power (kW)	6	6
Speed (mm/min)	1016	635
Shield gas	Helium	Helium
The flow rate of shield gas (l/min)	70	70
Focal position	At the specimen surface	At the specimen surface

ตารางที่ 2.6 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม ทั้งสแตนเลสสปีดคลุ่ม [11]

Welding process parameters of GTA welding

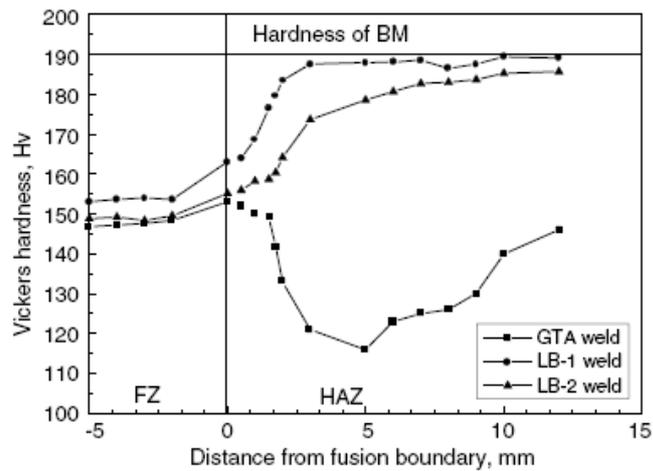
Current (A)	78
Voltage (V)	75
Speed (mm/min)	159
Shield gas	Mixture of argon and helium
The flow rate of shield gas (l/min)	20

ความแข็งของบ่อหลอมละลาย (FZ) จากการเชื่อม Laser Beam (LBW) จะมีมากกว่าการเชื่อมทั้งสแตนเลสสปีดคลุ่ม (GTAW) เป็นผลมาจากโครงสร้างการแข็งตัวที่ละเอียด เกิดโดยปริมาณอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิการแข็งตัวในบ่อหลอมละลาย (FZ) จากการเชื่อม Laser Beam (LBW) มีมากกว่าการเชื่อมทั้งสแตนเลสสปีดคลุ่ม (GTAW) เหตุผลที่ทำให้การเชื่อม Laser Beam 1 (LB-1) มีความแข็งที่สูงกว่าการเชื่อม Laser Beam 2 (LB-2) เล็กน้อย จะขึ้นตรงกับความเร็ว ในการเชื่อมที่แตกต่างกัน ซึ่งการใช้ความเร็วในการเชื่อม Laser Beam (LBW) ที่ต่ำ ซึ่งทำให้สูญเสียแมกนีเซียม (Mg) ในบ่อหลอมละลาย (FZ)



รูปที่ 2.27 ความแข็งหลังจากการเชื่อม [11]

สามารถมองได้จากรูปที่ 2.28 (เปรียบเทียบกับรูปที่ 2.27) ความแข็งจากการเชื่อมทั้งหมดได้เพิ่มขึ้น หลังจากการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 26 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ของความแข็ง และเขตของความอ่อนตัวจะไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้ความแข็งของบ่อหลอมละลาย ไม่สามารถกลับคืนได้อย่างพอเพียงให้เท่ากับตัววัสดุ หลังจากการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging บ่อหลอมละลาย จะเป็นพื้นที่ที่อ่อนแอมากสำหรับการเชื่อม Laser Beam เช่นเดียวกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม ในการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสตีลกลุ่ม รูปแบบการไม่กระจายตัวของการตกตะกอน ทำให้มีความแข็งแรงในบ่อหลอมละลาย ขณะที่มีการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging ยับยั้งการทำให้แข็งขึ้น และมีผลในความสัมพันธ์ของความอ่อนที่บ่อหลอมละลาย จากการเชื่อม Laser Beam สำหรับการเชื่อมทั้งสแตนเลสสตีลกลุ่ม ปริมาณการละลายของธาตุ ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมไม่พอที่จะเกิดการแข็งตัว เนื่องจากการตกตะกอนระหว่างการให้ความร้อน



รูปที่ 2.28 ผลของความแข็งที่ได้จากการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 26 ชั่วโมง [11]

ความแข็งและจากการเชื่อม Laser Beam จะสูงกว่าการเชื่อมทั้งสแตนเลสสตีลกลุ่ม ปริมาณความแข็ง จากเขตบ่อหลอมละลายที่อ่อนตัวในการเชื่อม Laser Beam จะกลับคืนมาเพียงบางส่วน หลังจากการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 26 ชั่วโมง Tensile Strength ของรอยเชื่อม Laser Beam ที่ให้ความร้อน การให้ความร้อน หลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging จะยังคงต่ำกว่าตัววัสดุเอง [11]

## บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง การดำเนินงานและวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยเริ่มจากการจัดเตรียมวัสดุ และเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีความจำเป็น เช่น เครื่องรีดเย็น (Cold Rolling Machine) เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Chemical Emission Spectrometer) เครื่องกัดชิ้นงาน (Milling Machine) เครื่องเชื่อมแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Machine) เตาอบให้ความร้อนหลังการเชื่อม การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการกัดกรด เพื่อตรวจสอบโครงสร้าง การเตรียมเครื่องตรวจสอบความแข็ง (Microhardness) แบ่งได้ดังนี้

### 3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์

#### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

อะลูมิเนียม เป็นวัสดุที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัย ได้แก่ โลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี แผ่นเกรด 7075-T651 โดยมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากเครื่อง Chemical Emission Spectrometer ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสีแผ่นเกรด 7075-T651 ในการทดลอง (น้ำหนักคิดเป็นร้อยละ)

ชนิดของโลหะผสม	Zn	Mg	Cu	Si	Cr	Fe	Mn	Ti
มาตรฐานเกรด 7075 T651	5.62	2.09	1.65	0.137	0.216	0.237	0.033	0.036
โลหะผสมที่ใช้ทดลอง	5.6	2.09	1.6	0.13	0.21	0.23	0.033	0.036

โลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสีแผ่นเกรด 7075-T651 นี้ เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรง และความแข็งแรงสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเกรดอื่น ๆ โดยทั่วไปการต้านทานการกัดกร่อน จะเหมือนกันกับเกรด 2024 แต่เกรดนี้จะได้เปรียบเกรด 2024 เมื่อมีการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง มี Plane Stress , Plane Strain ความเหนียวที่จะต้านทานการแตกหักได้ดี และมีความแข็งแรงคงที่ ที่ไม่สะท้อนสามารถต้านทานความล้าได้ดี จะสูญเสียความล้าก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอนุภาคการเคลื่อนที่ของตำแหน่ง Slip Planes อนุภาคนี้อาจมาจกชั้นตอนของจำนวนเล็กที่ไม่เสถียรและ Matrix เกิดการกลีบมาละลายอีกครั้ง เมื่อการได้รับความร้อนไม่มากจนเกินไป การหลอมละลายของ Eutectic สำหรับอุณหภูมิสูงจะ

เกิดการสั่นดาป (Oxidation) ที่เป็นเช่นนี้ ก็เพราะว่าวัสดุไม่สามารถทำให้คืนสภาพ โดยการกลับมาให้ความร้อนได้อีก ดังที่เป็นปัญหาหลังจากการให้ความร้อนในการอบอ่อน (Annealing) ชุบแข็ง (Quench) ที่รวดเร็ว [12]

### 3.1.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ทดลองในงานวิจัย

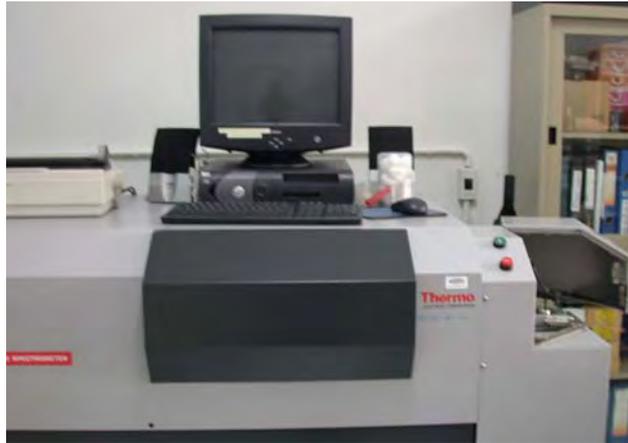
เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยจะมีอยู่ 2 ส่วน คือ เครื่องมืออุปกรณ์ที่ไม่สิ้นเปลือง (Non-Consumable) และเครื่องมืออุปกรณ์ที่สิ้นเปลือง (Consumable) ซึ่งเครื่องมืออุปกรณ์ที่ไม่สิ้นเปลืองจะเป็นประเภทเครื่องมือและอุปกรณ์ที่อยู่ในส่วนประกอบของเครื่องมือ ในส่วนเครื่องมืออุปกรณ์ที่สิ้นเปลืองจะเป็นในส่วนของขั้นตอน การทดลองการเชื่อมและหลังการเชื่อม ทั้ง 2 ส่วนมีดังต่อไปนี้

เครื่องรีดเย็น (Cold Rolling Machine) เป็นเครื่องที่นำมารีดเย็นลดความหนาชิ้นงาน โดยกำหนดอัตราการรีดเป็นร้อยละ 5 ร้อยละ 10 ร้อยละ 20 โดยจะเปรียบเทียบกับความหนาชิ้นงาน เริ่มต้นจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปรีดเย็น ตามที่แบ่งไว้ การทดลองนี้จะใช้เครื่องจากศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องรีดเย็น (Cold Rolling Machine)

เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Chemical Emission Spectrometer) ในการทดลองจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีทุกครั้ง แม้ว่าวัสดุจะมีใบรับรองส่วนผสมทางเคมีแนบมากับวัสดุ ก็ตาม ในที่นี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีรุ่น Thermo ARL ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Chemical Emission Spectrometer)

เครื่องกัดชิ้นงาน (Milling Machine) งานที่ได้จากการรีดเย็นย่อมมีความหนาลดลง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการลดความหนาวัสดุชิ้นที่ไม่ได้ทำการรีดเย็น เพื่อปรับพื้นที่หน้าตัดให้เท่ากันมิให้มีปัญหาในการส่งถ่ายความร้อนที่ไม่เท่ากัน และใช้บากร่องรอยต่อชิ้นงาน ในการทดลองใช้เครื่องรุ่น CCCP Mockba

เครื่องเชื่อมแก๊สเฉื่อยปกคลุม (Metal Inert Gas Welding Machine) เป็นอุปกรณ์หลัก ที่ทำการทดลอง ซึ่งการทดลองนี้ได้ออกแบบระบบการทำงานเป็นระบบ Auto เพื่อให้ได้งานที่มีคุณภาพที่สุด เครื่องเชื่อมเป็นรุ่น FRONIUS TIME SYNERGIC ซึ่งมีอุปกรณ์ส่วนประกอบดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมแก๊สเฉื่อยปกคลุม (Metal Inert Gas Welding Machine)

เตาไฟฟ้าชนิดขดลวดต้านทาน (Electric Resistance Furnace) ในงานนี้ได้ประยุกต์เตาไฟฟ้าชนิดขดลวดต้านทาน ให้เป็นอุปกรณ์การให้ความร้อนหลังการเชื่อม ซึ่งการให้ความร้อน หลังการเชื่อมต้องกระทำหลังการเชื่อมทันที ในการทดลองนี้ใช้เตาไฟฟ้าชนิดขดลวดต้านทาน Lenton Furnaces ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เตาไฟฟ้าชนิดขดลวดต้านทาน (Electric Resistance Furnace)

### 3.1.3 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ผลในงานวิจัย

#### สารเคมีที่ใช้

- Hydrochloric Acid (HCl)
- Nitric Acid (HNO<sub>3</sub>)
- Water (H<sub>2</sub>O)
- Ferric Chloride (FeCl<sub>3</sub>)

เครื่องตรวจสอบความแข็ง (Microhardness) เครื่องชนิดนี้มีการประมวลผลที่แม่นยำมาก เนื่องจากเป็นระบบดิจิทัล การวัดความแข็งทำได้ง่ายกำลังขยายสูงสุด 200X ซึ่งมีจอภาพแยกออกจากเครื่องใช้เครื่องยี่ห้อ Wilson รุ่น TU 240B ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องตรวจสอบความแข็ง (Microhardness)

กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Microscope) เครื่องตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ใช้เครื่อง Olympus GX51 ซึ่งมีกำลังขยายตั้งแต่ 50X, 100X, 200X, 500X และ 1000X ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Microscope)

## 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.2.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี (Chemical Emission Spectrometer Testing)

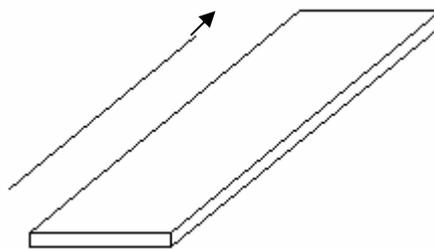
เพื่อเป็นการรับประกันว่า อะลูมิเนียมที่นำมาทำการทดลอง เป็นไปตามต้องการที่ได้กำหนดไว้ จึงต้องมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี โดยเครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี (Chemical Emission Spectrometer) จากการตรวจสอบ 4 จุด ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี (Chemical Emission Spectrometer Testing)

### 3.2.2 การรีดเย็น (Cold Rolling)

ก่อนทำการรีดต้องเผื่อขนาดความยาวในตัดชิ้นงาน 1-2 เซนติเมตร เพราะการรีดบางครั้งจะเกิดการบิดงอแตกหักบริเวณขอบชิ้นงาน ในการรีดเย็นต้องประคองชิ้นงานให้ตรง เพื่อป้องกันเสียรูปทรงในการรีด ทิศทางการรีดจะแสดงในรูปที่ 3.8 จากนั้นทำการแยกวัสดุ 7075-T651 ออกเป็น 4 กลุ่ม นำ 3 กลุ่ม ไปทำการรีดเย็นแบ่งตามร้อยละในการรีด โดยเริ่มที่การนำชิ้นงานไปรีดเย็นที่ร้อยละ 5 จากความหนาชิ้นงานเริ่มต้น 6.5 มิลลิเมตร ความหนาจะถูกรีดลงไป 0.325 มิลลิเมตร เหลือ 6.175 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ทิศทางการรีด



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานริดเส้นร้อยละ 5

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการริดเส้นร้อยละ 10 จากความหนาชิ้นงานเริ่มต้น 6.5 มิลลิเมตร ความหนาจะลดลงไป 0.65 มิลลิเมตร เหลือ 5.85 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานริดเส้นร้อยละ 10

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการริดเส้นร้อยละ 20 จากความหนาชิ้นงานเริ่มต้น 6.5 มิลลิเมตร ความหนาจะลดลงไป 1.3 มิลลิเมตร เหลือ 5.2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.11



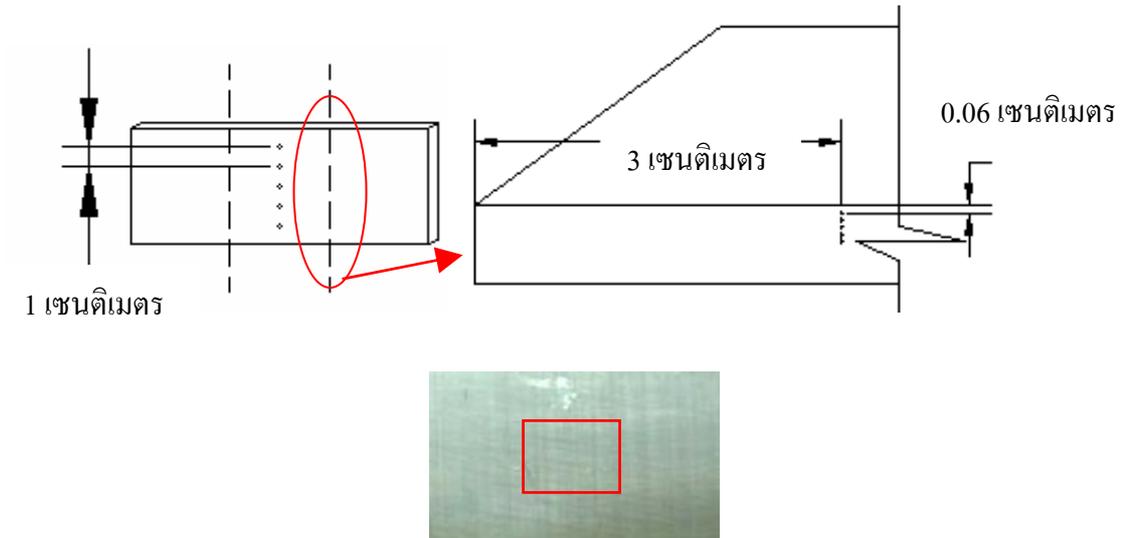
รูปที่ 3.11 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20

### 3.2.3 การลดความหนา

การรีดเย็นทำให้ความหนาของชิ้นงานลดลงตามระดับอัตราการรีดเย็น เมื่อนำชิ้นงานมาเชื่อมต่อกับชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการรีดเย็น จะทำให้เกิดปัญหาในการส่งถ่ายความร้อน จึงมีการลดความหนาของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการรีดเย็นลง โดยวัดความหนาที่ได้จากการรีดเย็นเป็นเกณฑ์หลัก เมื่อลดความหนาชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการรีดเย็นลงมา ต้องทำการจัดปรับแต่งผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบร้อย เพื่อนำชิ้นงานไปบากรอยต่อ โดยใช้เครื่องเดียวกันกับการลดความหนาชิ้นงาน

### 3.2.4 การตรวจเช็คความแข็ง (Microhardness Testing) และโครงสร้างมหภาค (Macro Structure Testing)

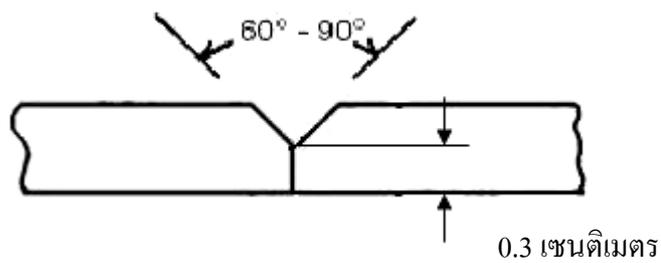
จากการนำชิ้นงานไปรีดเย็น มาจะทำให้ค่าความแข็งแตกต่างกัน ตามระดับอัตราการรีด ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องทราบค่าความแข็งเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปทำการเชื่อม ในส่วนของการตรวจสอบโครงสร้างก่อนทำการเชื่อม ต้องการรู้ผลกระทบจากการรีดเย็นตามระดับอัตราการรีด จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการกดวัดความแข็งแรงผิวหน้าและด้านตัดขวางชิ้นงาน และตำแหน่งการตัดชิ้นงาน เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคจากการริดยื่น

**3.2.5 การเตรียมรอยต่อ (Joint Design)**

ก่อนทำการเชื่อม ต้องมีขั้นตอนการเตรียมรอยต่อชิ้นงาน โดยการใช้เครื่องบดทำมุม 30 ±5 องศา และใช้กระดาษทรายเบอร์ 400 ขัดรอยต่อให้เรียบ การออกแบบรอยต่อกระทำตามมาตรฐานการเชื่อม อะลูมิเนียม AWS D1.2 เลือกใช้แบบ V-Groove ต่อชนโดยไม่มี Gap และใช้การหลอมลึกเป็นเพียงบางส่วนหรือว่าแบบ PJP ลักษณะรอยต่อดังรูปที่ 3.13

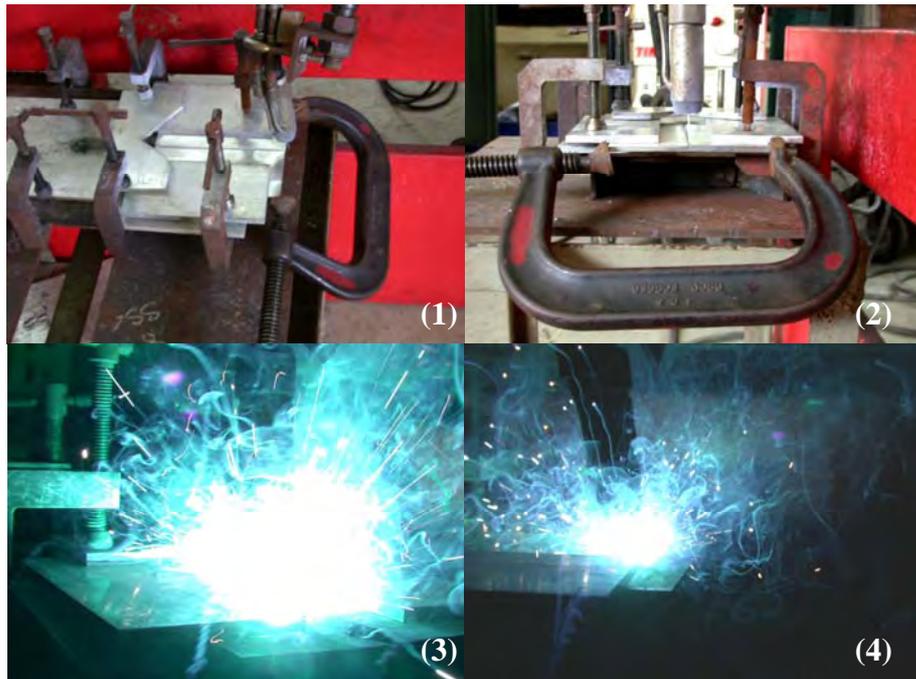


รูปที่ 3.13 ลักษณะการเตรียมรอยต่อ

ก่อนทำการเชื่อมต้องมีการทำความสะอาดผิวหน้ารอยต่อ ด้วยการล้าง Acetone ตลอดผิวรอยต่อ เพื่อเป็นการชะล้างคราบสกปรกสิ่งแปลกปลอมจากการริดยื่น และการกัดชิ้นงาน ตลอดจนช่วยให้การอาร์คง่ายขึ้น

### 3.2.6 การเชื่อมชิ้นงาน (Welding)

การเชื่อมจะกระทำการโดยมีวัสดุที่สิ้นเปลือง (Consumable) และวัสดุไม่สิ้นเปลือง (Non-Consumable) วัสดุที่สิ้นเปลืองจะเป็นจำพวกแก๊ส และลวดเชื่อม สำหรับการเชื่อมทดลอง จะเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุม (GMAW) ได้มีการออกแบบให้เครื่องทำงานอัตโนมัติ โดยมีสวิตช์ควบคุมการเติมลวด และจ่ายแก๊สปกคลุม การเชื่อมจะดำเนินการโดยใช้ Jig เป็นตัวยึดชิ้นงาน จะไม่มีการ Tack ชิ้นงาน เพื่อการเดินลวดได้อย่างต่อเนื่องจนเต็มร่องที่บากไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 (1) และ (2) เป็นการจับยึดชิ้นงาน (3) และ (4) เป็นการดำเนินการเชื่อม

ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม มีดังต่อไปนี้

- เครื่องเชื่อมกระแสขั้วตรง (DCEP)
- กระแสไฟ 150 แอมแปร์
- แรงดัน 19 โวลต์
- ความเร็วในการเดินลวดเชื่อม 800 มิลลิเมตรต่อนาที
- ระยะห่างระหว่างหัวเชื่อมกับชิ้นงาน 25 มิลลิเมตร
- แก๊สอาร์กอน 20 ลิตรต่อนาที
- ลวดเชื่อมอะลูมิเนียม 5356 เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร

### 3.2.7 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment)

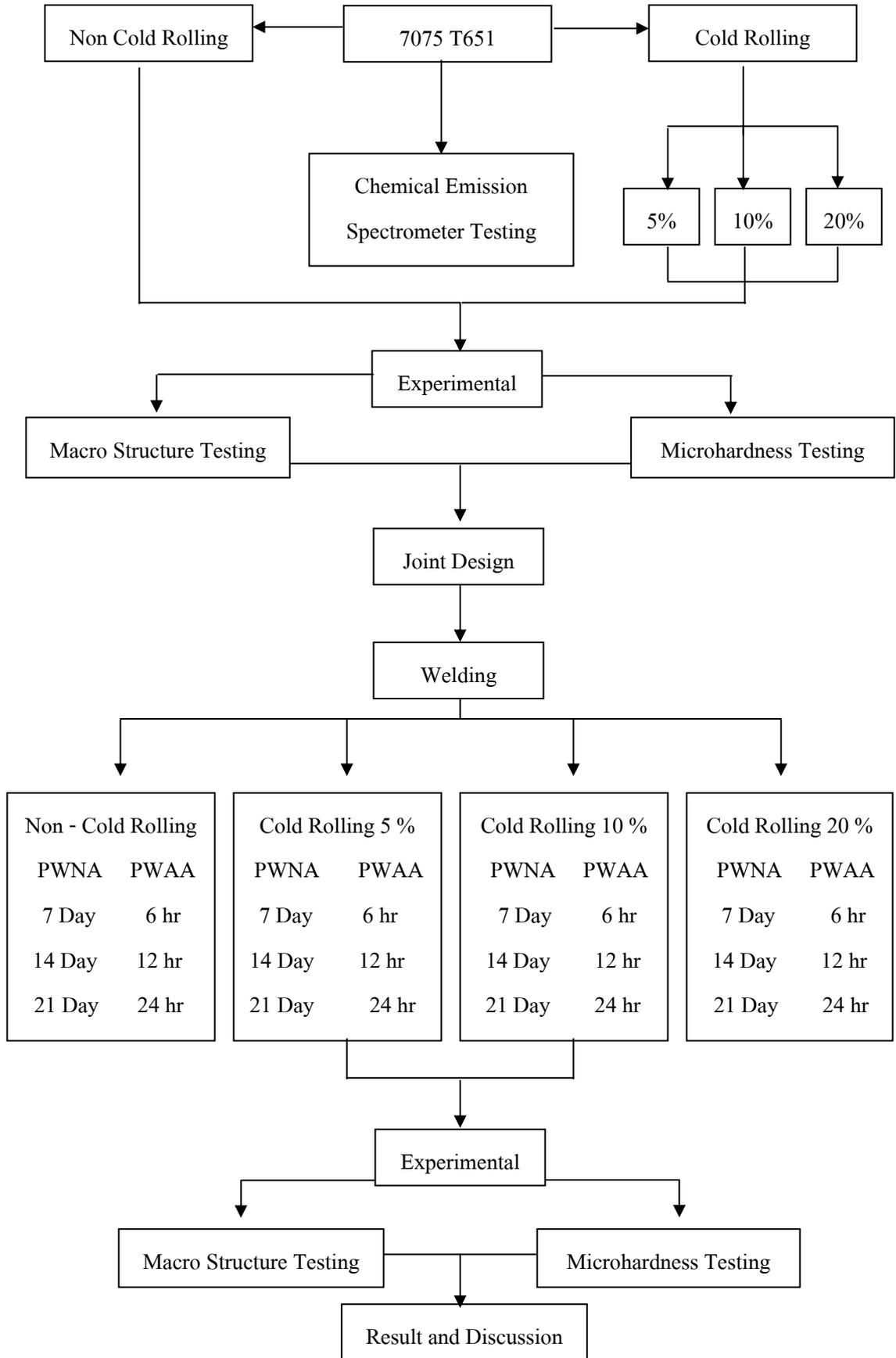
ในที่นี้ ได้มีการเปิดเตาอุ่นอุณหภูมิไว้ก่อน เนื่องจากเตาอบจะต้องปรับอุณหภูมิในเตาให้ทั่วถึง โดยเครื่องจะให้อุณหภูมิในตอนแรกสูงกว่าที่ปรับตั้งไว้ จากนั้นจะคงที่ที่อุณหภูมิที่ปรับตั้งไว้ใช้ เวลาประมาณ 15-30 นาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น และชิ้นงานที่นำไปรีดเย็นตามอัตราที่รีดเย็น มาแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เป็นการให้ความร้อน หลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging (PWNA) ที่ อุณหภูมิห้องปกติ และแบ่งเวลาได้เป็นดังนี้

- การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging ใช้เวลา 7 วัน (PWNA 7 day)
- การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging ใช้เวลา 14 วัน (PWNA 14 day)
- การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging ใช้เวลา 21 วัน (PWNA 21 day)

กลุ่มที่ 2 เป็นการให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging (PWAA) ที่ 120 องศาเซลเซียส และแบ่งเวลาได้เป็นดังนี้

- การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging ใช้เวลา 6 ชั่วโมง (PWAA 6 hr)
- การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging ใช้เวลา 12 ชั่วโมง (PWAA 12 hr)
- การให้ความร้อนหลังจากการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging ใช้เวลา 24 ชั่วโมง (PWAA 24 hr)



รูปที่ 3.15 แผนภูมิการทดลอง

### 3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ชิ้นงานที่ได้จากการให้ความร้อน หลังจากการเชื่อมในรูปแบบที่ทำการทดลอง แบ่งเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

#### 3.3.1 การตรวจเช็คโครงสร้างมหภาค (Macro Structure)

จากการกัดกรวดจะได้ภาพโครงสร้างต่าง ๆ ตามอัตรากรัดเย็นในเงื่อนไขต่าง ๆ จากการทดลอง โดยสารเคมีที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคมีส่วนผสมดังนี้

- 10 มิลลิลิตร Hydrochloric Acid (HCl)
- 30 มิลลิลิตร Nitric Acid (HNO<sub>3</sub>)
- 20 มิลลิลิตร Water (H<sub>2</sub>O)
- 5 กรัม Ferric Chloride (FeCl<sub>3</sub>)

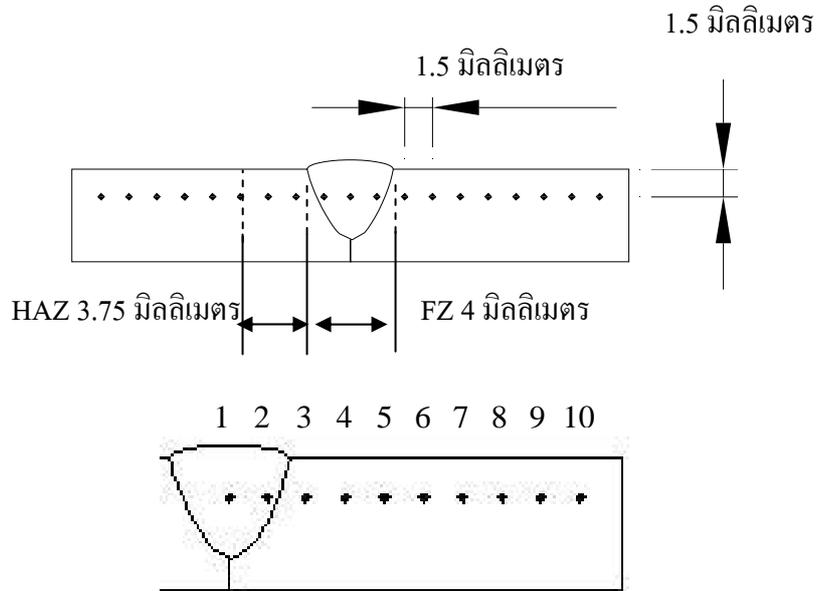
ละลายผสมรวมกัน ใช้เวลาในการกัดกรวดประมาณ 4-6 วินาที จากนั้นทำการถ่ายภาพโครงสร้างมหภาค โดยใช้เครื่อง Olympus GX51

#### การใช้กล้องตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

1. เริ่มด้วยการเสียบปลั๊ก ทั้ง 2 เครื่อง เปิดสวิตช์ ON ทั้งคู่
2. จากนั้นเสียบการ์ดความจำที่ช่องของเครื่องจอภาพ ปิดฝาให้สนิท
3. วางชิ้นงานที่ช่อง ตำแหน่งแทนชิ้นงาน
4. ปรับหมุนเลนส์ 50X ให้ตรงกับช่องชิ้นงาน พร้อมทั้งปรับกำลังขยายที่จอภาพเป็น 005 ที่จอภาพจะบอกสเกล 200  $\mu\text{m}$  จากนั้นปรับแสงที่กล้อง ไม่ควรเกิน 3 พร้อมทั้งปรับความคมชัดของภาพในตำแหน่งของชิ้นงานที่ต้องการ
5. จากนั้นกดถ่ายภาพที่เครื่องจอภาพ กดแช่ไว้จนกว่าจะได้ยินเสียงสัญญาณ จึงปล่อยมือ
6. เพิ่มกำลังขยายเป็น 100X โดย แบบเดียวกันกับที่กล่าวมาเพียงแต่ เปลี่ยนกำลังขยายเป็น 10 หน้าจอจะขึ้นสเกล 70  $\mu\text{m}$
7. ถ้าต้องการกำลังขยายเพิ่มขึ้นไปอีก ก็หมุนเปลี่ยนเลนส์เป็น 200X และเพิ่มจาก 10 เป็น 20 สเกลจะขึ้น 40  $\mu\text{m}$  เลนส์ 500X ก็จะเพิ่มเป็น 50 สเกลก็จะเป็น 20  $\mu\text{m}$  แต่ถ้าเลนส์ 1000X กำลังขยายก็จะเปลี่ยนเป็น 100 และสเกลก็จะเป็น 7  $\mu\text{m}$

**3.3.2 การตรวจเช็คความแข็ง (Microhardness)**

การตรวจเช็คความแข็งตรวจได้โดยใช้เครื่อง Microhardness Testing โดยใช้แรง 100 gmf กดหน่วงเป็นเวลา 10 วินาที และนำค่าที่ได้ใส่ตาราง โดยแนวนอนจะเป็นเงื่อนไขในการให้ความร้อน



**รูปที่ 3.16** ตำแหน่งจุดกดชิ้นงาน

หลังการเชื่อม ส่วนแนวตั้งจะตำแหน่งในการกดจะมีระยะห่างจุดละ 1.5 มิลลิเมตรดูจากรูปที่ 3.16 จะนับจากเส้นผ่านศูนย์กลางของแนวเชื่อมออกไปยังเนื้อวัสดุ โดยพื้นที่บ่อหลอมละลายจะมีความกว้าง 4 มิลลิเมตร และพื้นที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม จะมีความกว้าง 3 มิลลิเมตร และลักษณะการกดชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การตรวจเช็คความแข็ง

#### อุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องทดสอบความแข็ง Microhardness ยี่ห้อ Wilson รุ่น TU 240B
2. ชิ้นงานทดสอบ

#### ขั้นตอนการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์

1. นำชิ้นงานไปติดตั้งที่หัวจับชิ้นงาน ชิ้นงานต้องมีความหนาไม่เกิน 22 มิลลิเมตร ความกว้างอยู่ระหว่าง 15-35 มิลลิเมตร และความยาวไม่ควรเกิน 100 มิลลิเมตร
2. เลือก Lens ตามกำลังขยายที่ต้องการ ( 50, 100 หรือ 200 เท่า) โดยหมุนที่ชุด Lens และหัวกด
3. ปรับไมโครมิเตอร์ 1 และ 2 เพื่อเลือกจุดที่ต้องการวัดความแข็ง
4. เลือกแรงกด ( Load) ที่ใช้กดชิ้นงาน 100 gf โดยหมุนที่ปุ่มเปลี่ยน โหลด
5. เลือกเวลา (Dwell) ประมาณ 10 วินาที ที่ใช้กดชิ้นงาน
6. เลือกชนิดของหัววัดความแข็ง โดยใช้แบบวิกเกอร์ (V=Vicker) โดยหมุนที่ชุด lens และหัวกด หัวกดที่ตรงตำแหน่งกดจะมีไฟขึ้นที่ตัว V
7. ที่หน้าจอจะมีค่าตัวแปรให้เลือก หมุนปุ่ม A ให้เครื่องหมายสีเหลี่ยมตรงกับตัวที่ต้องการเลือก แล้วกดปุ่ม Select เพื่อเลือกค่านั้น
8. กด Start test เครื่องจะออกแรงกดชิ้นงาน และปุ่มจะสว่าง รอจนกระทั่งไฟดับ (ในขณะที่ไฟของปุ่ม Start Test ติด ห้ามหมุนหัวกดและห้ามเลื่อนชิ้นงาน)
9. หมุน Lens มาให้ตรงกับชิ้นงานจะปรากฏภาพรอยกดบนจอ จดค่า VDO เพื่อให้เส้นทแยงของรอยกดอยู่ในแนวนอน
10. กดปุ่ม Axis บนชุดควบคุมไปที่ตำแหน่ง X

11. หมุนปั๊ม A เพื่อให้เส้นด้านซ้ายมาแตะขอบซ้ายของรอยกด  
หมุนปั๊ม B เพื่อให้เส้นด้านขวามาแตะขอบขวาของรอยกด
12. กดปุ่ม Axis บนชุดควบคุมไปที่ตำแหน่ง Y
13. หมุนปั๊ม A เพื่อให้เส้นด้านบนมาแตะขอบบนของรอยกด  
หมุนปั๊ม B เพื่อให้เส้นด้านล่างมาแตะขอบล่างของรอยกด
14. อ่านค่าความแข็งที่ได้

### 3.3.3 การบันทึกผลการทดลอง (Result Record)

นำผลตัวเลขที่ได้จากการกดความแข็ง บันทึกลงในตารางของแต่ละเงื่อนไขของการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

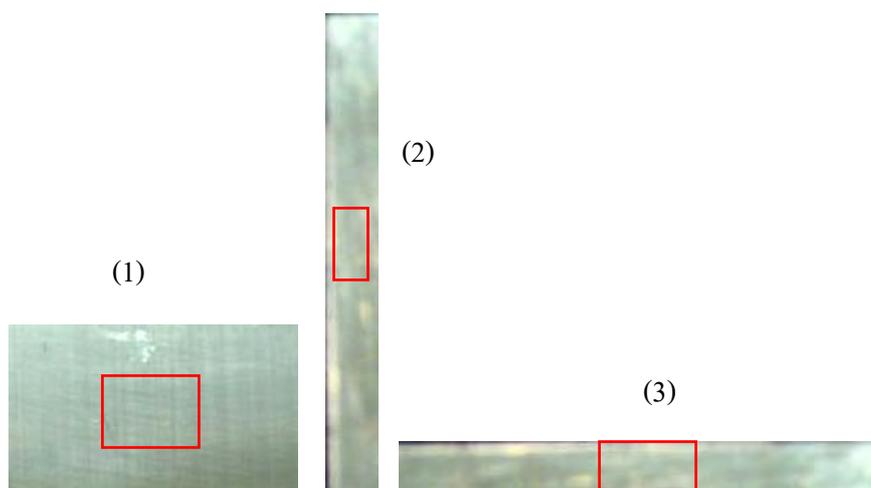
## บทที่ 4 ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการทดลองในงานวิจัยที่ได้ทำการทดสอบ เพื่อนำข้อมูลมาสรุปผลงานวิจัย โดยมีลำดับขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบความแข็งและโครงสร้างมหภาคก่อนการเชื่อม โดยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์ค แก๊สปกคลุม
2. การทดสอบความแข็ง จากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมอะลูมิเนียม 7075 T651
3. การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค จากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมอะลูมิเนียม 7075 T651
4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 4.1 ผลโครงสร้างมหภาคและความแข็งก่อนการเชื่อม

ก่อนการเชื่อมได้มีการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคชิ้นงาน โดยมีตำแหน่งการตัดชิ้นงานตามเงื่อนไข การทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.1 ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นดังแสดงในรูปที่ 4.2 ชิ้นงานที่รีดเย็นร้อยละ 5 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และได้มีการทดสอบความแข็งก่อนทำการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.9 เพื่อการเปรียบเทียบกับความแข็งหลังการให้ความร้อนการเชื่อม ตามแผนภูมิการทดลอง ในรูปที่ 3.15 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการตัดชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (1) คือ ผิวหน้า (2) คือด้านตัดขวาง และ (3) คือด้านข้าง ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานที่ไม่รีดเย็นก่อนทำการเชื่อม ที่กำลังขยาย 100X



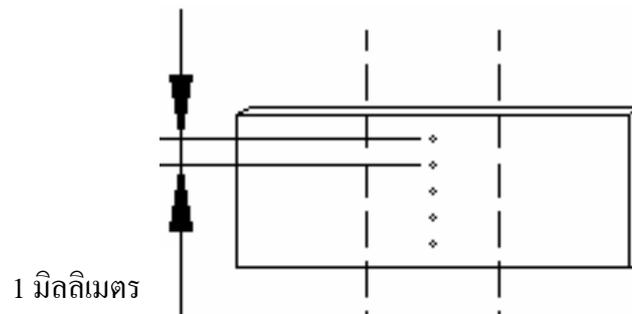
รูปที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ก่อนทำการเชื่อม ที่กำลังขยาย 100X



รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ก่อนทำการเชื่อม ที่กำลังขยาย 100X



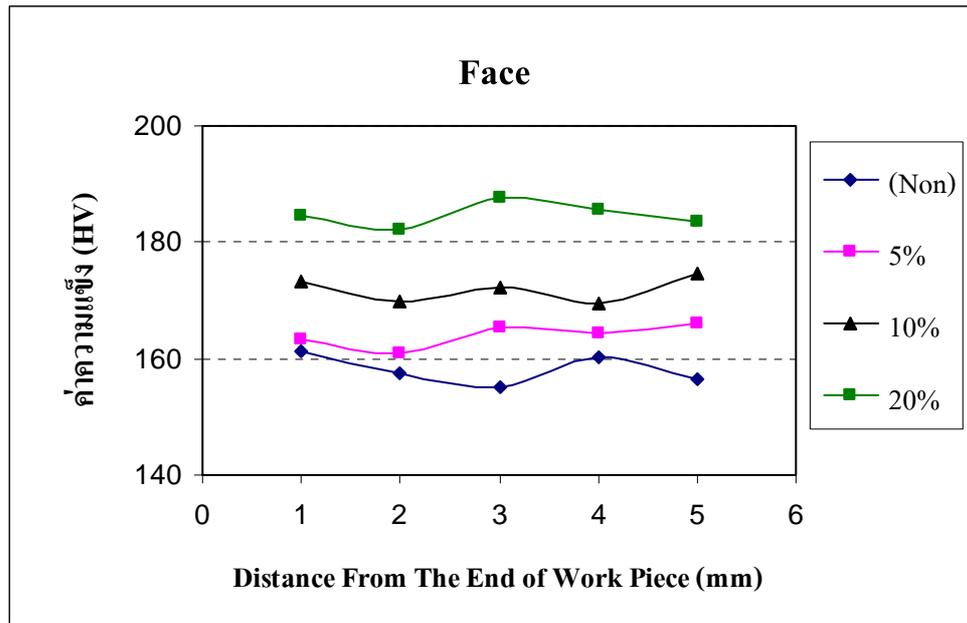
รูปที่ 4.5 โครงสร้างมหภาคชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ก่อนทำการเชื่อม ที่กำลังขยาย 100X



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการกวัดความแข็งผิวหน้าชิ้นงาน

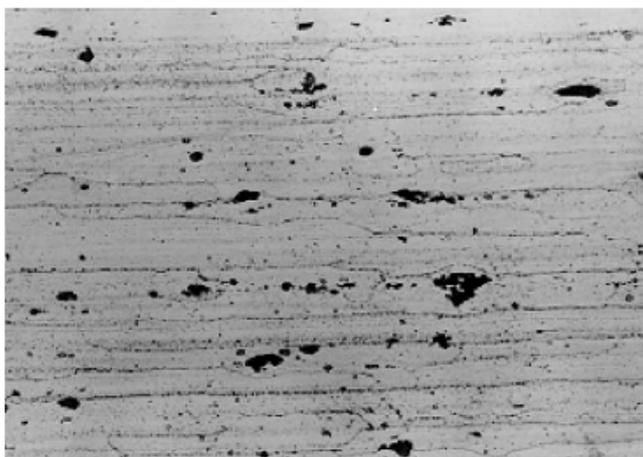
ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งผิวหน้าวัสดุก่อนทำการเชื่อมหน่วยเป็น HV (Face)

Point (mm) Type of Condition	1	2	3	4	5
1. (Non)	161.3	157.5	155	160.2	156.4
2. (5%)	163.3	160.9	165.3	164.2	166.2
3. (10%)	173.4	170	172.2	169.4	174.7
4. (20%)	184.5	182.2	187.7	185.7	183.5



รูปที่ 4.7 กราฟความแข็งผิวหน้าชิ้นงานก่อนการเชื่อม

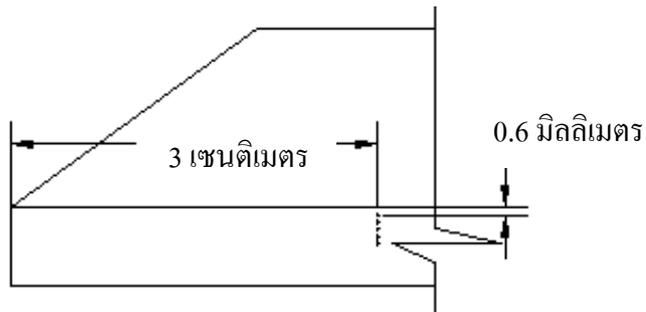
จากกราฟรูปที่ 4.7 ได้แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ทำการกดความแข็ง จะมีความแข็งที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการบีบอัดของเกรน ในแต่ละเกรน ซึ่งแต่ละพื้นที่มีธาตุไม่เท่ากัน เหตุจากก่อนทำการกดได้มีการสังเกตลักษณะของพื้นที่ ซึ่งมีความแตกต่างกัน ช่วงที่มีความแข็งมาก จะกดโดนส่วนที่มีปริมาณซิลิกอนและทองแดงมากกว่าบริเวณอื่น ซึ่งในที่นี้จะคล้าย ๆ กันกับ Cheng Liu และคณะ [11] ได้ทำการทดลองมา ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์กันของเฟส  $MgZn_2$  และ  $MgAlCu$  ดังแสดงในรูปที่ 4.8



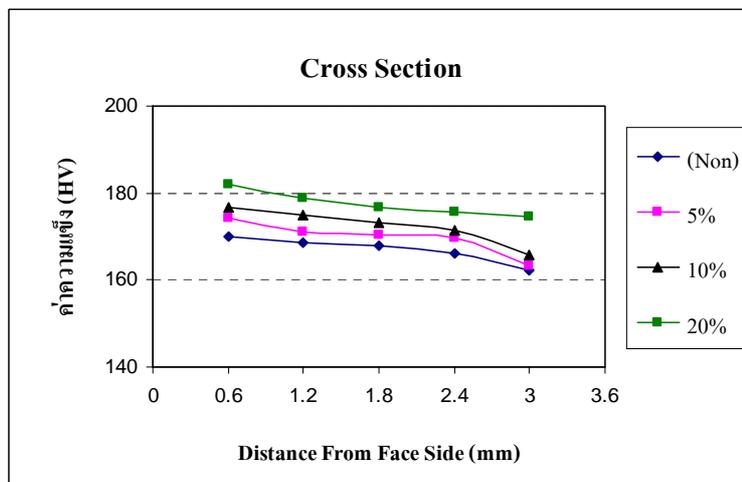
รูปที่ 4.8 โครงสร้างด้านตัดขวางชิ้นงาน 7075-T6 [11]

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งด้านตัดขวางของวัสดุก่อนทำการเชื่อมมีหน่วยเป็น HV (Cross Section)

Point (mm) / Type of Condition	0.6	1.2	1.8	2.4	3
1. (Non)	170	168.6	168	166.2	162.3
2. (5%)	174.4	171.2	170.4	169.7	163.3
3. (10%)	176.6	175	173.3	171.5	165.7
4. (20%)	182.1	178.8	176.6	175.6	174.5



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งการกดวัดความแข็งด้านตัดขวางชิ้นงาน



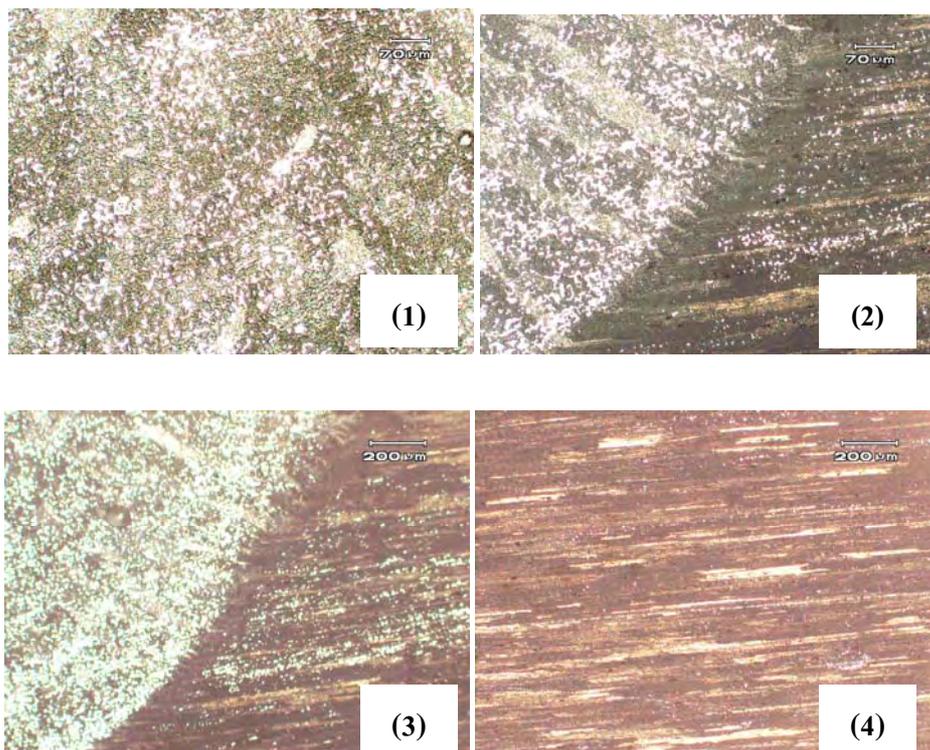
รูปที่ 4.10 กราฟความแข็งด้านตัดขวางชิ้นงานก่อนการเชื่อม

จากกราฟรูปที่ 4.10 ได้จะแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า การบีบอัดของเกรนในด้านตัดขวาง จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าด้านหน้าสัมผัสกับลูกกลิ้ง เกล็ดความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การรีดที่มากที่สุดในการทดลอง ซึ่งไม่ว่าในเกรนนั้น ๆ จะมีธาตุใดมากน้อยเพียงไร ก็จะไม่ทำให้ค่าความแข็งแรงลดต่ำลงมาก จะคงความแข็งแรงอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันมาก แนวโน้มความแข็งแรงจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อมีระยะการกดเข้าหาศูนย์กลางขึ้นงาน ซึ่งในที่นี้จะแตกต่างกับ Cheng Liu และคณะ [11] ที่ได้ทำการทดลองนั้นเป็นงานที่ไม่ได้ทำการรีดขึ้นมา

## 4.2 ผลความแข็งแรงและผลโครงสร้างมหภาคจากให้ความร้อนหลังการเชื่อม

จากการเชื่อมได้ให้ความร้อน หลังการเชื่อมตามแผนภูมิการทดลองในรูปที่ 3.15 และตำแหน่งการกดขึ้นงานในรูปที่ 3.16 ได้ผลความแข็งแรงและโครงสร้างมหภาค ดังต่อไปนี้

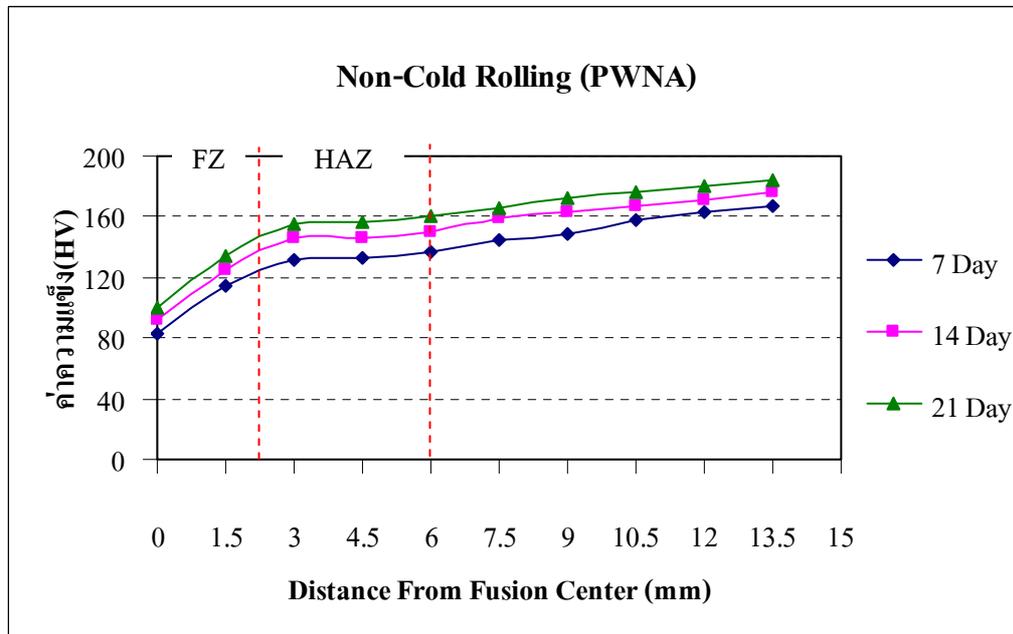
### ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น



รูปที่ 4.11 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณรอยเชื่อมด้านขวา ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น โดยให้ความร้อนแบบ PWNA 7 วัน จาก (1) เป็นเนื้อเชื่อม (2) และ (3) เป็นขอบแนวเชื่อม (4) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X และ 100X

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงการให้ความร้อนของชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ PWNA มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) \ Postweld	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
7 Day	83.2	113.9	131.4	132.4	136.2	144.5	149	157.9	162.6	167.5
14 Day	91.9	124.5	145.9	146.2	150.2	159	162.9	167.5	171.6	175.7
21 Day	99.5	134.1	154.7	157	160.3	165.9	171.8	175.8	180.3	184.4

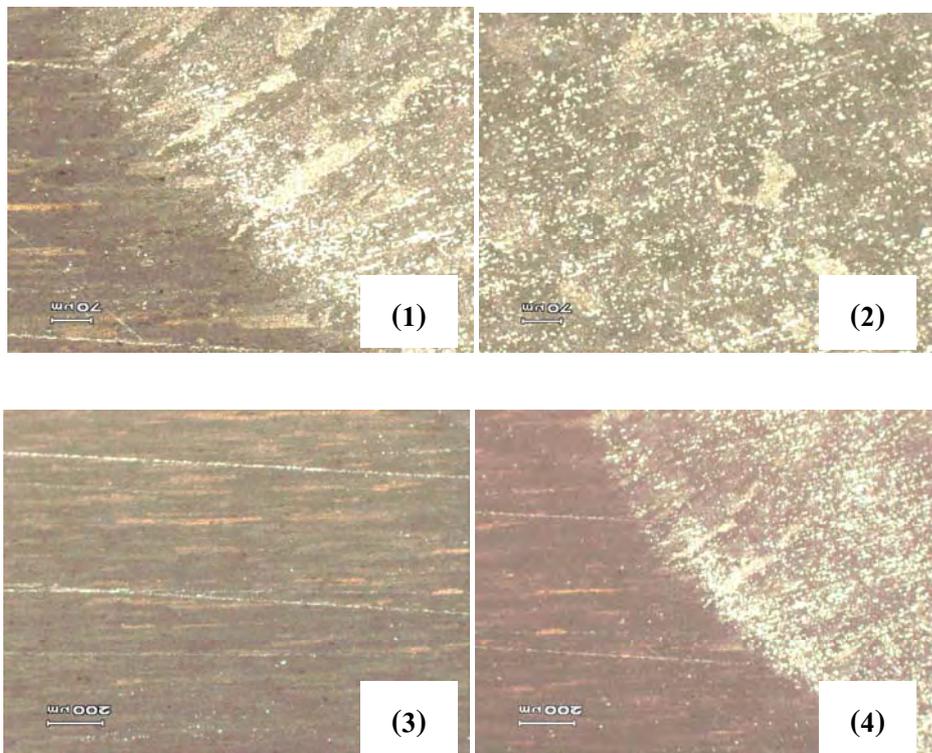


รูปที่ 4.12 กราฟความแข็งแรงการให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ PWNA

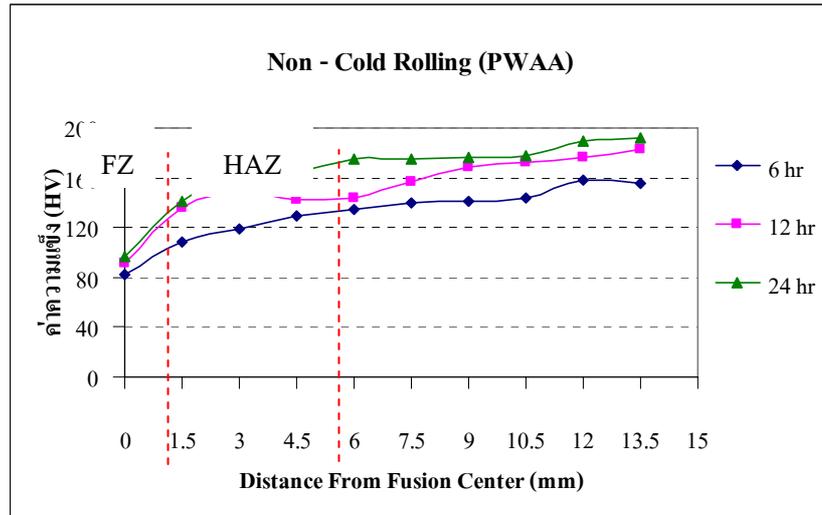
วิเคราะห์จากกราฟค่าเฉลี่ยรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA กับชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการรีดเย็นยิ่งปล่อยให้เวลานานเท่าไร ความแข็งยิ่งเพิ่มมากขึ้น เนื้อเชื่อมจะมีความแข็งน้อยที่สุด บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน จะมีความแข็งมากกว่าเนื้อเชื่อม แต่จะน้อยกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก สังเกตได้ว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก จะมีความแข็งใกล้เคียงกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับกรเชื่อม 7075-T6 ซึ่ง Cheng Liu และคณะ [11] ได้ทำการทดลองมานั้นจะเห็นได้ว่า มีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก อันเป็นผลเนื่องมาจากส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ ซึ่ง 7075-T6 มี Zn ร้อยละ 5.1 แต่ 7075-T651 มี Zn อยู่ถึงร้อยละ 5.62

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ PWAA มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) Postweld	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
6 hr	82.9	108.6	118.8	129.4	134.6	140.1	141.8	143.5	158.1	155.2
12 hr	91	135.7	149.1	143.1	144.2	157.2	168	172.5	177	183
24 hr	96.9	140.9	165.2	164.8	175.3	174.8	176.4	178.2	189.9	192.6



รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวาง บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านซ้ายชิ้นงานชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น โดยให้ความร้อนแบบ PWAA 6 hr จาก (1) และ (4) เป็นขอบเนื้อเชื่อม (2) เป็นเนื้อเชื่อม (3) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X และ 100X



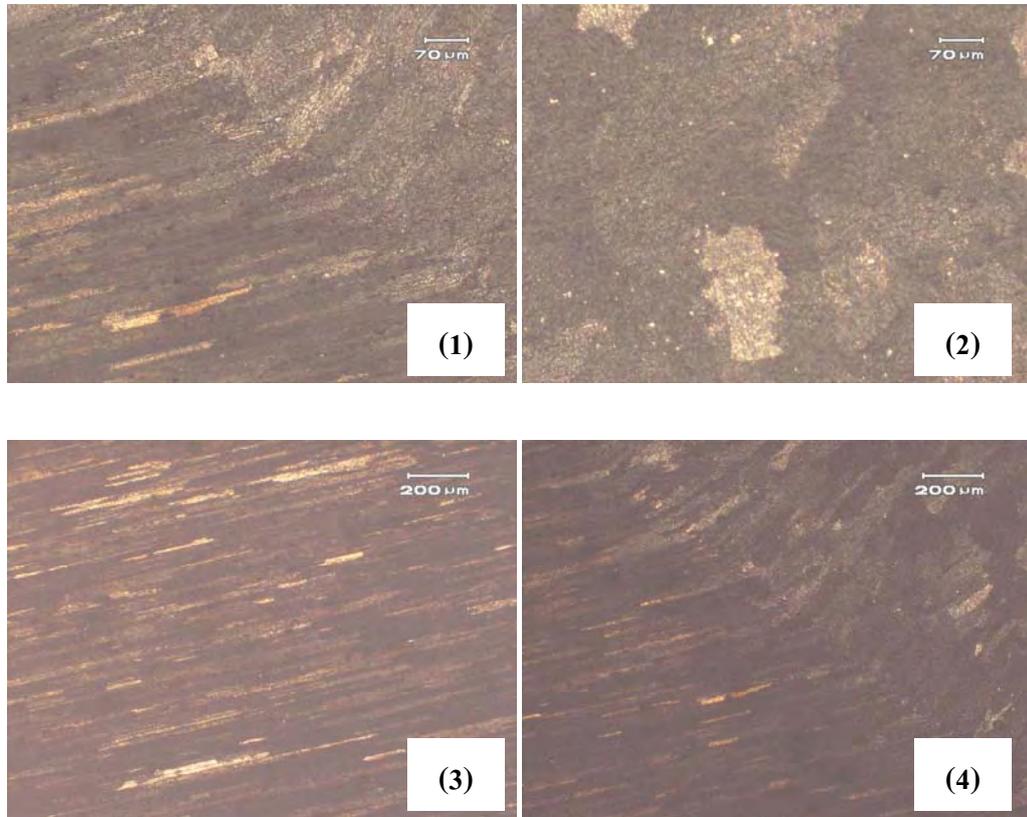
รูปที่ 4.14 กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ PWAA

วิเคราะห์จากกราฟค่าเฉลี่ยรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 6 ชั่วโมง ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมจะอ่อนกว่าการให้ความร้อนแบบ PWNA รวมทั้งบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในและด้านนอก แม้แต่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนอีกด้วย การให้ความร้อน 12 ชั่วโมง มีค่าความแข็งบริเวณขอบรอยเชื่อมแข็งกว่าการปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิปกติ 21 วันเพียงเล็กน้อย และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนความแข็ง ก็ยังต่ำกว่ารวมไปถึงความแข็งที่ต่ำกว่าขอบบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกของตัววัสดุเองอีกด้วย โดยภาพรวม ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง มีความแข็งบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกและด้านในรวมไปถึงเนื้อวัสดุ ดีที่สุดในชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการรีดเย็น จะเห็นได้ว่าจะคล้าย ๆ กันกับกรณีของ Cheng Liu และคณะ [11] ได้ทำการทดลองมาว่า ความแข็งของบ่อหลอมละลายจะไม่สามารถกลับคืนมาได้เพียงพอเพียงให้ใกล้เคียงกับตัววัสดุ

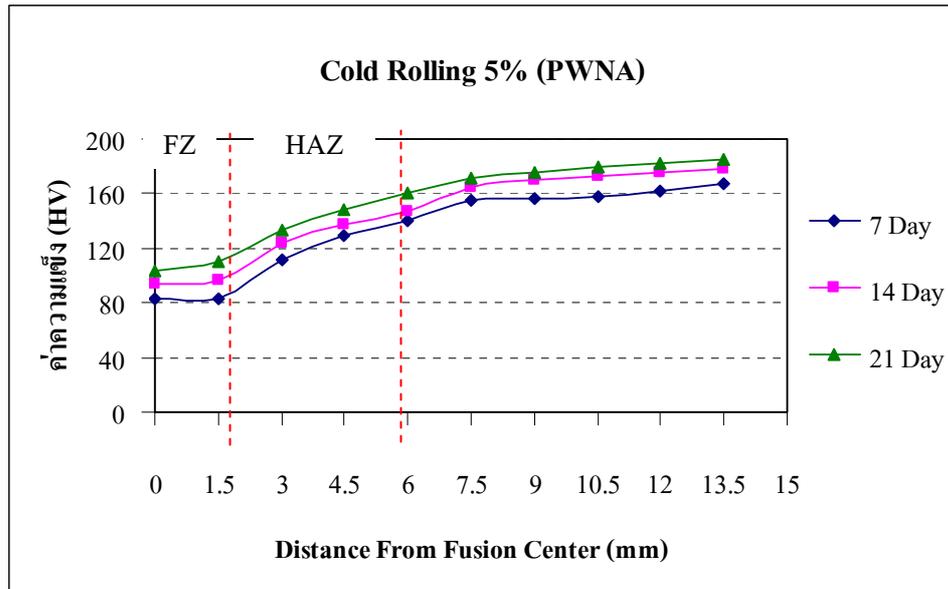
ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ PWNA มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) / Postweld	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
7 Day	83	82.4	111.4	129.9	140.2	154.9	156.4	157.7	162.3	167.9
14 Day	93.5	96.1	124.1	137.1	147.6	164	170.2	172.6	175.4	178.6
21 Day	102.8	110	134	148.9	160.7	171.2	175.7	179.6	182.7	185.5

### ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5



รูปที่ 4.15 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านซ้ายชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ PWNA 14 Day จาก (2) เป็นเนื้อเชื่อม (1) และ (4) เป็นบริเวณขอบรอยเชื่อม (3) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 50X และ 100X

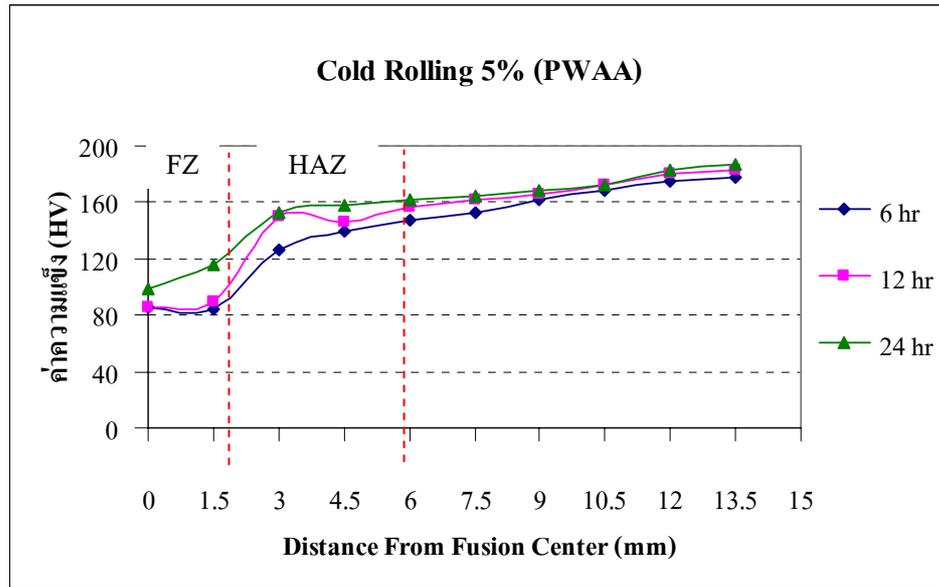


รูปที่ 4.16 กราฟความแข็งการให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ PWNA

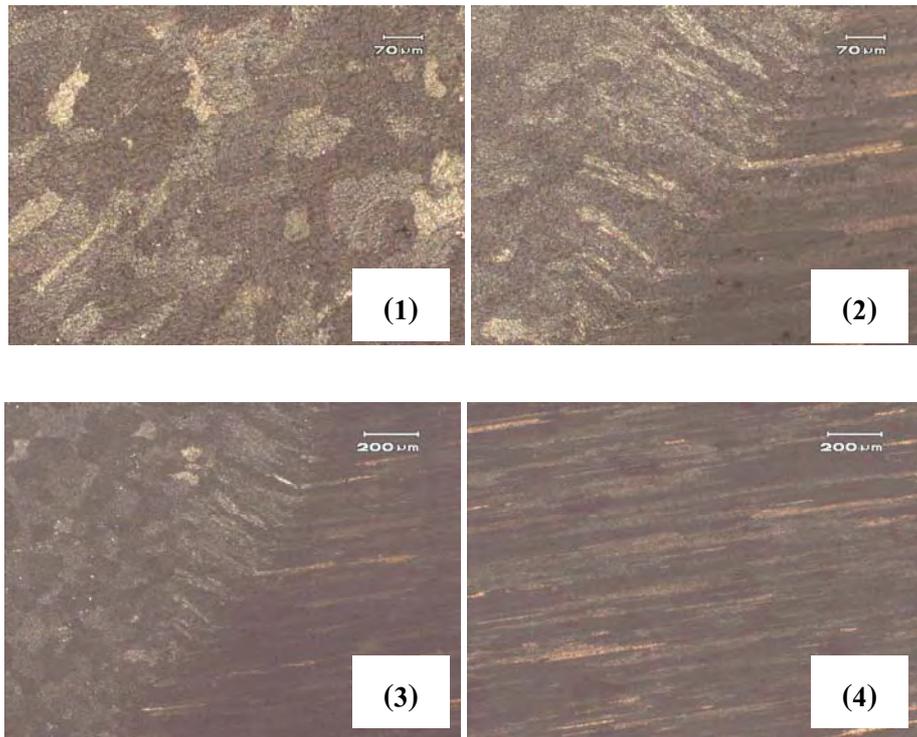
วิเคราะห์จากกราฟรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า การให้ความร้อนแบบ PWNA 7 และ 14 วัน ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมและบริเวณขอบรอยเชื่อมใกล้เคียงกัน แต่การใช้เวลา 21 วัน ค่าความแข็งบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในจะมากกว่าเนื้อเชื่อม บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกมีความแข็งมากกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน แต่จะมีความแข็งน้อยกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะการกคออกไปยังเนื้อวัสดุ จะแตกต่างกับชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นเพียงบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน ที่มีความแข็งไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในกรณีนี้ Cheng Liu และคณะ [11] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างงานที่หล่อมากับงานที่รีดเย็น ซึ่งจะคล้าย ๆ กันแตกต่างเพียงบางเงื่อนไข ในการทดลองกับ 7075-T651 ซึ่งมีการเคลื่อนลวดที่เร็วจึงทำให้เกิดการสูญเสีย Mg มีน้อยกว่า จึงทำให้ยังมีความแข็งมากกว่านั่นเอง

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ PWAA มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) / Postweld	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
6 hr	84.9	84.6	126.8	139.9	146.8	152.8	162.1	168.9	175.2	178.1
12 hr	85.7	89.7	150	146.2	156.1	161.7	165.6	172.8	180.6	182.8
24 hr	99	116.1	152	158.4	161.4	163.9	168.9	173	182.5	187.3



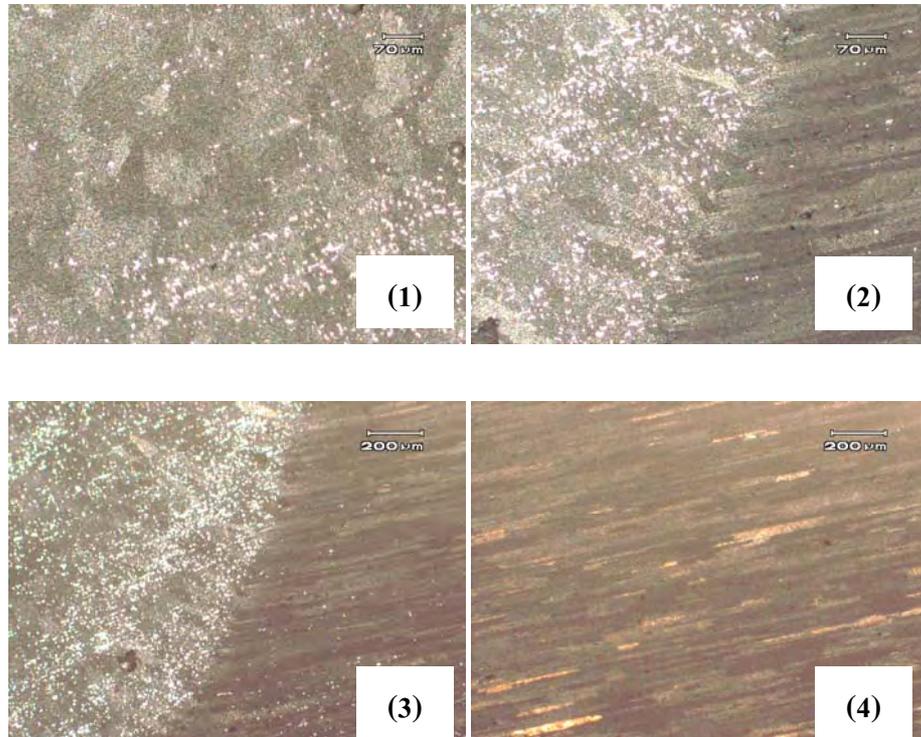
รูปที่ 4.17 กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ PWAA



รูปที่ 4.18 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านขวาชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 โดยการให้ความร้อนแบบ PWAA 12 hr จาก (1) เป็นเนื้อเชื่อม (2) และ (3) เป็นขอบแนวเชื่อม (4) เป็นเนื้อวัสดุชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X และ 100X

จากการวิเคราะห์ ที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.17 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมสูงกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน และบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในจะอ่อนกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกมาก บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอใกล้เคียงกันออกไปถึงเนื้อวัสดุ การใช้เวลา 12 ชั่วโมง บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในมีความแข็งสูงกว่าเนื้อเชื่อมเล็กน้อย แต่บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในจะมีความแข็งต่ำกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกมาก และบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกยังมีความแข็งมากกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนอีกด้วย จากนั้นความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอใกล้เคียงกันออกไปถึงเนื้อวัสดุ ส่วนเวลา 24 ชั่วโมง บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในจะมีความแข็งมากกว่าเนื้อเชื่อมมาก และบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกก็มีความแข็งมากกว่าด้านใน จะเห็นได้ว่าจากบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก ไปจนถึงบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอใกล้เคียงกันออกไปถึงเนื้อวัสดุ จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานรีดเย็น ร้อยละ 5 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าความแข็งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมากที่สุด ซึ่งจะคล้าย ๆ กับกรณีที่ Cheng Liu และคณะ [11] ทำการทดลอง คือ ได้แสดงการแยกตัวออก ของธาตุผสมโดยตรงที่ไม่สมดุลเกิดการแข็งตัว และผลจากการขาดการ Precipitation ที่เป็นเหตุให้แข็งแรงไม่พอใน Metrix ของบริเวณที่ได้รับความร้อนจากการเชื่อม

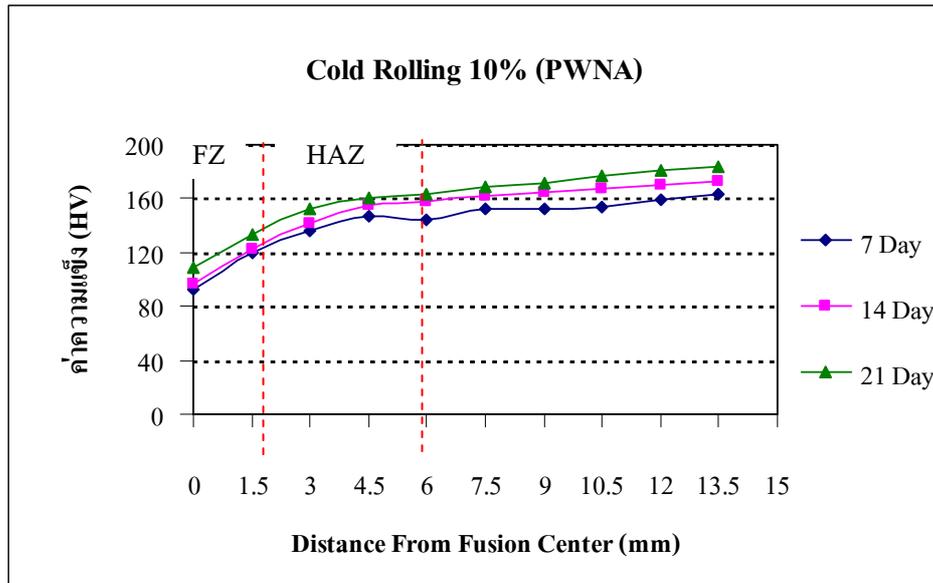
### ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10



**รูปที่ 4.19** โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านขวาชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 โดยการให้ความร้อนแบบ PWNA 7 วัน จาก (1) เป็นเนื้อเชื่อม (2) และ (3) เป็นขอบแนวเชื่อม (4) เป็นชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X และ 100X

**ตารางที่ 4.7** ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ PWNA มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) Postweld	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
7 Day	92.2	119.6	136.3	147.1	144.4	152	152.5	153.8	159.8	162.8
14 Day	96.9	122.7	141.1	155.1	158.2	161.3	164.1	166.8	170.6	173
21 Day	108.2	133.4	152.6	161.1	163.6	168.2	171.6	176.2	181	183.5

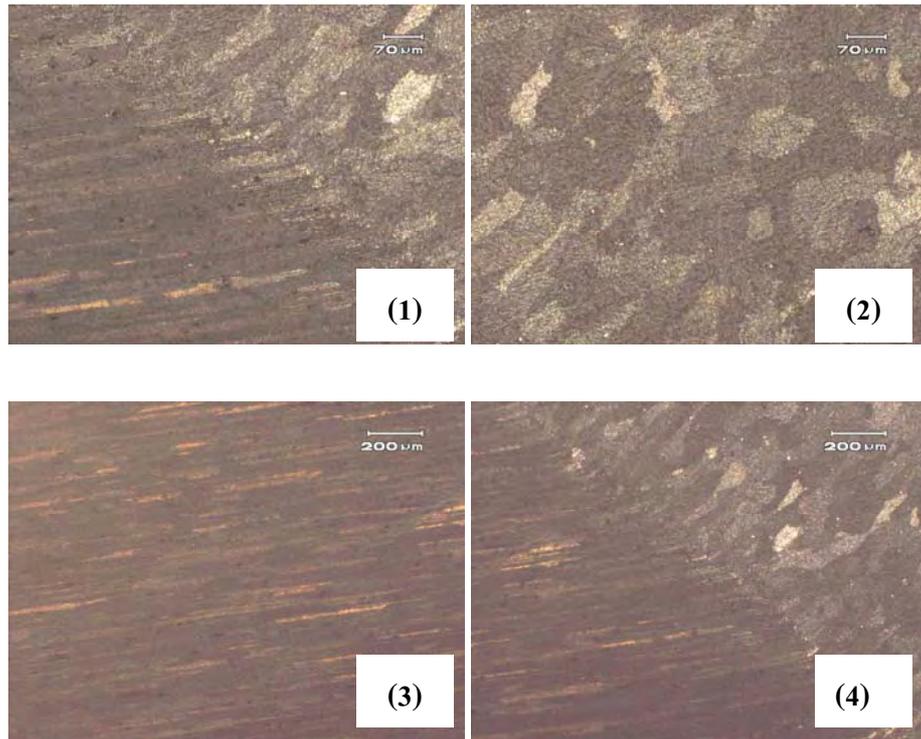


รูปที่ 4.20 กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ PWNA

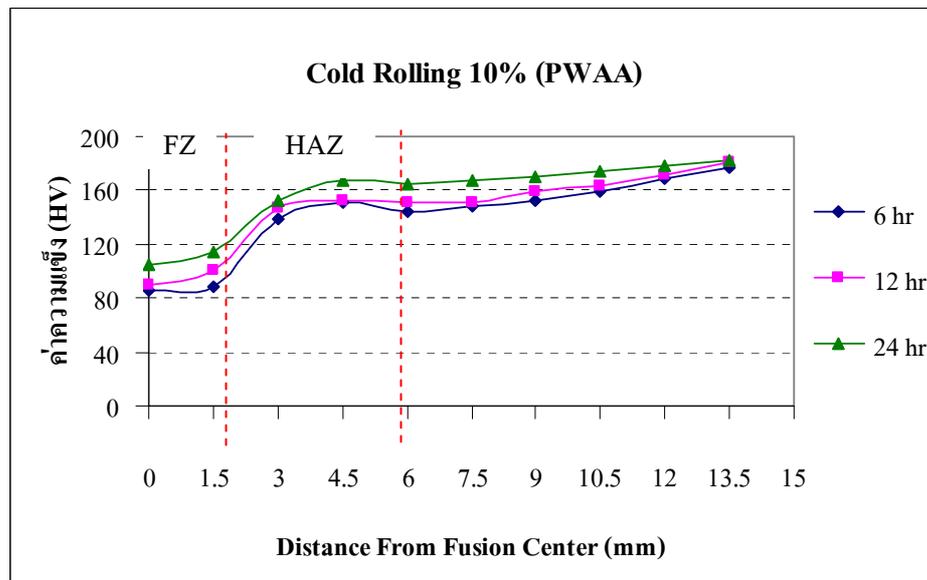
วิเคราะห์จากกราฟรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่า การปล่อยให้ความร้อนแบบ PWNA 7 และ 14 วัน ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมและบริเวณขอบรอยเชื่อมใกล้เคียงกัน จะแตกต่างกันที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ซึ่งการใช้เวลา 7 วัน จะต่ำกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก แต่การใช้เวลา 21 วัน ค่าความแข็งบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในจะมากกว่าเนื้อเชื่อม บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกมีความแข็งมากกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน แต่จะมีความแข็งน้อยกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน และจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น ตามระยะการกอดออกไปยังเนื้อวัสดุ จะมีลักษณะแนวโน้มที่คล้ายกับชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น ต่างกันเพียงระดับความแข็งเท่านั้น ซึ่งในกรณีนี้จะแตกต่างกันกับ Cheng Liu และคณะ [11] ที่ได้ทำการทดลองการเชื่อมเปรียบเทียบ Laser Beam Welding กับ Gas Tungsten Arc Welding ที่มีการวัดความแข็ง หลังการเชื่อมเสร็จจึงลื่นกับการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

ตารางที่ 4.8 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ PWAA มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) / Postweld	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
6 hr	85.9	88.7	138.4	150.5	144.6	148.8	152.1	159	168.5	177.5
12 hr	89.7	101.3	147.4	151.9	150.8	150.7	158.7	163.7	171.9	180.3
24 hr	105.3	114.8	152.1	167.6	165	167	169.5	173.7	178	182.6



รูปที่ 4.21 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านซ้ายชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ PWAA 12 hr จาก (2) เป็นเนื้อเชื่อม (1) และ (4) เป็นขอบแนวเชื่อม (3) เป็นชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X และ 100X



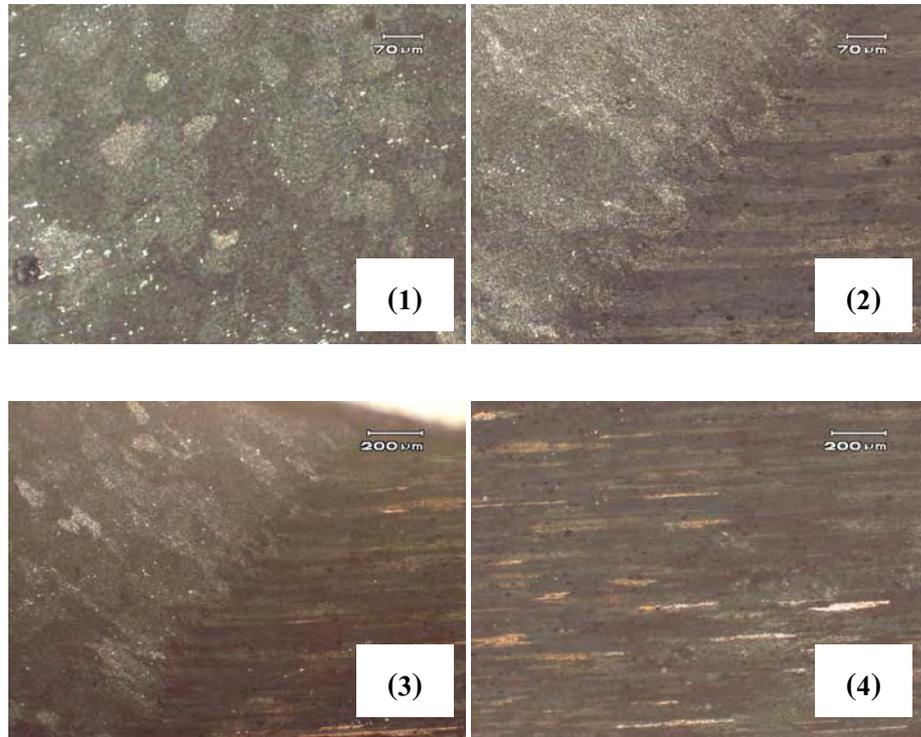
รูปที่ 4.22 กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ PWAA

จากการวิเคราะห์ที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.22 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมใกล้เคียงกับบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน และบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน จะอ่อนกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกมาก บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกจะแข็งน้อยกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน แต่ความแข็งจะลดลงจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนช่วง 3 มิลลิเมตร จากนั้นความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามระยะการกดอกไปยังเนื้อวัสดุ การใช้เวลา 12 ชั่วโมง บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในมีความแข็งสูงกว่าเนื้อเชื่อม แต่บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในจะมีความแข็งต่ำกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกมาก และบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก ยังมีความแข็งน้อยกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนไม่มากนัก แต่จากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจะมีความแข็งลดลงในช่วง 3 มิลลิเมตร จากนั้นความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามระยะการกดอกไปยังเนื้อวัสดุ ส่วนเวลา 24 ชั่วโมง บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในจะความแข็งมากกว่าเนื้อเชื่อม และบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกก็จะมีค่าความแข็งมากกว่าด้านในมาก แต่จากบริเวณนั้นจะมีความแข็งลดลงในช่วง 3 มิลลิเมตร จากนั้นความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามระยะการกดอกไปยังเนื้อวัสดุ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าความแข็งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมากที่สุด ซึ่งในกรณีนี้จะคล้าย ๆ กันกับ Cheng Liu และคณะ [11] ที่ได้ทำการทดลองการเชื่อมเปรียบเทียบ Laser Beam Welding กับ Gas Tungsten Arc Welding ที่มีการวัดความแข็งหลังการเชื่อมเสร็จสิ้น กับการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ที่มีความแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ให้ความร้อนและในอัตราการรีดเย็นร้อยละ 10 นี้ ส่งผลให้ค่าความแข็งดีที่สุด เนื่องจากอัตราการรีดเย็นที่เหมาะสมกับการ Precipitation ขณะที่ได้รับความร้อน 120 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.9 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานร้อยละ 20 แบบ PWNA มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) Postweld	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
7 Day	82.6	84.8	131	132.3	134.1	144.6	142.6	152.2	158.9	162.7
14 Day	94.2	100.5	139.6	145.4	148.5	159.3	165.1	171.1	175.9	182
21 Day	102.7	109.3	147.7	151.5	157.3	163.8	168.3	175.4	183.8	188.2

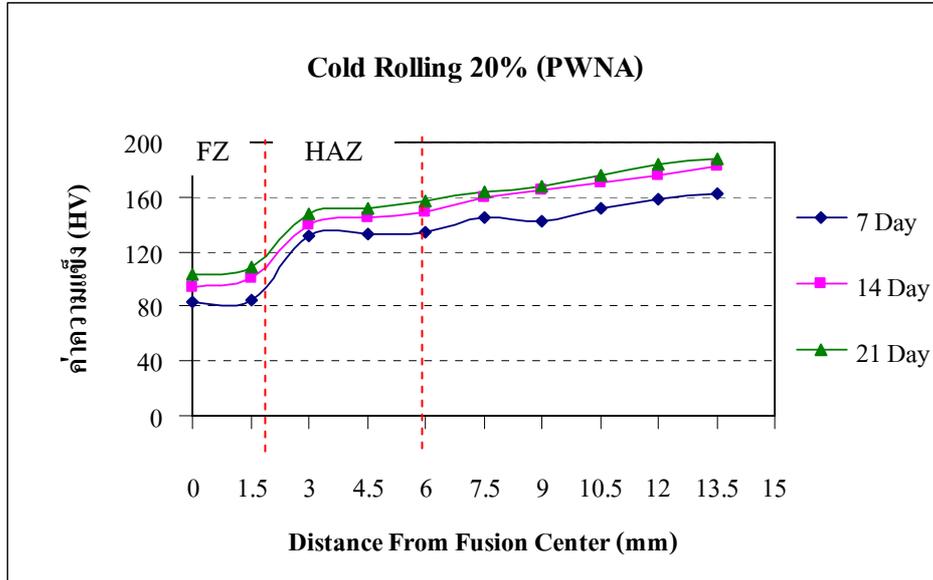
### ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20



**รูปที่ 4.23** โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านขวาชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 โดยให้ความร้อนแบบ PWNA 7 วัน จาก (1) เป็นเนื้อเชื่อม (2) และ (3) เป็นขอบแนวเชื่อม (4) เป็นชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X และ 100X

จากการวิเคราะห์กราฟในรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่า การปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมและบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในใกล้เคียงกัน บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกจะแข็งกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในมาก การใช้เวลา 7 วัน บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีความแข็งน้อยกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก ถัดจากบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก 3 มิลลิเมตร จะมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะการคดออกไปยังเนื้อวัสดุ การใช้เวลา 14 วัน และ 21 วัน ค่าความแข็งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน จะแข็งกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก และจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะการคดออกไปยังเนื้อวัสดุ จะมีลักษณะแนวโน้มที่คล้ายกับชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ในส่วนของความแข็งเนื้อเชื่อมและบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน ต่างกันเพียงบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกที่มีความแข็งกว่า และมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะการคดออกไปยังเนื้อวัสดุ ซึ่งในกรณีนี้จะแตกต่างกันกับ Cheng Liu และคณะ [11] ที่ได้ทำการทดลองการเชื่อมเปรียบเทียบ Laser Beam Welding กับ Gas Tungsten Arc Welding เพียงเล็กน้อย อาจจะเป็นในเรื่องของส่วนผสมเคมีที่ต่างกัน และโอกาสในการเกิด Precipitation ที่แตกต่างกัน จากงาน 7075-T6 ที่

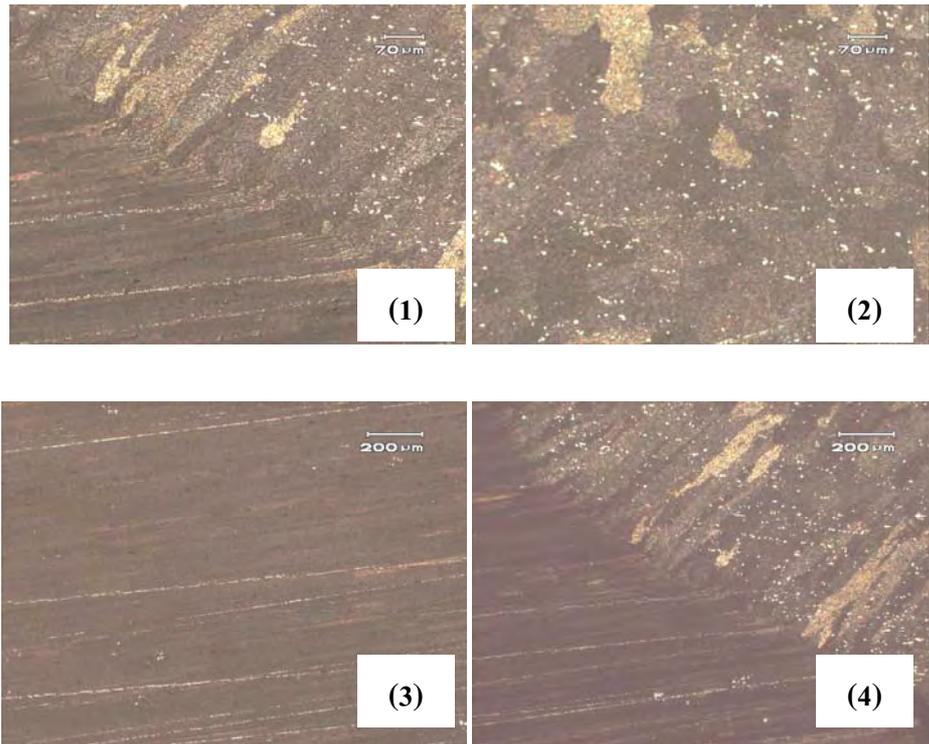
ไม่ได้รีดเย็นกับงาน 7075-T651 ที่ผ่านการรีดเย็นมา ซึ่งกรรมวิธีการรีดเย็นจะทำให้เกิดเกรนต่อพื้นที่หน้าตัดที่เยอะกว่า ต่อพื้นที่หน้าตัดถ้าเทียบกับพื้นที่หน้าตัดเดิม



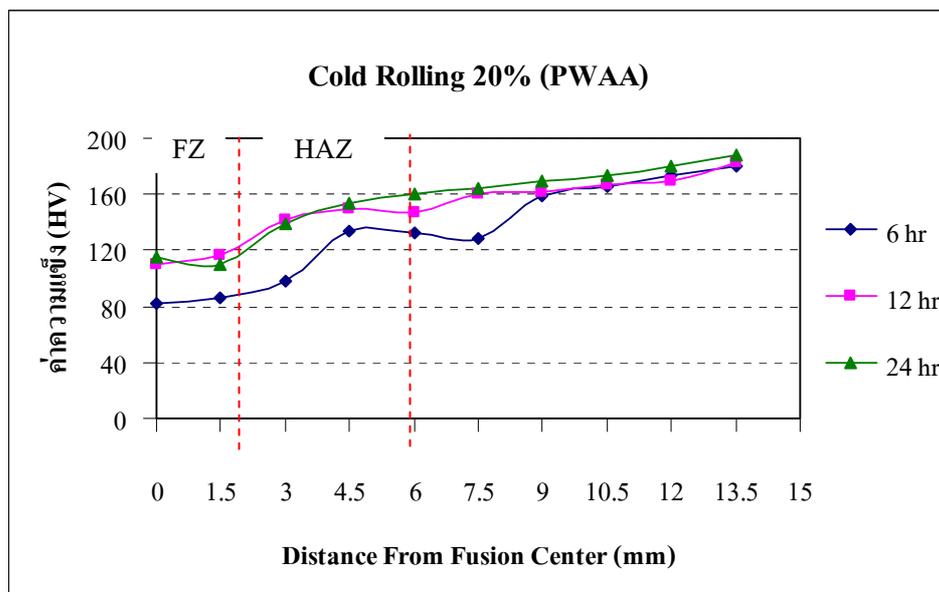
รูปที่ 4.24 กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรอยละ 20 แบบ PWNA

ตารางที่ 4.10 ค่าความแข็งการให้ความร้อนชิ้นงานรีดเย็นรอยละ 20 แบบ PWAA มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) / Postweld	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
6 hr	82.6	86.7	98.2	133.9	132.1	128.3	158.4	165.7	173.8	179.8
12 hr	109.9	116.5	141.4	149.7	146.6	160.9	162	167	169.6	183.1
24 hr	114.6	110.5	139	153.8	160.7	164	169.2	173.8	179.9	187.6



รูปที่ 4.25 โครงสร้างมหภาคแนวตัดขวางบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านซ้ายชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 โดยให้ความร้อนแบบ PWAA 12 hr จาก (1) และ (4) เป็นขอบแนวเชื่อม (2) เป็นเนื้อเชื่อมและ (3) เป็นชิ้นงานที่กำลังขยาย 50X และ 100X



รูปที่ 4.26 กราฟความแข็ง การให้ความร้อนหลังการเชื่อมของชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 แบบ PWAA

จากการวิเคราะห์ที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.26 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ค่าความแข็งเนื้อเชื่อมใกล้เคียงกับบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน และบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน จะอ่อนกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกจะแข็งน้อยกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน แต่ความแข็งจะลดลง เมื่อออกไปยังเนื้อวัสดุในช่วง 3 มิลลิเมตร จากนั้นความแข็งจะเพิ่มขึ้น ตามระยะการกดออกไปยังเนื้อวัสดุ การใช้เวลา 12 ชั่วโมง บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน ความแข็งสูงกว่าเนื้อเชื่อม แต่บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในจะมีความแข็งต่ำกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกมาก และบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก ยังมีความแข็งน้อยกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนไม่มากนัก จากบริเวณนั้นจะมีความแข็งลดลงในช่วง 3 มิลลิเมตร จากนั้นความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ตามระยะการกดที่ออกไปยังเนื้อวัสดุ ส่วนเวลา 24 ชั่วโมง บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในจะความแข็งน้อยกว่าเนื้อเชื่อม และบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกก็จะมีค่าความแข็งมากกว่าด้านในมาก จากนั้นความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ตามระยะการกดที่ออกไปยังเนื้อวัสดุ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 การให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าความแข็งของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมากที่สุด แต่เกิดปัญหาที่บริเวณรอยเชื่อมด้านใน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Cheng Liu และคณะ [11] จะเห็นได้ว่า การให้ความร้อนยิ่งนานยิ่งทำให้เกิดการ Precipitation ที่มากเกินไป เกิดการจับรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ และกระจายเป็นไปได้อย่างไม่สมบรูณ์

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลสรุปของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมทุกรูปแบบที่ได้จากการทดลอง จากกราฟจะมองแนวโน้มน่าที่บ่งบอกได้อย่างชัดเจนว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการรีดเย็น หรือชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น และการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเงื่อนไขใดดีที่สุด ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

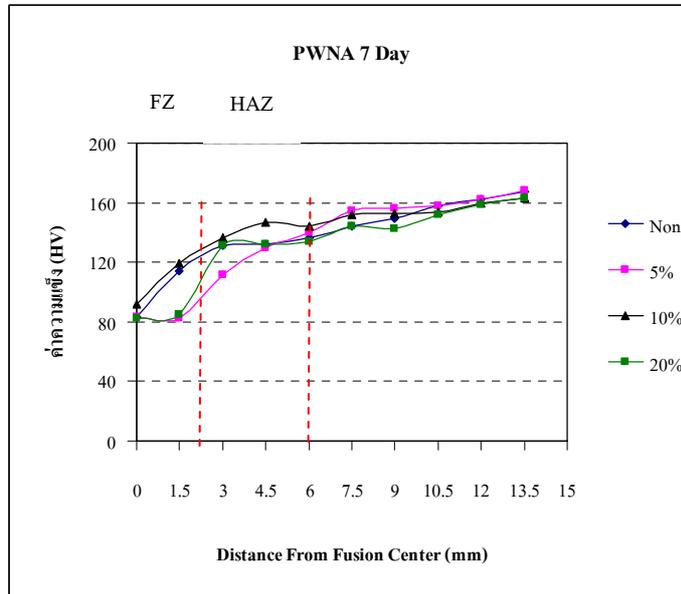
### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging 7 วัน (PWNA 7 Day) มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) Type of Condition	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
Non	83.2	113.9	131.4	132.4	136.2	144.5	149	157.9	162.6	167.5
5%	83	82.4	111.4	129.9	140.2	154.9	156.4	157.7	162.3	167.9
10%	92.2	119.6	136.3	147.1	144.4	152	152.5	153.8	159.8	162.8
20%	82.6	84.8	131	132.3	134.1	144.6	142.6	152.2	158.9	162.7

ค่าความแข็งจากตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1 กราฟแนวโน้มน่า จะสรุปได้ว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 7 วัน จะพบได้ว่าแนวโน้มน่าของความแข็งจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามระยะทางจากศูนย์กลางเนื้อเชื่อมไปจนถึงตัววัสดุชิ้นงาน การให้ความร้อนในลักษณะนี้จะเห็นได้ว่า เนื้อเชื่อมกับบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในและนอกชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 มีความแข็งโดดเด่นมากที่สุด แม้กระทั่งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนอีกด้วย ระยะทางห่างออกไปที่บริเวณเนื้อวัสดุชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 จะมีความแข็งที่มากที่สุด และที่ระยะ 10.5 มิลลิเมตร เป็นต้นไป ชิ้นงานรีดเย็น 5 และชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น จะมีความแข็งมากที่สุดใกล้เคียงกัน ในด้านงานเชื่อมอะลูมิเนียม จุดที่คำนึงถึงจะเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ดังนั้นชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ดีที่สุดในเงื่อนไขนี้ เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีความแข็งใกล้เคียงกับตัววัสดุ ซึ่งจะมีความแตกต่างกับ T. Ma และคณะ [10] ที่ได้ทำการทดลองซึ่งใช้วัสดุ 7020 และ 7022 จะใช้

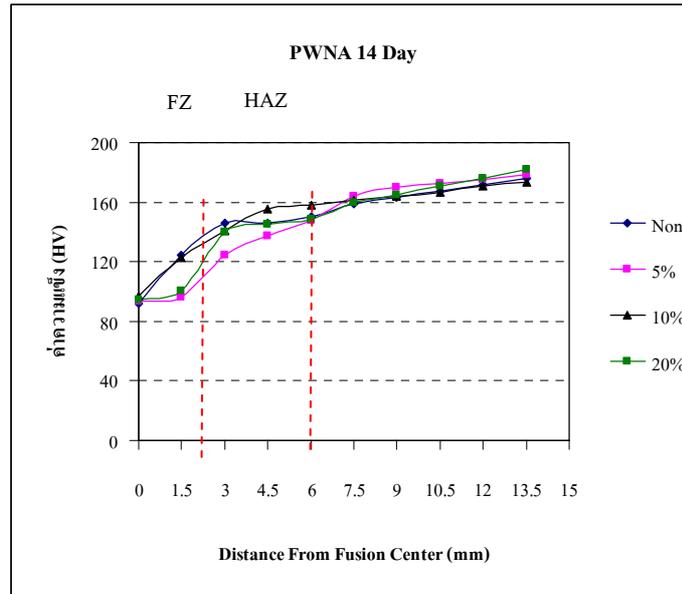
เวลา 3 เดือน และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน จากการเชื่อมความแข็งจะไม่สามารถกลับคืนมาให้ใกล้เคียงกับตัววัสดุ



รูปที่ 5.1 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 7 วัน

ตารางที่ 5.2 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging 14 วัน (PWNA 14 Day) มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) \ Type of Condition	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
Non	91.9	124.5	145.9	146.2	150.2	159	162.9	167.5	171.6	175.7
5%	93.5	96.1	124.1	137.1	147.6	164	170.2	172.6	175.4	178.6
10%	96.9	122.7	141.1	155.1	158.2	161.3	164.1	166.8	170.6	173
20%	94.2	100.5	139.6	145.4	148.5	159.3	165.1	171.1	175.9	182

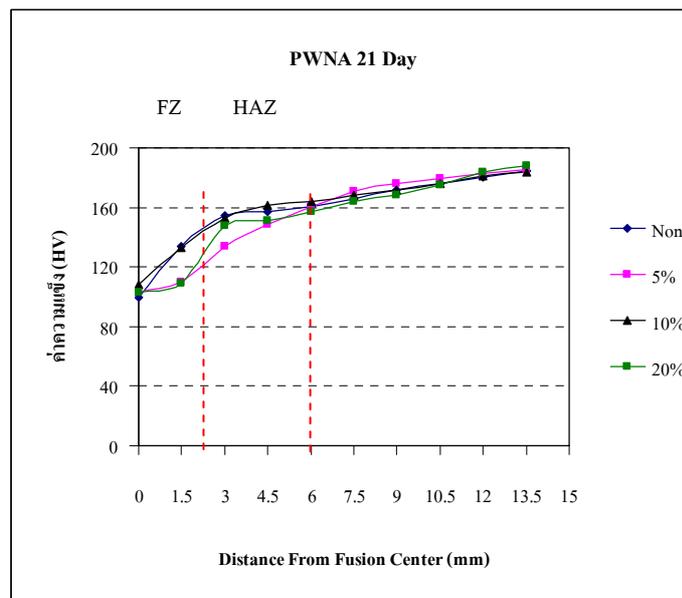


รูปที่ 5.2 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 14 วัน

ค่าความแข็งจากตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.2 กราฟแนวนอน จะสรุปได้ว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 14 วัน จากกราฟจะเห็นได้ว่า เนื้อเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 มีความแข็งสูงสุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ชิ้นงาน รีดเย็นร้อยละ 5 และชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นตามลำดับ บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในและนอกชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นมีความแข็งมากที่สุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ตามลำดับ ระยะทางห่างออกไปที่บริเวณเนื้อวัสดุ ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 จะมีความแข็งมากที่สุด ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ตามลำดับ ในงานเชื่อมอะลูมิเนียม จุดที่คำนึงถึงจะเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ดังนั้นชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ดีที่สุดในเรื่องนี้ เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีความแข็งใกล้เคียงกับตัววัสดุ ซึ่งจะมีความแตกต่างกับ T. Ma และคณะ [10] ที่ได้ทำการทดลองโดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบเดียวกัน แตกต่างกันเพียงเกรดวัสดุ ซึ่งจะใช้วัสดุ 7020 และ 7022 ให้ความร้อนหลังการเชื่อม โดยปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้องปกติ เป็นเวลา 3 เดือน ซึ่งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการเชื่อมนั้น ความแข็งจะไม่สามารถกลับคืนมาให้ใกล้เคียงกับตัววัสดุ

ตารางที่ 5.3 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging 21 วัน (PWNA 21 Day) มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) / Type of Condition	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
Non	99.5	134.1	154.7	157	160.3	165.9	171.8	175.8	180.3	184.4
5%	102.8	110	134	148.9	160.7	171.2	175.7	179.6	182.7	185.5
10%	108.2	133.4	152.6	161.1	163.6	168.2	171.6	176.2	181	183.5
20%	102.7	109.3	147.7	151.5	157.3	163.8	168.3	175.4	183.8	188.2



รูปที่ 5.3 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 21 วัน

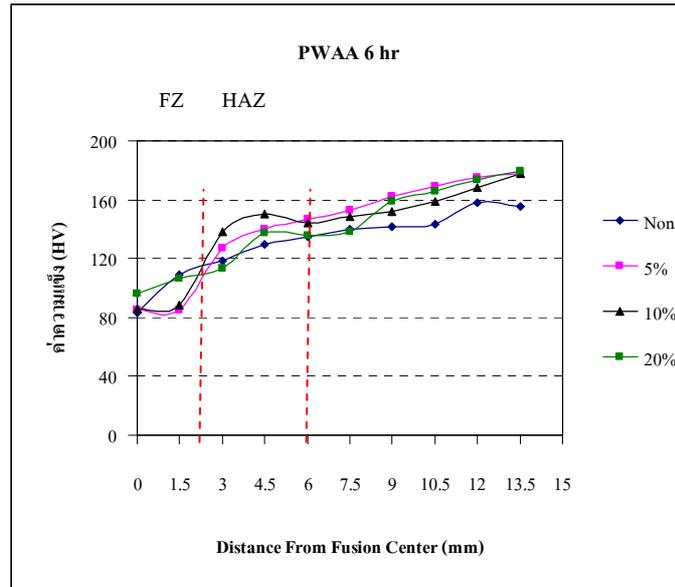
ค่าความแข็งจากตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.3 กราฟแนวโน้มน จะสรุปได้ว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 21 วัน จากกราฟจะเห็นได้ว่าเนื้อเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 มีความแข็งสูงสุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 และชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นตามลำดับ บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นมีความแข็งสูงสุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ชิ้น งานรีดเย็นร้อยละ 20 ตามลำดับ บริเวณเนื้อเชื่อมด้านนอกชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น มีความแข็งสูงสุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ตามลำดับ

ระยะทางห่างออกไปที่บริเวณเนื้อวัสดุชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 มีความแข็งมากที่สุด ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ตามลำดับ ในงานเชื่อมอะลูมิเนียม จุดที่คำนึงถึงจะเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อม ดังนั้นชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ดีที่สุดในเงื่อนไขนี้ เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีความแข็งใกล้เคียงกับตัววัสดุ ซึ่งได้แตกต่างกับ T. Ma และคณะ [10] ที่ได้ทำการทดลองโดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุมแบบและใช้กลุ่มวัสดุเดียวกัน จะแตกต่างกันเพียงเกรดวัสดุ คือ เกรด 7020 และ 7022 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA เป็นเวลา 3 เดือน ซึ่งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน จากการเชื่อมนั้นความแข็งจะไม่สามารถกลับคืนมาให้ใกล้เคียงกับตัววัสดุ

ตารางที่ 5.4 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (PWAA 6 hr) มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) Type of Condition	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
Non	82.9	108.6	118.8	129.4	134.6	140.1	141.8	143.5	158.1	155.2
5%	84.9	84.6	126.8	139.9	146.8	152.8	162.1	168.9	175.2	178.1
10%	85.9	88.7	138.4	150.5	144.6	148.8	152.1	159	168.5	177.5
20%	96	106.7	113.2	137.2	135.5	138.3	158.4	165.7	173.8	179.8

ค่าความแข็งจากตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.4 กราฟแนวนอน จะสรุปได้ว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อมโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากกราฟจะเห็นได้ว่าเนื้อเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 มีความแข็งสูงสุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 และชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น ตามลำดับ บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น มีความแข็งสูงสุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 และชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ตามลำดับ

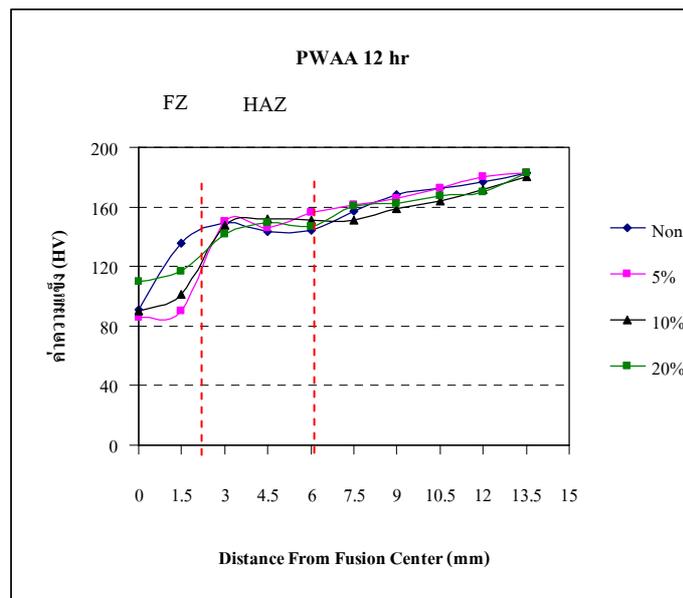


รูปที่ 5.4 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง

บริเวณเนื้อเชื่อมด้านนอกชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 มีความแข็งสูงสุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น และชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ตามลำดับ ระยะทางห่างออกไปที่บริเวณเนื้อวัสดุชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 มีความแข็งมากที่สุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น ตามลำดับ ในงานเชื่อมอะลูมิเนียม จุดที่ค้ำนึ่งถึงจะเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ดังนั้นชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 มีความแข็งโดยเฉลี่ยดีที่สุด ในเรื่องนี้ เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน มีความแข็งใกล้เคียงกับตัววัสดุ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการรีดในการทดลองมีอัตราที่พอเหมาะกับการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 6 ชั่วโมง เวลาอาจจะน้อยไปสำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น และมากเกินไปสำหรับชิ้นงานที่มีการรีดเย็นมากกว่าร้อยละ 5 ซึ่งผลที่ได้จะคล้าย ๆ กันกับ T. Ma และคณะ [10] ที่ได้ทำการทดลองโดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุมแบบและใช้กลุ่มวัสดุเดียวกัน จะแตกต่างกันเพียงนำวัสดุไปทำการรีดเย็น โดยเกรดวัสดุที่พวกเขาได้ทำการทดลองคือ 7020 และ 7022 ใช้การให้ความร้อนหลังการเชื่อมอุณหภูมิเท่ากัน แต่ใช้เวลา 24 ชั่วโมง โดยผลการทดลองของพวกเขาสรุปได้ว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการเชื่อมนั้นสามารถมีความแข็งกลับคืนมาให้ใกล้เคียงกับตัววัสดุ

ตารางที่ 5.5 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง (PWAA 12 hr) มีหน่วยเป็น HV

Point (mm) / Type of Condition	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
Non	91	135.7	149.1	143.1	144.2	157.2	168	172.5	177	183
5%	85.7	89.7	150	146.2	156.1	161.7	165.6	172.8	180.6	182.8
10%	89.7	101.3	147.4	151.9	150.8	150.7	158.7	163.7	171.9	180.3
20%	109.9	116.5	141.4	149.7	146.6	160.9	162	167	169.6	183.1



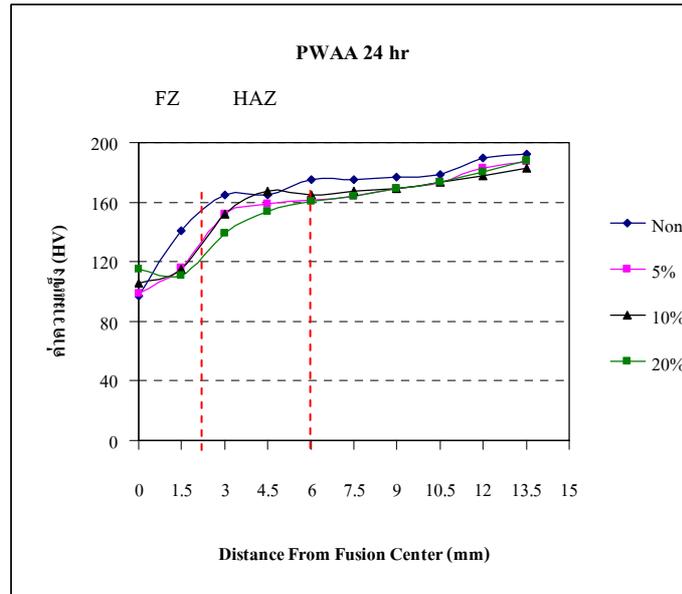
รูปที่ 5.5 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียสเวลา 12 ชั่วโมง

ค่าความแข็งจากตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.5 กราฟแนวนอน จะสรุปได้ว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อมโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากกราฟจะเห็นได้ว่า เนื้อเชื่อมซึ่งงานรีดเย็นร้อยละ 20 มีความแข็งสูงสุด ซึ่งงานที่ไม่ได้รีดเย็น ซึ่งงานรีดเย็นร้อยละ 10 และซึ่งงานรีดเย็นร้อยละ 5 ตามลำดับ บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในซึ่งงานที่ไม่ได้รีดเย็น มีความแข็งสูงสุด ซึ่งงานรีดเย็นร้อยละ 20 ซึ่ง งานรีดเย็นร้อยละ 10 และซึ่งงานรีดเย็นร้อยละ 5 ตามลำดับ บริเวณเนื้อเชื่อมด้านนอกซึ่งงานรีดเย็นร้อยละ 5 มีความแข็งสูงสุด ซึ่งงานไม่ได้รีดเย็น ซึ่งงานรีดเย็น

ร้อยละ 10 และชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ตามลำดับ ระยะทางห่างออกไป ที่บริเวณเนื้อวัสดุชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 มีความแข็งมากที่สุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น ตามลำดับ ในงานเชื่อมอะลูมิเนียม จุดที่ค้ำึงถึงจะเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าชิ้นงานไม่ได้รีดเย็น ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 และชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 มีค่าความแข็งเนื้อเชื่อม และบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านใน ต่างกับความแข็งบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอกและเนื้อวัสดุมาก ดังนั้นชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ยังคงมีความแข็งเฉลี่ยที่ดีที่สุดในเงื่อนไขนี้ เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน มีความแข็งใกล้เคียงกับตัววัสดุ ทั้งนี้เป็นผลมาจาก การรีดในการทดลองมีอัตราที่พอเหมาะกับการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 12 ชั่วโมง เวลาอาจจะน้อยไปสำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น และมากเกินไปสำหรับชิ้นงานที่มีการรีดเย็นมากกว่าร้อยละ 5 ซึ่งผลที่ได้จะคล้าย ๆ กันกับ T. Ma และคณะ [10] ที่ได้ทำการทดลอง โดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุมแบบและใช้กลุ่มวัสดุเดียวกัน จะแตกต่างกันเพียงนำวัสดุไปทำการรีดเย็น โดยเกรดวัสดุที่พวกเขาได้ทำการทดลองคือ 7020 และ 7022 ใช้การให้ความร้อนหลังการเชื่อม โดยการปล่อยให้อยู่ในอุณหภูมิเท่ากันแต่ใช้เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการเชื่อมนั้นสามารถมีความแข็งกลับคืนมาให้ใกล้เคียงกับตัววัสดุ

**ตารางที่ 5.6** การให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 21 ชั่วโมง (PWAA 21 hr) มีหน่วยเป็น HV

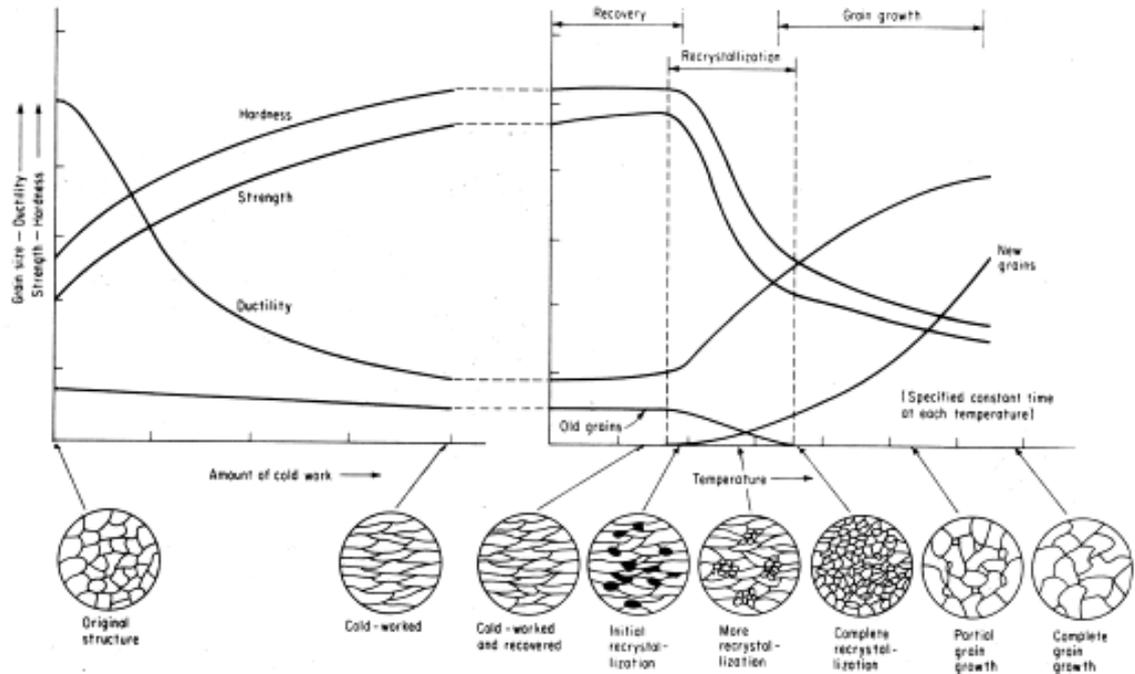
Type of Condition \ Point (mm)	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5
	Non	96.9	140.9	165.2	164.8	175.3	174.8	176.4	178.2	189.9
5%	99	116.1	152	158.4	161.4	163.9	168.9	173	182.5	187.3
10%	105.3	114.8	152.1	167.6	165	167	169.5	173.7	178	182.6
20%	114.6	110.5	139	153.8	160.7	164	169.2	173.8	179.9	187.6



รูปที่ 5.6 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียสเวลา 24 ชั่วโมง

ค่าความแข็งจากตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.6 กราฟแนวโน้มจะสรุปได้ว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อม โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากกราฟจะเห็นว่าเนื้อเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 มีความแข็งสูงสุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 และชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น ตามลำดับ บริเวณขอบรอยเชื่อมด้านในชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นมีความแข็งสูงสุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 และชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ตามลำดับ บริเวณเนื้อเชื่อมด้านนอกชิ้นงานไม่ได้รีดเย็นมีความแข็งสูงสุด ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 และชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ตามลำดับ ระยะทางห่างออกไปที่บริเวณเนื้อวัสดุชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 มีความแข็งมากที่สุด ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น ชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 และชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 ตามลำดับ ในงานเชื่อมอะลูมิเนียม จุดที่ค้ำึงถึงจะเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ในกรณีนี้จะเห็นว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็น มีค่าความแข็งเนื้อเชื่อม บริเวณขอบรอยเชื่อมแตกต่างกันมาก และบริเวณที่มีผลกระทบจากความร้อนได้ต่ำกว่าบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก โดยรวมค่าความแข็งจะดีกว่าชิ้นงานรีดเย็น ดังนั้นชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นดีที่สุดในเงื่อนไขนี้ เนื่องจากบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีความแข็งใกล้เคียงกับตัววัสดุ ทั้งนี้เป็นผลมาจากอัตราการรีดเย็น ในการทดลองมีมากเกินไปกับการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 24 ชั่วโมง ซึ่งมีผลกระทบต่อ การ Precipitation ผลที่ได้จะคล้าย ๆ กันกับ T. Ma และคณะ [10] ที่ได้ทำการทดลอง โดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คแก๊สปกคลุมแบบและใช้กลุ่มวัสดุเดียวกัน โดยเกรดวัสดุที่พวกเขาได้ทำการทดลอง คือ 7020 และ 7022 ใช้การให้ความร้อนหลังการเชื่อม

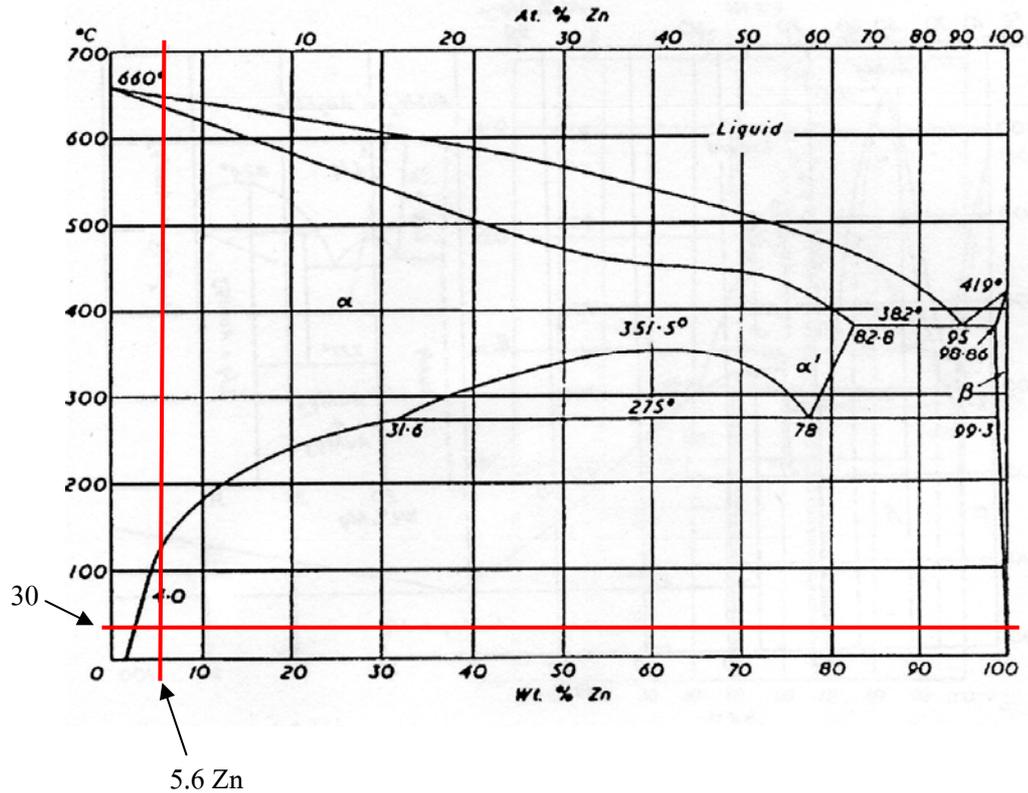
โดยการปล่อยให้อุณหภูมิเท่ากันแต่ใช้เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากการเชื่อมนั้นสามารถมีความแข็งแรงกลับคืนมาให้ใกล้เคียงกับตัววัสดุ



รูปที่ 5.7 สมบัติทางกลและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการรีดเย็น และการอบคืนตัว [12]

จากรูปที่ 5.7 จะแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ต่าง ๆ โดยเริ่มจากวัสดุก่อนที่จะทำการรีดเย็น จะแสดงให้เห็นว่าลักษณะเกรนยังเป็นปกติ และเข้าสู่กระบวนการรีดเย็นสังเกตได้ว่า เมื่ออัตราการรีดเย็นมากขึ้น ส่งผลให้เกิด Dislocation มากขึ้นและจะเกิดการขัดกันเอง ลดการเคลื่อนตัวทำให้ต้องมีแรงกระทำที่สูงขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการรีดเย็น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยถาวร สิ่งนี้มาจากเกิดการเลื่อนไหลระหว่างชั้นอะตอมโดยชั้น ที่มีอะตอมอยู่อย่างหนาแน่น สามารถเลื่อนไหลได้โดยง่าย ซึ่งการเลื่อนไหลระหว่างชั้นอะตอมนี้ เกิดขึ้นเมื่อค่าความเค้นแรงเฉือนในระนาบนั้นถึงค่าวิกฤติ การเลื่อนไหลดังกล่าว เคลื่อนที่ไปตามแนวผลึก เมื่อสิ้นสุดแนวผลึก รูปร่างของวัสดุนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยถาวร พลังงานที่ได้จากการรีดเย็นส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นความร้อน และอีกส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็น Strain Energy เมื่อนำเอาอะลูมิเนียมที่รีดเย็นมาทำการอบคืนตัว เกรนจะเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่ และส่งผลให้เกรนมีความเครียดลดลงการคลายตัว (Recovery) ผลึกที่ถูกยึดจะค่อย ๆ คลายตัว พร้อมกับเกิดจุดเริ่มต้นการตกผลึก ทั้งยังเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) คือ มีจุดเริ่มต้นการตกผลึกเกิดขึ้นใหม่ในเนื้อโลหะเดิมและผลึกเจริญเติบโต (Grain Growth) จนได้ผลึกใหม่ ที่ไม่มีความเครียดหลงเหลืออยู่ เมื่อทำการเชื่อมจะเป็นให้ความร้อนและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว อาจจะทำให้การจัดเรียงตัว

เกิดขึ้นได้ไม่ดี [12] โดยมีการสันนิษฐานว่าการปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้องปกติ จะเกิดการละลาย Matix อะลูมิเนียมที่มีสังกะสีร้อยละ 2.5 ไม่ถึงร้อยละ 5.6 เพราะฉะนั้นส่วนที่เกินมาจาก ร้อยละ 2.5 จะอยู่ในการ Precipitate Phase (Mg(ZnAlCu)<sub>2</sub>) และจะเกิดที่บริเวณขอบเกรนก่อน ตรง บริเวณใจกลางเกรนไม่น่าจะเกิดการ Precipitate เพราะว่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอ ต้องอาศัยระยะเวลา ที่เกินกว่า 4 วันขึ้นไป [13]



รูปที่ 5.8 เฟสไดอะแกรมอะลูมิเนียม-สังกะสี [14]

ส่วนการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เป็นการเร่งให้เกิดการ Precipitate และ เกรนจะเกิดการกระจายอย่างทั่วถึง โครงการนี้จะไม่ใช่อุณหภูมิที่มากกว่านี้ ซึ่งถ้ามากเกินไปจะทำให้เกรนเกิดการละลายที่มากเกินไปจับรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนไม่สม่ำเสมอ และกระจายตัวได้ไม่ดี ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจะสรุปโดยรวมได้ดังนี้

1. จากเงื่อนไขการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ Postweld Natural Aging จะพบว่าชิ้นงานรีดเย็น ร้อยละ 10 ที่ 21 วัน มีแนวโน้มความแข็งแรงบริเวณที่ได้รับความร้อนจากการเชื่อมที่ดีที่สุด จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะการกดที่ห่างออกไปหาเนื้อวัสดุ และมีความแข็งแรงเฉลี่ยทุกจุดที่ดีที่สุด

2. อัตราการรีดเย็นร้อยละ 10 ส่งผลให้อะลูมิเนียม 7075 T651 มีความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้องปกติ 21 วัน เนื่องจากอัตราการรีดเย็นเหมาะสมสำหรับการ Precipitation
3. จากเงื่อนไขการให้ความร้อน 120 องศาเซลเซียส กับชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีแนวโน้มความแข็งที่ดีที่สุด
4. เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงาน ที่ไม่ได้รีดเย็นกับชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 ในเงื่อนไขการให้ความร้อน 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะพบว่าเนื้อเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมมีความแข็งที่แตกต่างกันน้อย โดยชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นจะแข็งกว่า แต่ถัดออกไปจากบริเวณขอบรอยเชื่อมด้านนอก 1.5 มิลลิเมตร จะมีความแข็งต่ำกว่าชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 เล็กน้อย พอเลยจุดดังกล่าวก็จะมีความแข็งที่มากกว่า และความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามระยะการถุดออกไปยังเนื้อวัสดุ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการให้ความร้อนหลังการเชื่อม กับงานรีดเย็นอะลูมิเนียม 7075 T651 จะเห็นได้ว่า อัตราการรีดเย็นที่พอเหมาะ และการให้ความร้อนที่เหมาะสมหลังการเชื่อม จะส่งผลโดยตรงกับความแข็งของวัสดุ จากการทดลองจะเห็นได้ว่า การรีดเย็นร้อยละ 10 ความแข็งจะเริ่มสูงขึ้น แต่การรีดเย็นร้อยละ 20 กลับมีความแข็งที่ต่ำ จึงเป็นแนวทางในศึกษาต่อไป สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริง แม้ว่างานนั้นจะไม่เหมาะกับการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ก็จะใช้การรีดเย็นร้อยละ 10 แทน แต่ถ้างานนั้นเหมาะกับการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 24 ชั่วโมง การรีดเย็นก็ไม่จำเป็น

## เอกสารอ้างอิง

1. ดร.พิชญ์ บุญนวล, 2549, โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (**Non-ferrous metal**),[Online],  
Available : [classroom.psu.ac.th/users/bpitsanu/EngMaterial/Nonferrous.doc](http://classroom.psu.ac.th/users/bpitsanu/EngMaterial/Nonferrous.doc) [10 มิถุนายน 2549].
2. Kaufman, G.J., 2000, “**Introduction to Aluminum Alloys and Tempers**” pp. 66-68, 102-105.
3. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC), 2549, กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (**Deformation of material**),[Online],  
Available : <http://www.mtec.or.th/th/labs/mech/tips6.html> [10 มิถุนายน 2549].
4. Lenard, J.G., 2004, “The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum alloy”, **Journal of Materials Processing Technology** **152**, pp. 144-153.
5. Flores, O.V., Kennedy, C., Murr, L.E., Brown, D., Pappu, S., Nowak, B.M., and McClure, J.C., 1997, “Microstructural issues in a friction-stir-welded aluminum alloy”, **Scripta Materialia**, Vol. 38, No. 5, pp. 703-708.
6. เชิดเชลง ชิตชวนกิจ, ขงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์, ดร. อัครถกร กลั่นความดี และ ดร. โตชิเอ โอกุมุระ, 2524, **วิศวกรรมกรรมเชื่อม**, โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ 2524, หน้า 17, 21, 123-126.
7. Rhodes, C.G., Mahoney, M.W., Bingel, W.H., Spurling, R.A., Bampton, C.C., 1997, “Effect of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum alloy”, **Scripta Materialia**, Vol. 36, No. 1, pp. 69-75.
8. Mishra, R.S., Mahoney, M.W., McFadden, S.X., Mara, N.A. and Mukherjee, A.K., 2000, “High strain rate superplasticity in a friction stir processed of 7075 al alloy”, **Scripta Mater.** **42**, pp. 163-168.
9. Funderburk, R.S., 1997, **Key Concepts in Welding Engineering**,[Online],  
Available : <http://www.jflf.org/pdf/papers/keyconcepts1.pdf> [2006, June 10].

10. Ma, T., Ouden, G.D., 1998, “Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloy due welding”, **Materials Science and Engineering**, pp. 198-204.
11. Cheng Liu, Northwood, D.O., Bhole, S.D., 2004, “Tensile fracture behavior in CO<sub>2</sub> laser beam welds of 7075-T6 aluminum alloy”, **Materials and Design** **25**, pp. 573-577.
12. สมชาย อรุณีพล, 2549, โลหะวิทยา (**Metallurgy**), หน้า. 19-21., [Online],  
Available : <http://intranet.dt.mahidol.ac.th/DDS/edu/ELesson/DTID/%E2%CB%D0%C7%D4%B7%C2%D2.pdf> [2 พฤศจิกายน 2549].
13. Mike Meier, 2549, **HEAT TREATMENT OF ALUMINUM ALLOYS**, [Online],  
Available : <http://www.matsci.ucdavis.edu/MatSciLT/Other/File/HT-Aluminum.pdf> [2006, June 10].
14. Brandes, E.A., Brook, G.B., 1998, **Smithells Light Metals Handbook**, India Printed and bound in Great Britain, Reed Educational and Professional Publishing Ltd 1998, pp. 125.

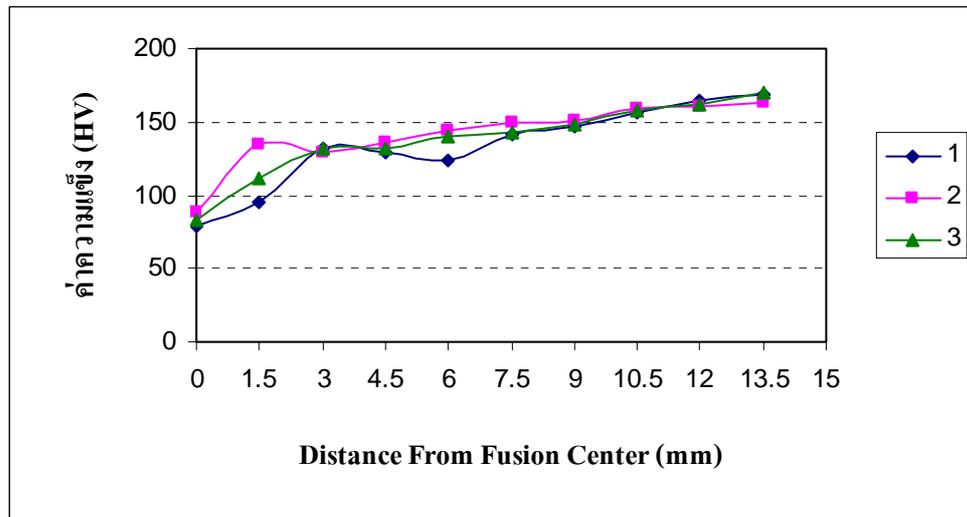
ภาคผนวก ก  
ผลค่าความแข็ง อะลูมิเนียม 7075 T651

**ผลการทดสอบความแข็ง**

โดย Vickers micro hardness tests, load 100 gmf, time 10 sec โดยทำการทดสอบเป็นจำนวน 10 จุด

**ตารางที่ ก.1** การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ Postweld Natural Aging 7 วัน (PWNA 7 Day) มีหน่วยเป็น HV

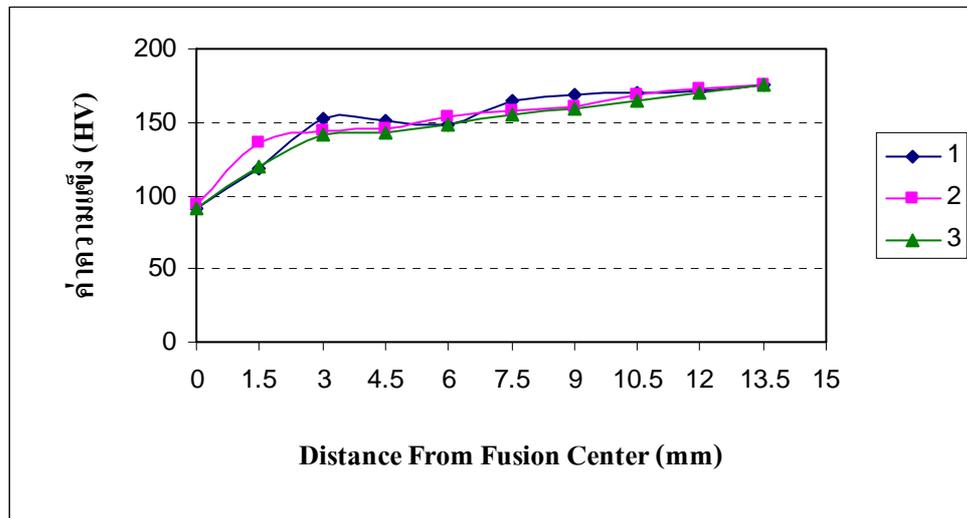
ชั้นงาน	จุดกด (ม.ม.)										ค่าเฉลี่ย ± เฉลี่ย
	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	
1	79.1	95.7	131.9	129.1	123.2	141.5	147.1	155.8	165.2	169.3	121.72 ± 28.96
2	88.1	134.7	129.8	136.2	144.7	149.7	151.4	159.5	160.4	163.3	129.07 ± 22.10
3	82.4	111.4	132.6	131.9	140.8	142.3	148.6	158.4	162.3	170.0	125.79 ± 25.89



**รูปที่ ก.1** กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 7 วัน

ตารางที่ ก.2 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ Postweld Natural Aging 14 วัน (PWNA 14 Day) มีหน่วยเป็น HV

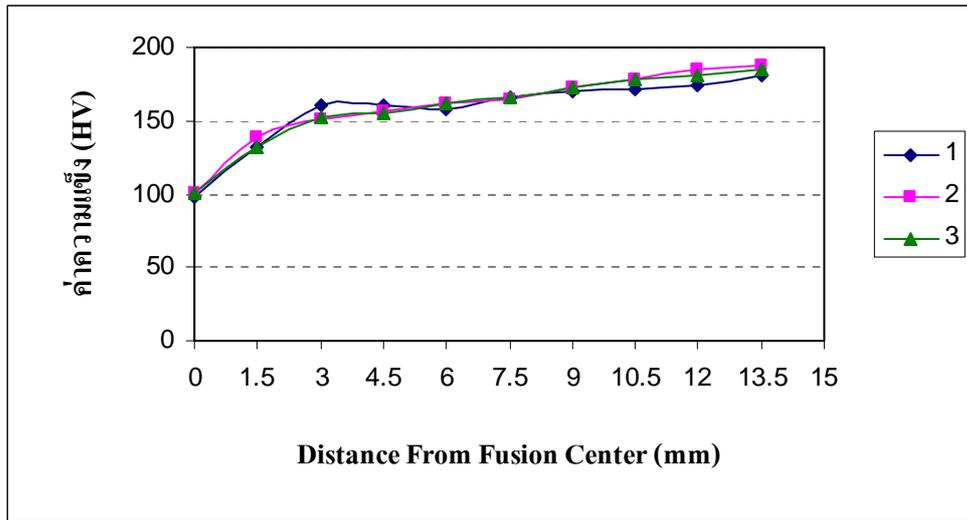
ชิ้นงาน	จุดกด (ม.ม.)										ค่าเฉลี่ย ±
	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	
1	91.4	118.7	153.0	151.2	148.7	165.0	168.3	170.1	171.8	175.4	131.69 ± 26.86
2	93.7	135.5	143.7	145.1	153.4	157.2	160.8	168.3	173.1	176.0	137.76 ± 23.95
3	90.6	119.5	141.1	142.3	148.7	154.8	159.7	164.2	169.9	175.7	133.59 ± 25.52



รูปที่ ก.2 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 14 วัน

ตารางที่ ก.3 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ Postweld Natural Aging 21 วัน (PWNA 21 Day) มีหน่วยเป็น HV

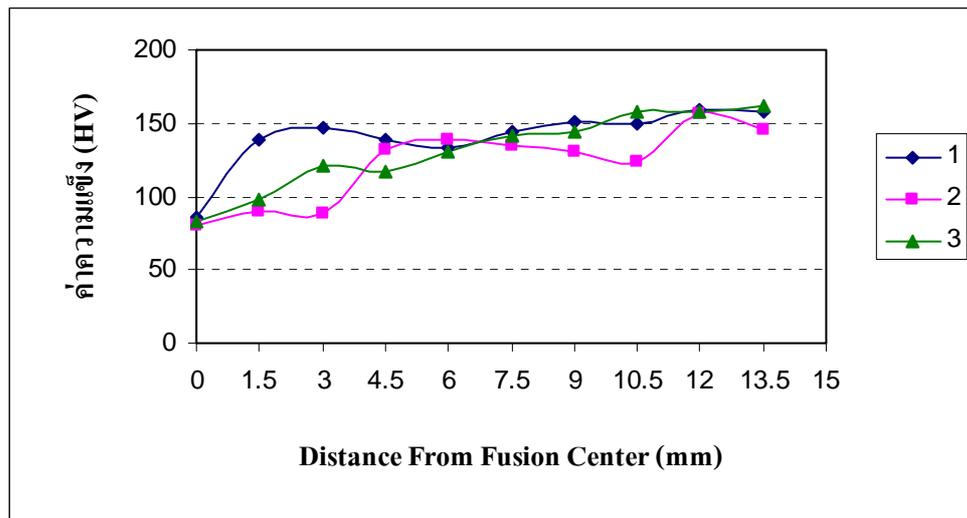
ชิ้นงาน	จุดกด (ม.ม.)										ค่าเฉลี่ย
	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	
1	97.6	131.4	160.2	160.0	157.7	166.2	170.7	172.1	174.3	180.7	157.1 ± 24.9
2	100.9	138.7	151.2	156.3	161.7	165.1	172.4	177.7	185.6	187.2	159.7 ± 25.7
3	100.1	132.3	152.9	154.8	161.7	166.5	172.4	177.7	181.1	185.4	158.5 ± 25.9



รูปที่ ก.3 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 21 วัน

**ตารางที่ ก.4** การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (PWAA 6 hr) มีหน่วยเป็น HV

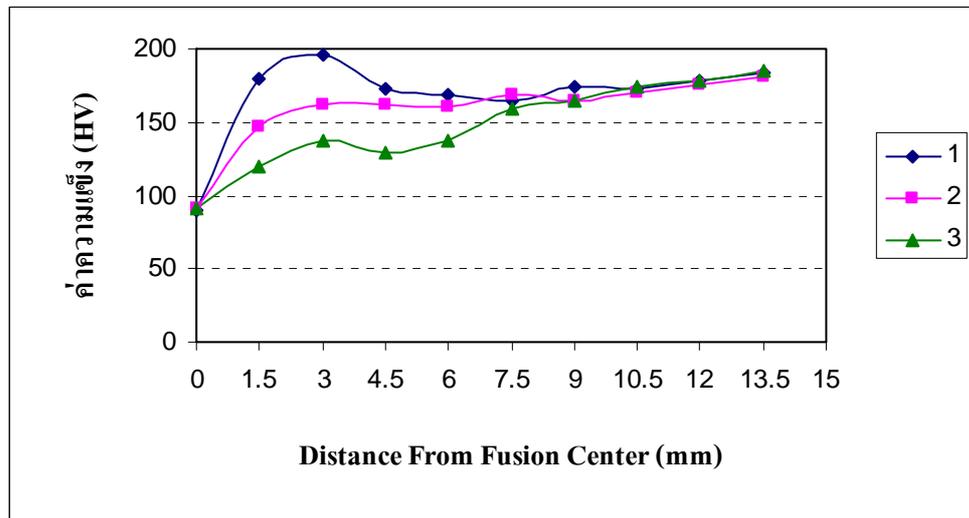
ชิ้นงาน	จุดกคด (ม.ม.)										ค่าเฉลี่ย ±
	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	
1	85.7	139.2	147.1	138.4	134.0	144.7	150.5	149.7	159.5	158.5	140.7 ± 24.9
2	80.4	89.5	88.7	132.6	139.2	134.7	131.2	123.2	156.7	145.5	122.2 ± 25.7
3	82.7	97.3	120.7	117.4	130.8	141.1	143.7	157.8	158.3	161.7	131.2 ± 25.9



**รูปที่ ก.4** กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.5 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (PWAA 12 hr) มีหน่วยเป็น HV

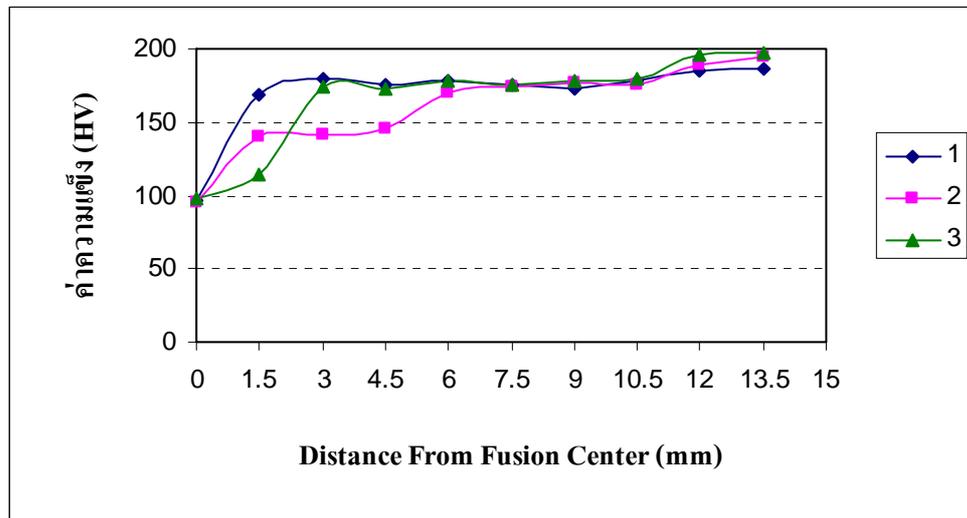
ชิ้นงาน	จุดกด (ม.ม.)										ค่าเฉลี่ย
	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	
1	90.3	180.0	195.5	172.4	168.2	164.3	174.5	173.4	177.7	183.4	168.0 ± 28.6
2	91.7	147.5	162.4	161.9	160.8	168.2	165.3	170.0	175.6	180.7	158.4 ± 25.1
3	91.2	120.4	137.8	129.2	137.9	158.7	164.3	174.3	177.7	185.1	147.7 ± 29.6



รูปที่ ก.5 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.6 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานที่ไม่ได้รีดเย็นแบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (PWAA 24 hr) มีหน่วยเป็น HV

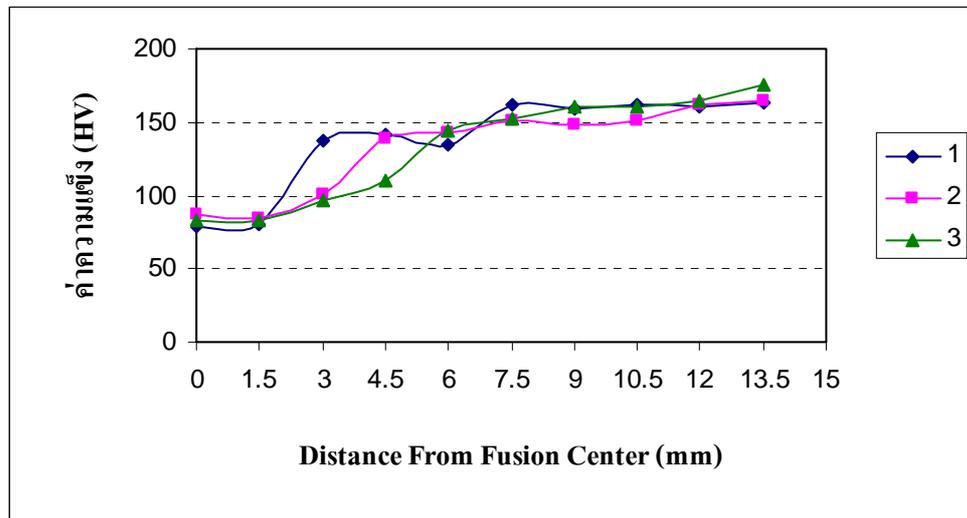
ชิ้นงาน	จุดกด (ม.ม.)										ค่าเฉลี่ย
	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	
1	96.8	168.2	180.0	175.3	177.8	175.1	173.2	178.9	184.7	186.9	169.7 ± 26.2
2	95.4	140.0	141.3	145.7	169.5	173.7	177.4	175.7	189.5	194.3	160.3 ± 29.8
3	98.6	114.7	174.5	173.4	178.8	175.6	178.8	180.0	195.5	196.8	166.7 ± 32.9



รูปที่ ก.6 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.7 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเส้นร้อยละ 5 แบบ Postweld Natural Aging 7 วัน (PWNA 7 Day) มีหน่วยเป็น HV

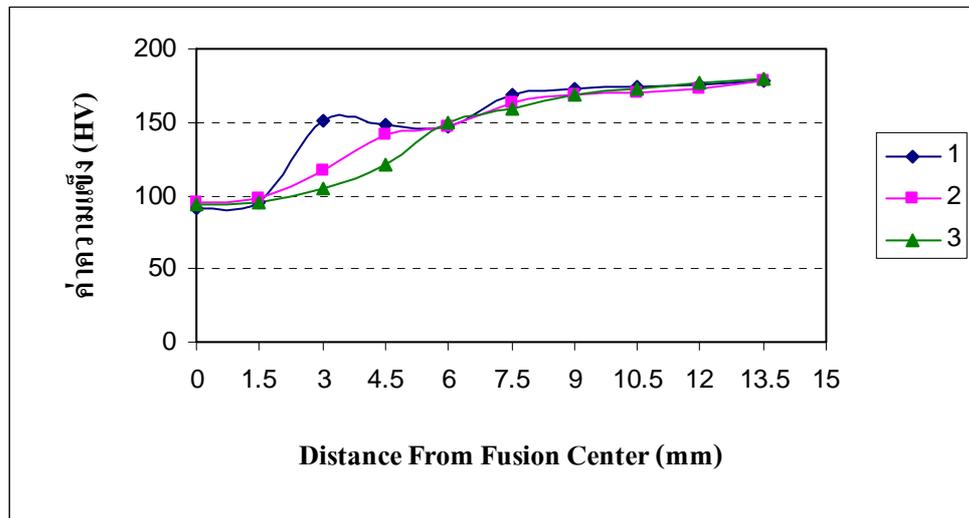
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	78.3	80.4	136.9	141.5	134.7	161.4	159.5	161.4	160.4	163.3	137.8 ± 32.7
2	87.2	84.6	100.8	138.4	142.3	150.5	148.8	151.4	161.4	165.2	133.1 ± 30.4
3	83.5	82.4	96.7	110.0	143.7	152.8	160.9	160.4	165.2	175.2	133.1 ± 36.1



รูปที่ ก.7 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 7 วัน

ตารางที่ ก.8 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเส้นร้อยละ 5 แบบ Postweld Natural Aging 14 วัน (PWNA 14 Day) มีหน่วยเป็น HV

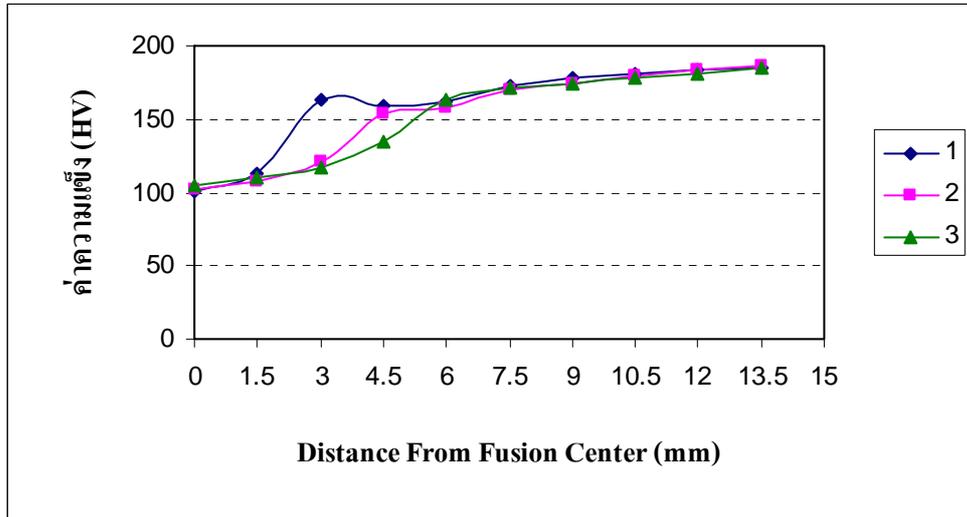
ชั้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ± กระจาย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	91.3	95.4	151.5	148.3	146.5	168.9	173.2	174.6	176.1	177.7	150.4 ± 32.3
2	95.7	97.3	116.8	141.5	146.4	163.9	169.1	170.4	173.4	178.4	145.3 ± 31.7
3	93.5	95.7	104.2	121.7	150.1	159.3	168.5	172.9	176.7	179.9	142.3 ± 35.0



รูปที่ ก.8 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 14 วัน

ตารางที่ ก.9 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเส้นร้อยละ 5 แบบ Postweld Natural Aging 21 วัน (PWNA 21 Day) มีหน่วยเป็น HV

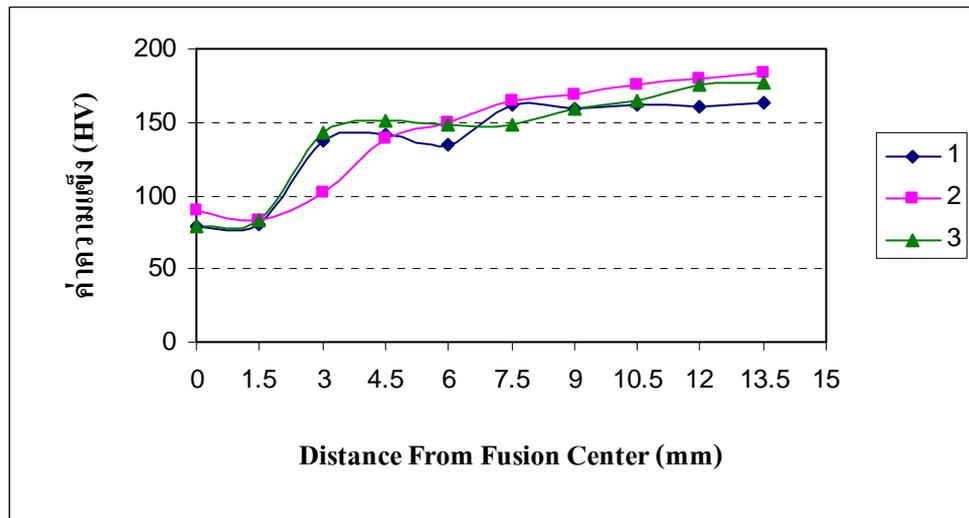
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ± เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	101.3	112.7	163.8	158.9	161.7	172.3	178.1	181.3	183.7	185.6	160.0 ± 29.5
2	102.7	107.2	121.1	153.2	157.9	170.1	174.3	179.3	183.4	186.7	153.6 ± 32.0
3	104.6	110.1	117.2	134.8	162.7	171.3	174.7	178.4	181.1	184.4	151.9 ± 31.8



รูปที่ ก.9 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 21 วัน

**ตารางที่ ก.10** การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (PWAA 6 hr) มีหน่วยเป็น HV

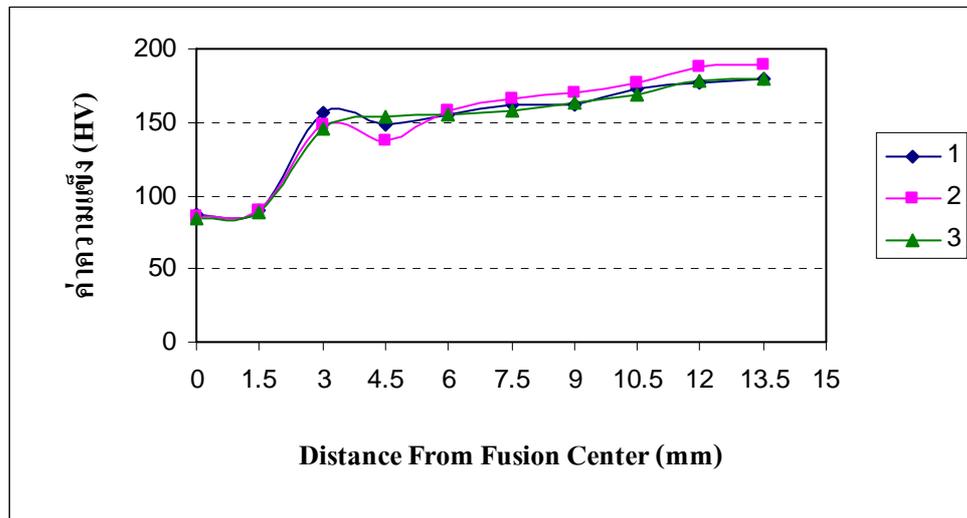
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	78.8	83.2	143.1	150.5	148.0	148.8	159.5	164.3	175.6	176.6	142.8 ± 34.5
2	90.3	83.5	102.2	139.2	149.7	164.3	168.2	175.6	180.0	183.4	143.6 ± 38.3
3	78.8	83.2	143.1	150.5	148.0	148.8	159.5	164.3	175.6	176.6	142.8 ± 34.5



**รูปที่ ก.10** กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.11 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (PWAA 12 hr) มีหน่วยเป็น HV

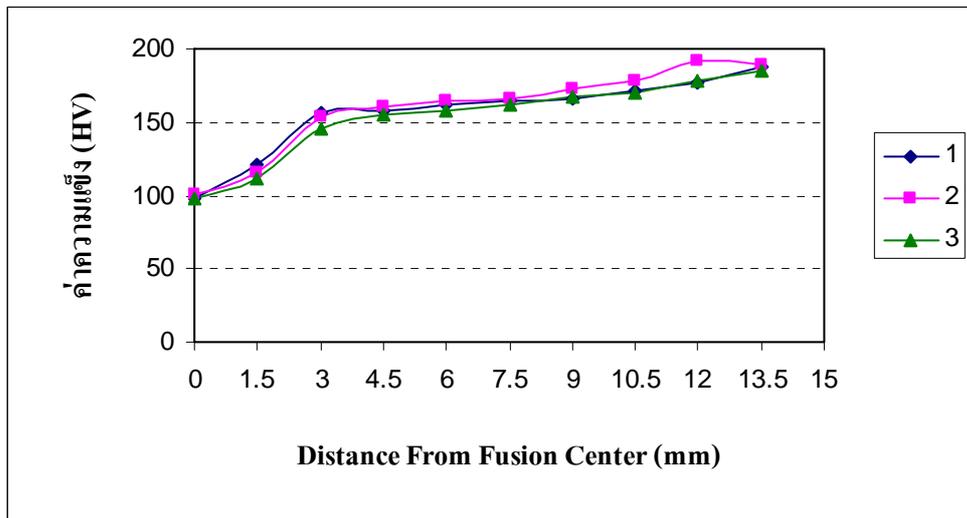
ชั้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	86.8	90.3	156.7	148.0	154.9	161.4	162.3	173.3	176.2	179.3	148.9 ± 33.3
2	85.7	90.1	148.2	137.4	157.8	165.9	170.7	176.3	188.4	189.0	151.0 ± 37.0
3	84.8	88.7	145.1	153.3	155.6	157.9	163.8	168.9	177.7	180.1	147.6 ± 33.8



รูปที่ ก.11 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.12 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 5 แบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (PWAA 24 hr) มีหน่วยเป็น HV

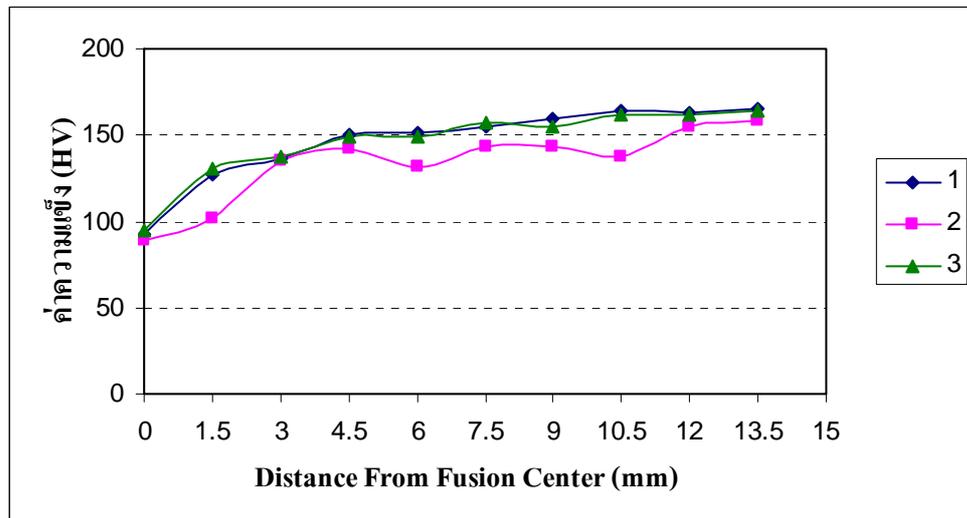
ชั้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	97.7	121.2	157.1	158.4	161.8	164.2	166.5	171.1	177.4	187.7	156.3 ± 27.0
2	100.8	115.9	153.2	161.2	165.2	166.2	172.4	177.7	191.7	189.3	159.4 ± 29.6
3	98.6	111.4	145.9	155.7	157.4	161.4	167.9	170.4	178.5	184.9	153.2 ± 28.0



รูปที่ ก.12 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.13 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ Postweld Natural Aging 7 วัน (PWNA 7 Day) มีหน่วยเป็น HV

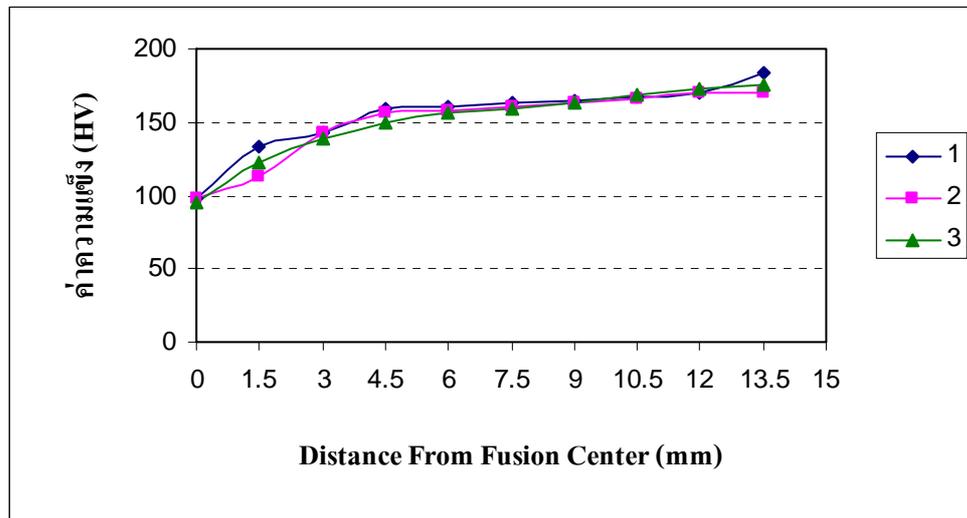
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	92.4	127.2	135.9	150.4	151.8	155.4	159.7	164.3	163.2	165.7	146.6 ± 22.8
2	89.5	101.2	135.5	142.3	131.9	143.9	143.1	137.0	154.9	158.5	133.8 ± 22.0
3	94.9	130.5	137.7	148.8	149.7	156.7	154.9	162.3	161.4	164.3	146.1 ± 21.0



รูปที่ ก.13 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 7 วัน

ตารางที่ ก.14 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ Postweld Natural Aging 14 วัน (PWNA 14 Day) มีหน่วยเป็น HV

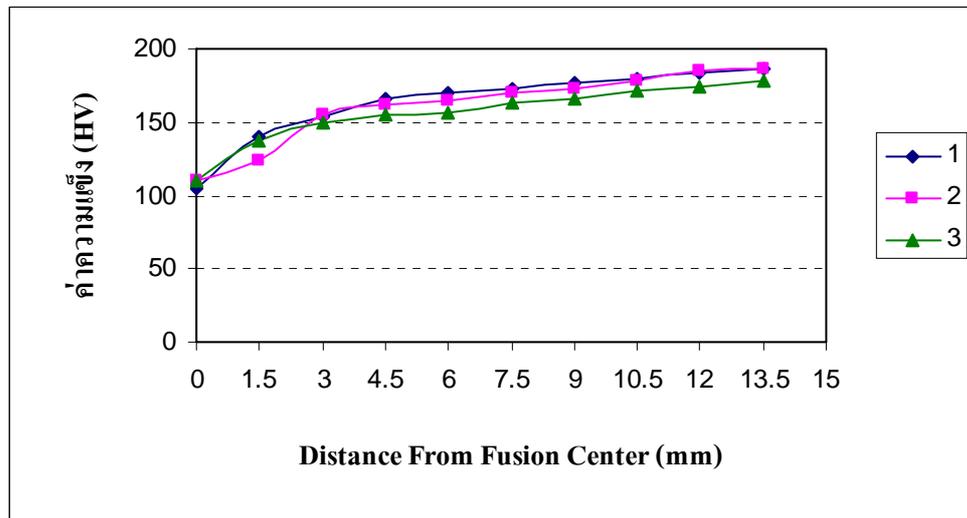
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	97.3	133.3	142.2	158.7	160.1	163.4	165.2	166.7	169.8	183.1	154.0 ± 24.3
2	97.8	112.3	142.7	156.4	158.3	161.1	163.2	165.8	169.4	170.7	149.8 ± 25.1
3	95.8	122.7	138.5	150.3	156.2	159.4	163.9	168.1	172.6	175.2	150.3 ± 25.0



รูปที่ ก.14 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 14 วัน

ตารางที่ ก.15 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นรอยละ 10 แบบ Postweld Natural Aging 21 วัน (PWNA 21 Day) มีหน่วยเป็น HV

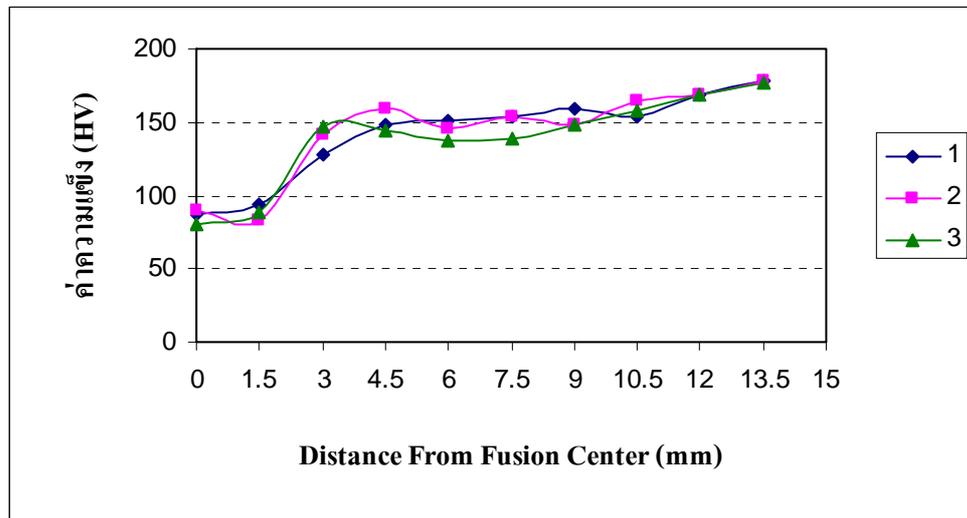
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	104.7	140.0	153.6	166.6	169.4	172.2	176.3	179.8	184.2	185.9	163.3 ± 25.0
2	109.9	123.3	154.5	161.4	164.6	169.7	172.2	177.7	184.6	187.0	160.5 ± 25.4
3	110.2	137.0	149.8	155.3	157	162.7	166.5	171.1	174.3	177.7	156.2 ± 20.2



รูปที่ ก.15 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 21 วัน

ตารางที่ ก.16 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (PWAA 6 hr) มีหน่วยเป็น HV

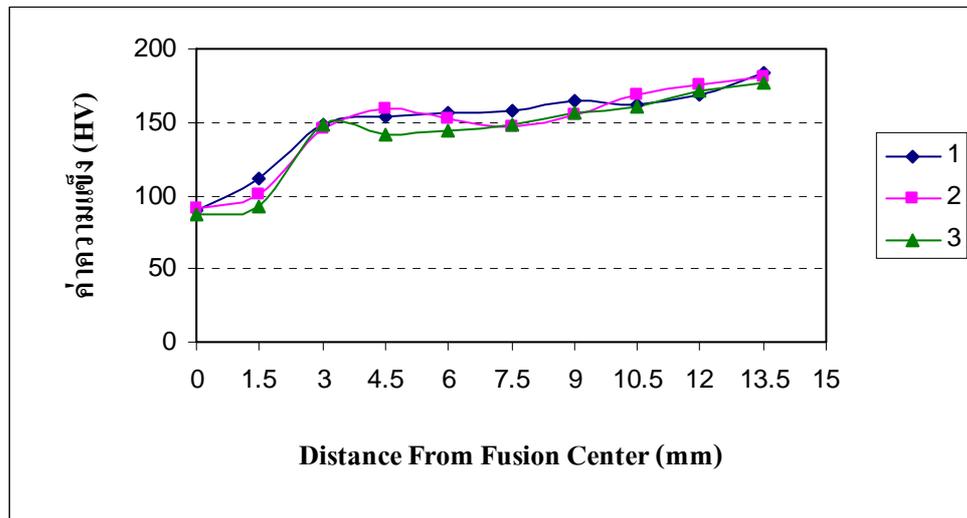
ชั้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	87.5	94.2	127.5	148.3	151.6	154.2	158.7	154.2	168.1	178.4	142.3 ± 30.1
2	89.4	82.8	141.5	159.5	145.5	153.1	148.8	165.2	168.2	177.7	143.2 ± 32.1
3	80.8	89.1	146.3	143.9	136.9	139.2	148.8	157.6	169.3	176.6	138.9 ± 31.1



รูปที่ ก.16 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.17 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (PWAA 12 hr) มีหน่วยเป็น HV

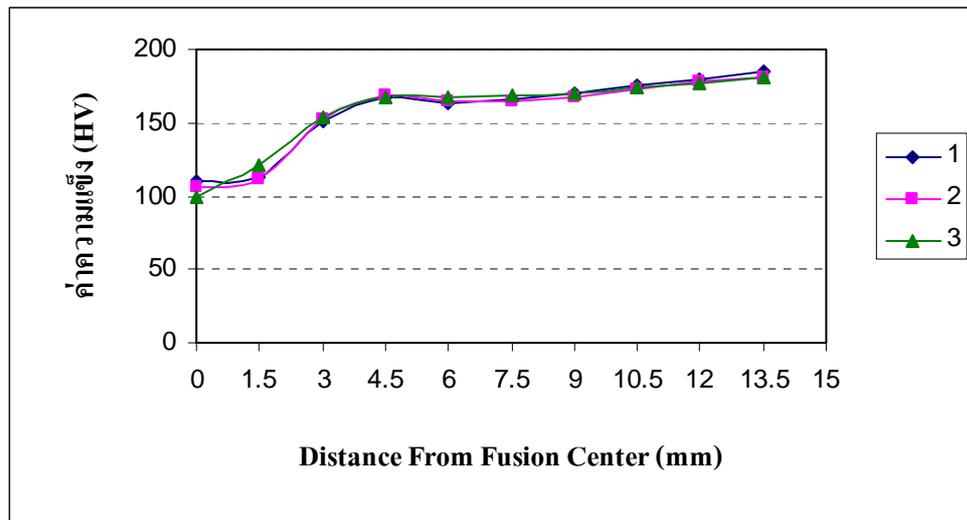
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	90.1	111.4	148.2	154.0	156.7	157.9	164.9	162.3	169.3	183.4	149.8 ± 28.0
2	91.7	100.2	145.2	159.7	152.1	146.3	155.0	168.7	175.2	180.3	147.4 ± 29.6
3	87.3	92.4	148.8	142.1	143.7	147.9	156.2	160.3	171.4	177.4	142.8 ± 30.2



รูปที่ ก.17 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียสเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.18 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 10 แบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (PWAA 24 hr) มีหน่วยเป็น HV

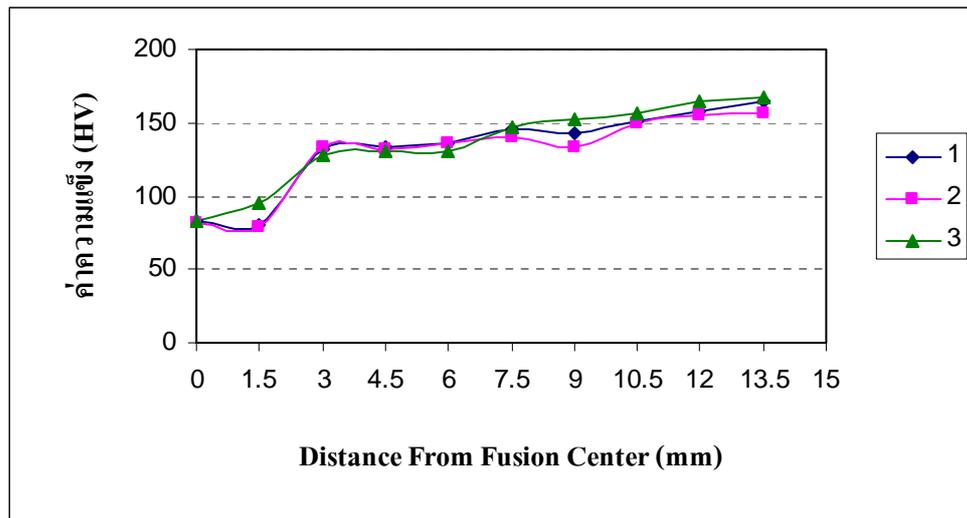
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	110.4	112.3	150.4	167.3	162.7	166.5	170.7	175.3	179.6	185.7	158.1 ± 26.4
2	105.6	111.4	152.2	168.2	164.7	165.3	167.2	172.4	177.7	181.1	156.6 ± 26.6
3	99.9	120.7	153.9	167.4	167.8	169.2	170.7	173.6	176.9	181.0	158.1 ± 26.6



รูปที่ ก.18 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.19 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 แบบ Postweld Natural Aging 7 วัน (PWNA 7 Day) มีหน่วยเป็น HV

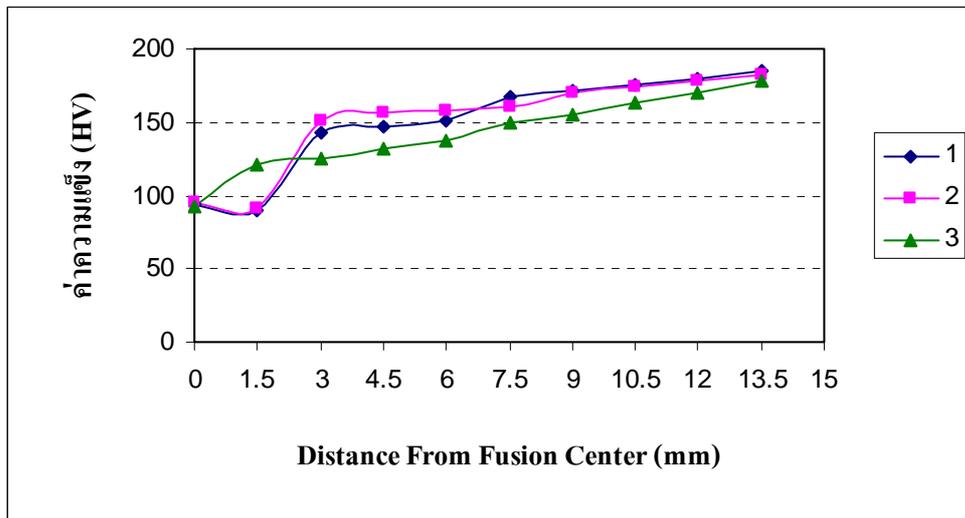
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	82.7	79.8	131.4	133.8	135.7	146.2	142.3	150.7	157.7	165.1	132.5 ± 29.0
2	81.8	79.4	134.0	132.6	135.5	140.7	133.3	149.2	154.9	155.8	129.7 ± 27.3
3	83.6	95.3	127.7	130.5	131.2	147.1	152.2	156.7	164.3	167.2	135.6 ± 28.1



รูปที่ ก.19 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 7 วัน

ตารางที่ ก.20 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 แบบ Postweld Natural Aging 14 วัน (PWNA 14 Day) มีหน่วยเป็น HV

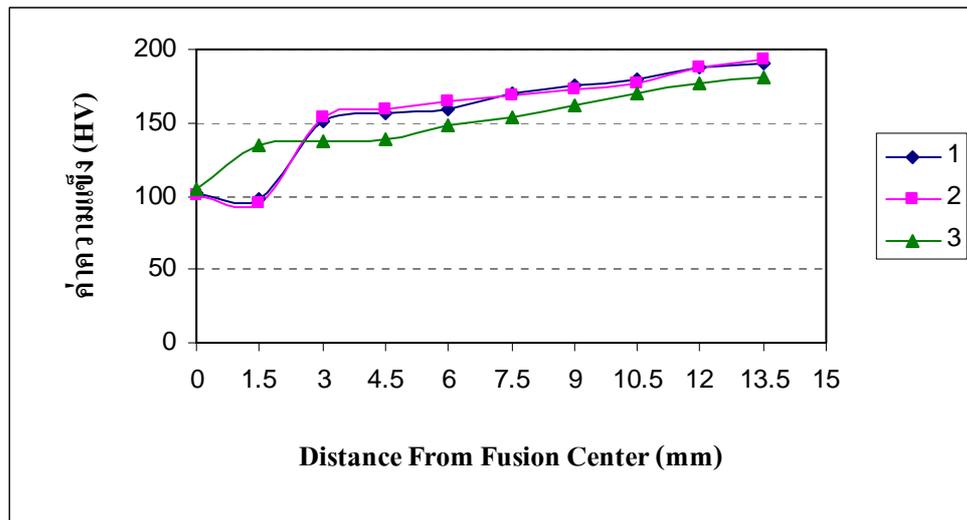
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	94.4	89.5	142.5	147.3	150.4	167.7	170.9	175.2	179.9	185.6	150.3 ± 34.0
2	95.4	90.7	151.1	156.7	157.3	160.8	169.7	174.3	177.7	182.0	151.6 ± 32.4
3	93.0	121.4	125.2	132.3	137.8	149.5	154.7	163.9	170.1	178.4	142.6 ± 25.9



รูปที่ ก.20 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 14 วัน

ตารางที่ ก.21 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นรอยละ 20 แบบ Postweld Natural Aging 21 วัน (PWNA 21 Day) มีหน่วยเป็น HV

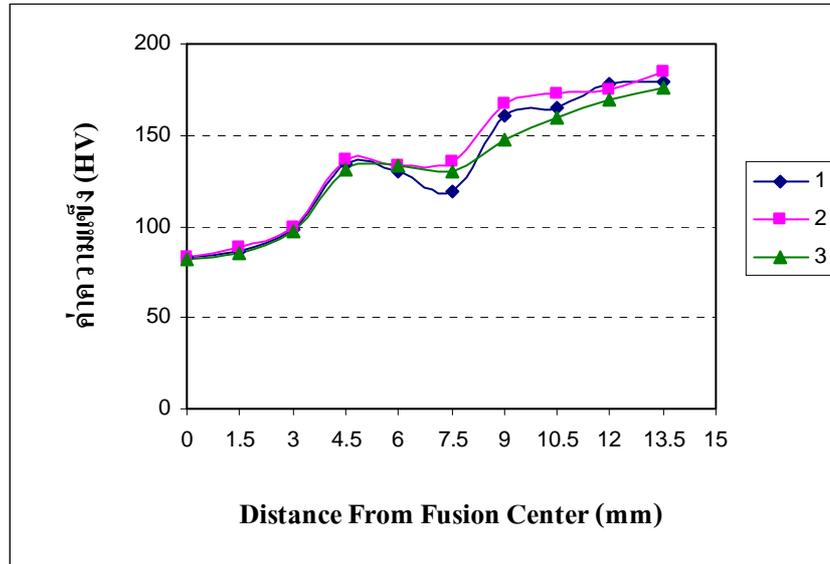
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	101.7	98.5	151.6	156.3	159.8	169.4	175.1	179.7	187.2	190.1	156.9 ± 32.5
2	101.3	94.8	154.4	159.2	164.4	168.7	172.9	176.7	187.9	193.1	157.3 ± 33.4
3	105.1	134.8	137.3	139.2	147.7	153.5	162.4	169.9	176.4	181.6	150.8 ± 23.0



รูปที่ ก.21 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อมแบบ PWNA 21 วัน

ตารางที่ ก.22 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 แบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (PWAA 6 hr) มีหน่วยเป็น HV

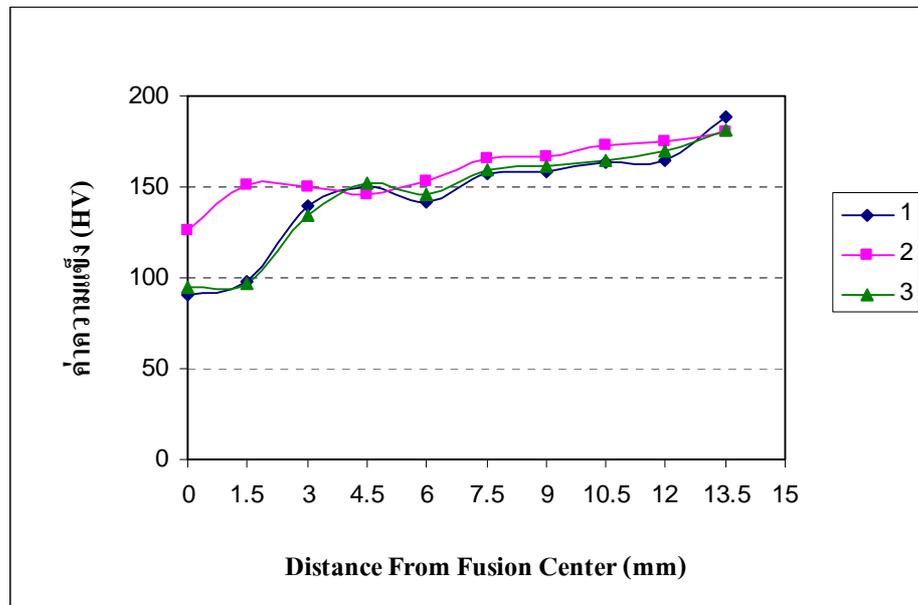
ชิ้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	83.2	86.1	98.0	134.0	130.5	119.5	160.4	165.2	177.7	179.3	133.4 ± 36.5
2	83.2	88.8	99.7	137.1	133.1	135.2	167.2	172.4	174.5	184.5	137.57 ± 37.2
3	81.6	85.4	97.1	130.7	132.9	130.4	147.8	159.7	169.2	175.7	131.1 ± 33.7



รูปที่ ก.22 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.23 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 แบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (PWAA 12 hr) มีหน่วยเป็น HV

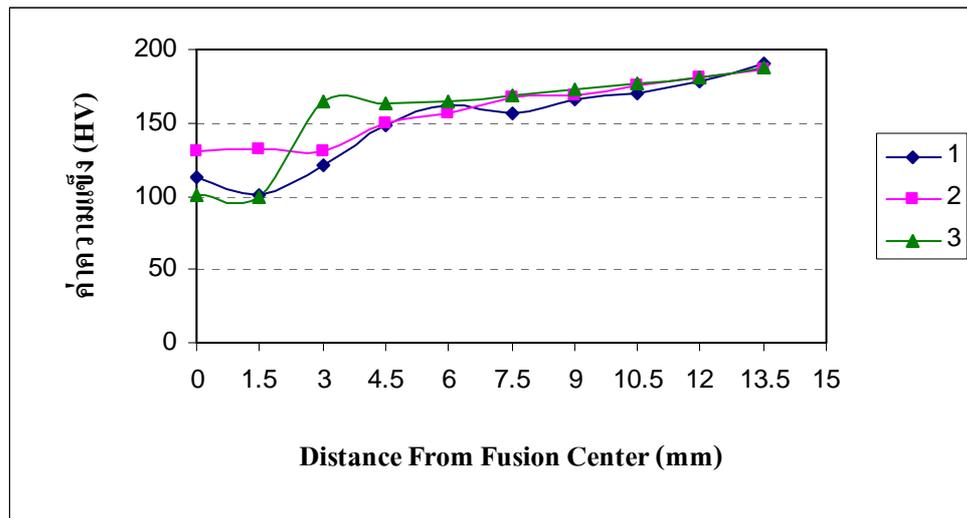
ชั้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	91.1	98.4	139.2	150.5	141.5	157.6	158.5	163.3	164.3	188.1	145.3 ± 30.0
2	126.5	150.8	150.2	146.3	152.7	165.6	166.3	173.1	174.8	180.4	158.7 ± 16.3
3	94.5	97.3	134.8	152.4	145.7	159.7	161.4	164.8	169.7	180.9	146.1 ± 29.3



รูปที่ ก.23 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.24 การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชิ้นงานรีดเย็นร้อยละ 20 แบบ Postweld Artificial Aging ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (PWAA 24 hr) มีหน่วยเป็น HV

ชั้นงาน	จุดกด										ค่าเฉลี่ย ±
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	112.3	100.4	120.7	148.5	161.7	156.5	165.9	169.9	178.4	189.8	150.4 ± 30.0
2	130.7	132.1	131.2	149.7	156.3	167.4	168.3	174.9	180.3	185.8	157.7 ± 21.0
3	100.8	98.9	165.2	163.3	164.3	168.2	173.4	176.6	181.1	187.4	157.9 ± 31.6



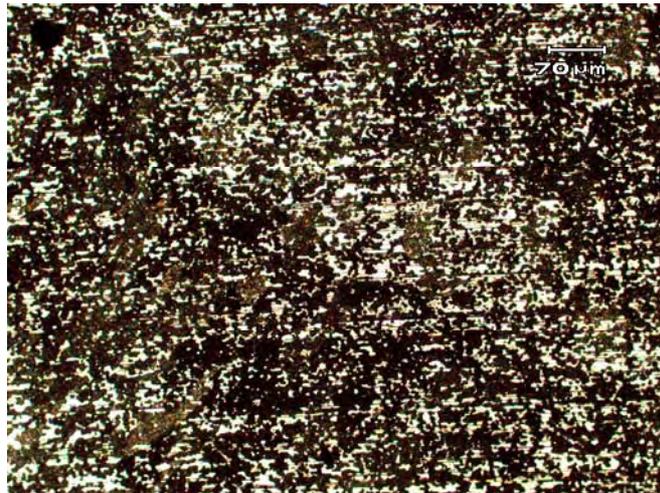
รูปที่ ก.24 กราฟการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 120 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

ภาคผนวก ข

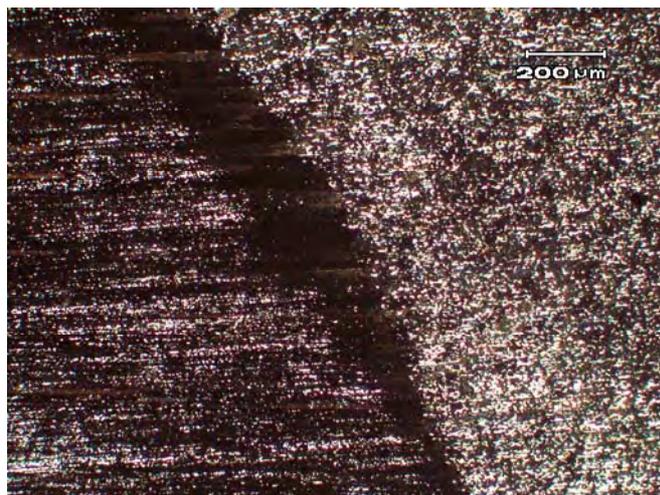
ผลโครงสร้าง อะลูมิเนียม 7075 T651

**ผลการทดสอบความแข็ง**

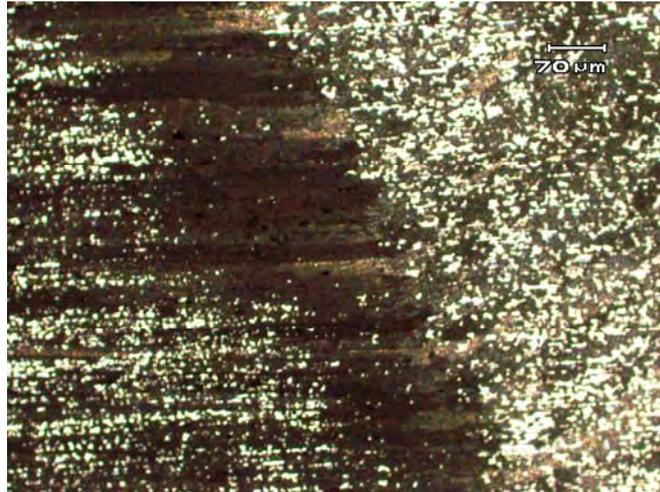
โดย Macro Structure รุ่น Olympus GX51 ที่กำลังขยาย 50X และ 100X โดยทำการถ่ายภาพแต่ละเงื่อนไขเป็นจำนวน 5 ภาพ

**ชิ้นงาน Non Cold Rolling  
(PWNA 7 Day)**

รูปที่ ข.1 โครงสร้างรอยเชื่อม



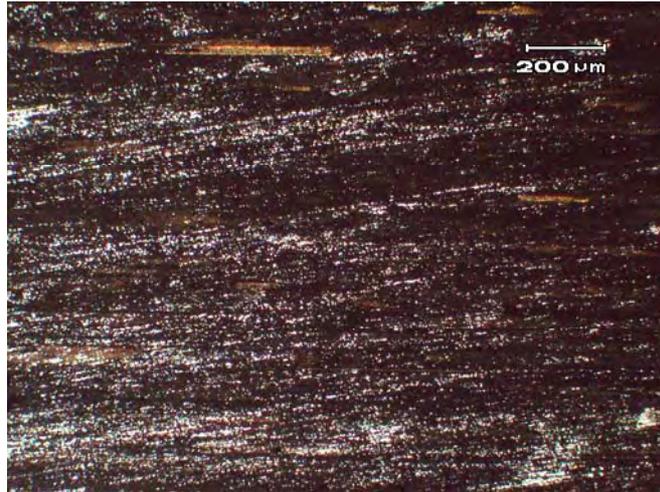
รูปที่ ข.2 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม



รูปที่ ข.3 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม



รูปที่ ข.4 โครงสร้างชิ้นงาน



รูปที่ ข.5 โครงสร้างชิ้นงาน

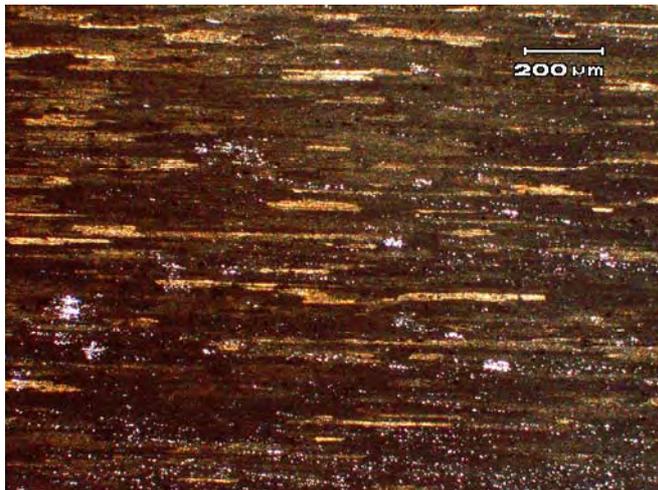
ชิ้นงาน Cold Rolling 5 %  
(PWNA 7 Day)



รูปที่ ข.6 โครงสร้างเนื้อเชื่อม



รูปที่ ข.7 โครงสร้างเนื้อวัสดุ



รูปที่ ข.8 โครงสร้างเนื้อวัสดุ

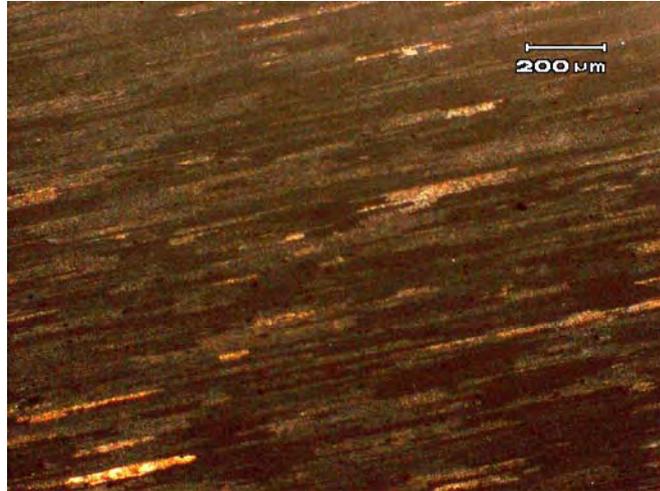


รูปที่ ข.9 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

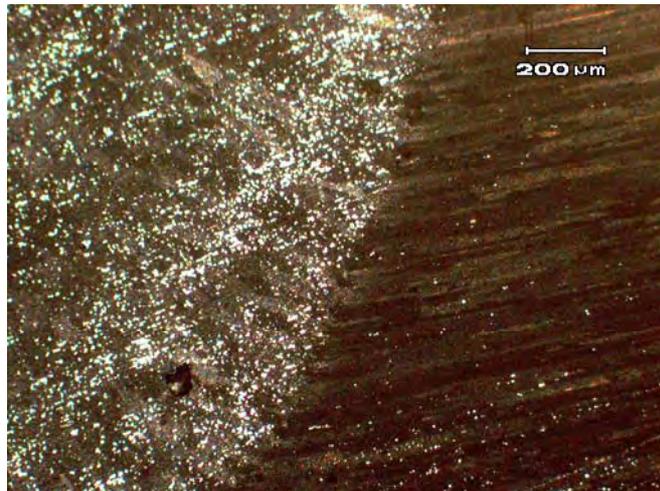


รูปที่ ข.10 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

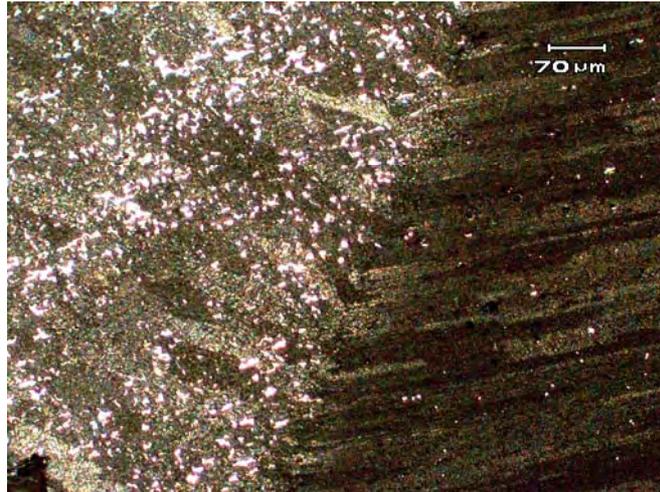
**ชิ้นงาน Cold Rolling 10%**  
**(PWNA 7 Day)**



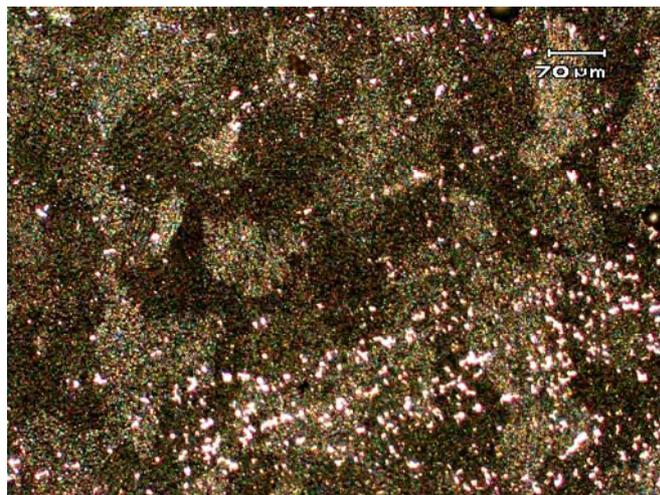
**รูปที่ ข.11** โครงสร้างชิ้นงาน



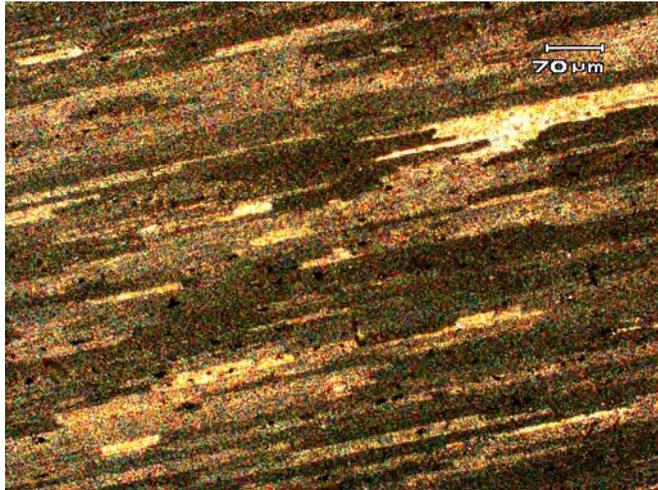
**รูปที่ ข.12** โครงสร้างขอบรอยเชื่อม



รูปที่ ข.13 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม

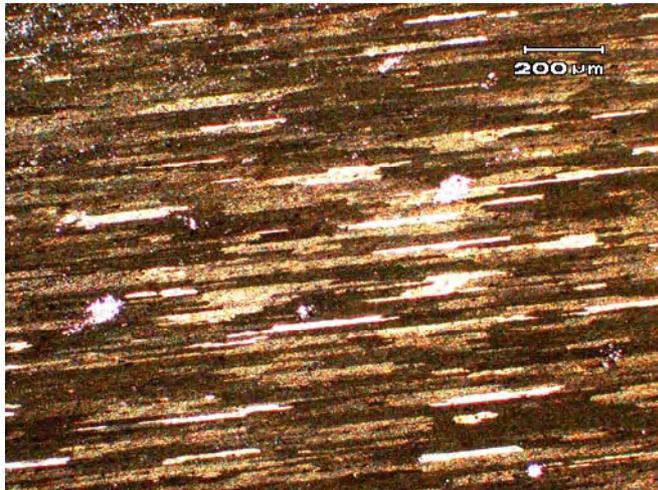


รูปที่ ข.14 โครงสร้างขอบเนื้อเชื่อม



รูปที่ ข.15 โครงสร้างชิ้นงาน

ชิ้นงาน Cold Rolling 20%  
(PWNA 7 Day)



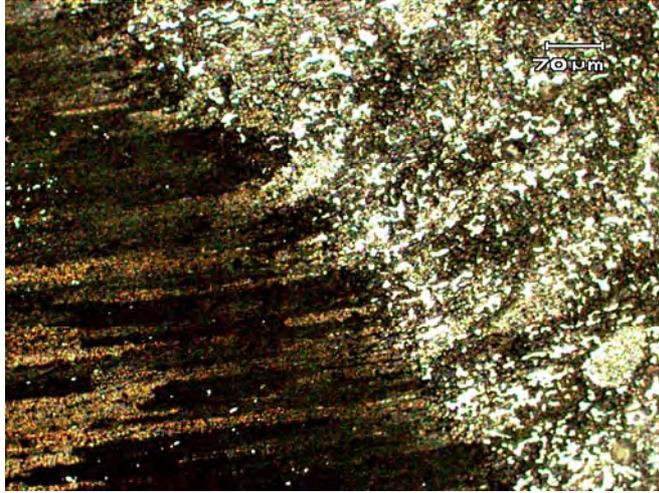
รูปที่ ข.16 โครงสร้างชิ้นงาน



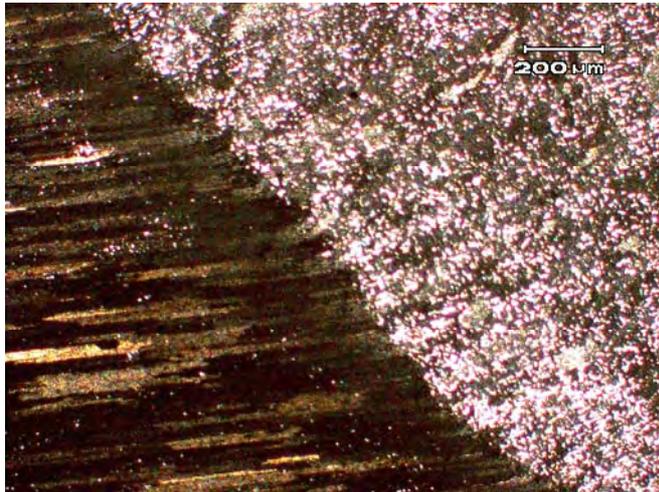
รูปที่ ข.17 โครงสร้างชั้นงาน



รูปที่ ข.18 โครงสร้างเนื้อเชื่อม



รูปที่ ข.19 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

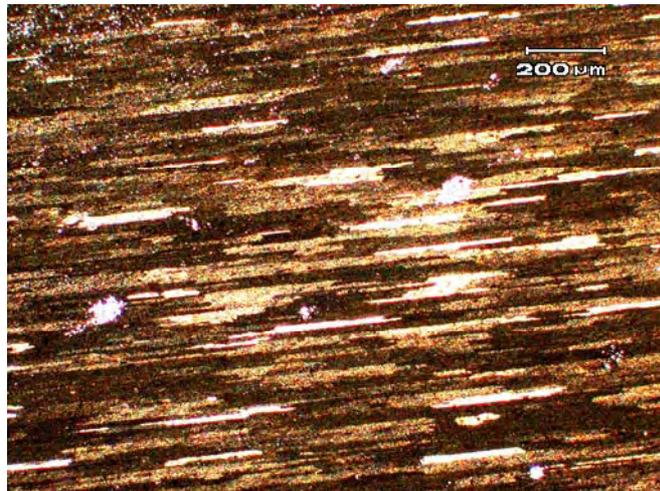


รูปที่ ข.20 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

**ชิ้นงาน Non Cold Rolling  
(PWAA 6 hr)**



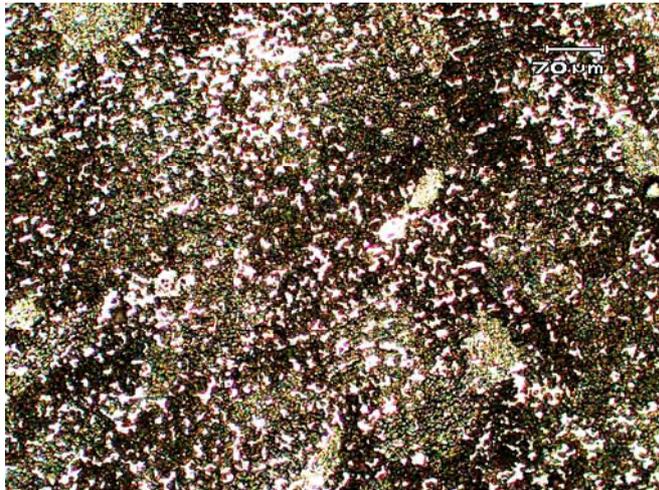
**รูปที่ ข.21 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม**



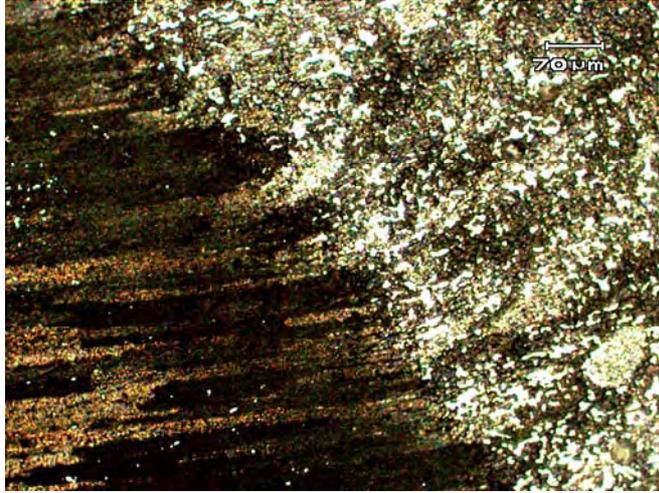
**รูปที่ ข.22 โครงสร้างชิ้นงาน**



รูปที่ ข.23 โครงสร้างชั้นงาน

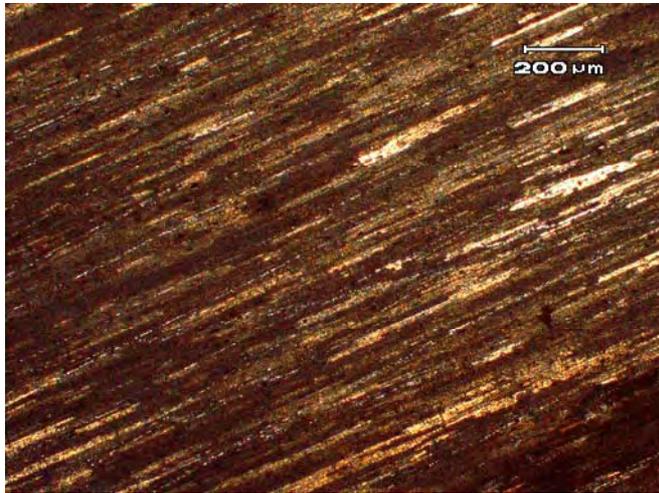


รูปที่ ข.24 โครงสร้างเนื้อเชื่อม

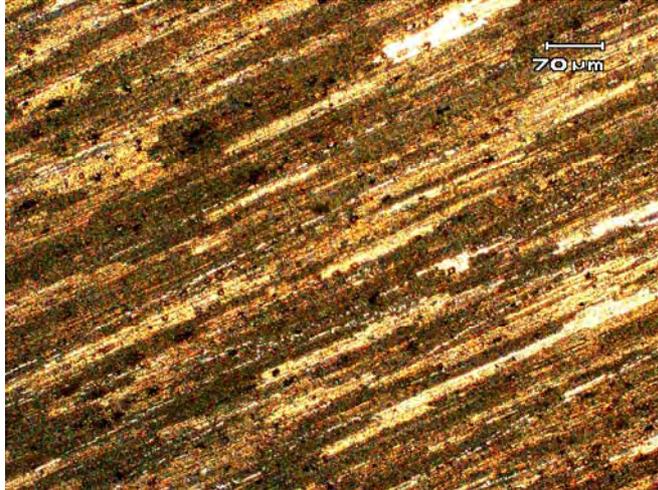


รูปที่ ข.25 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม

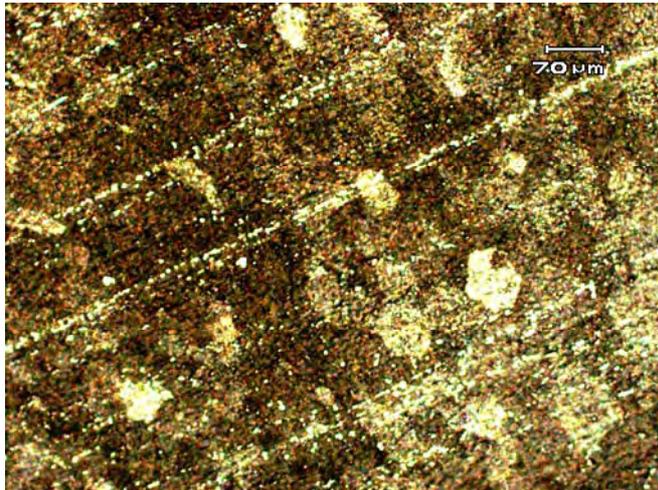
ชิ้นงาน Cold Rolling 5%  
(PWAA 6 hr)



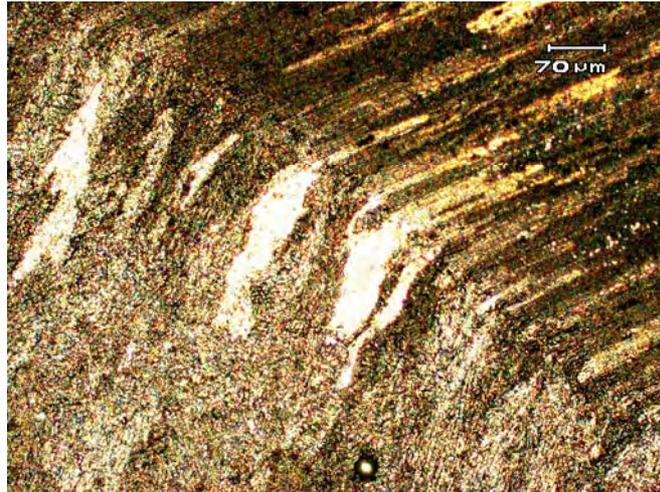
รูปที่ ข.26 โครงสร้างชิ้นงาน



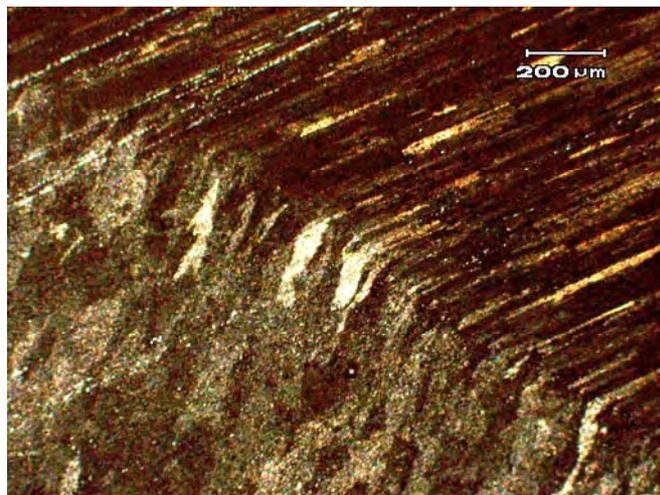
รูปที่ ข.27 โครงสร้างชั้นงาน



รูปที่ ข.28 โครงสร้างเนื้อเชื่อม

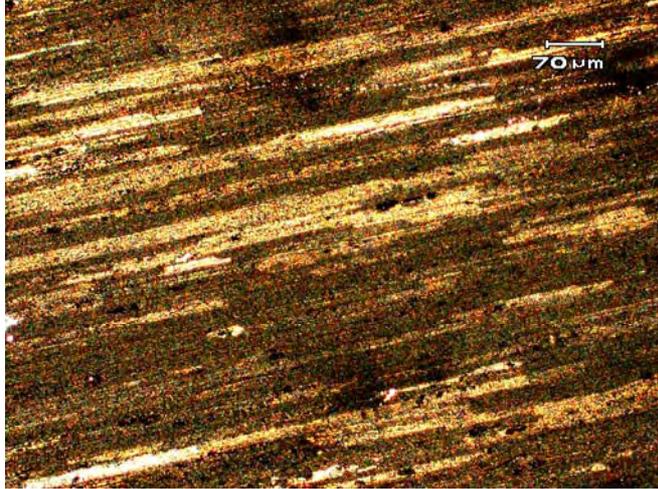


รูปที่ ข.29 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

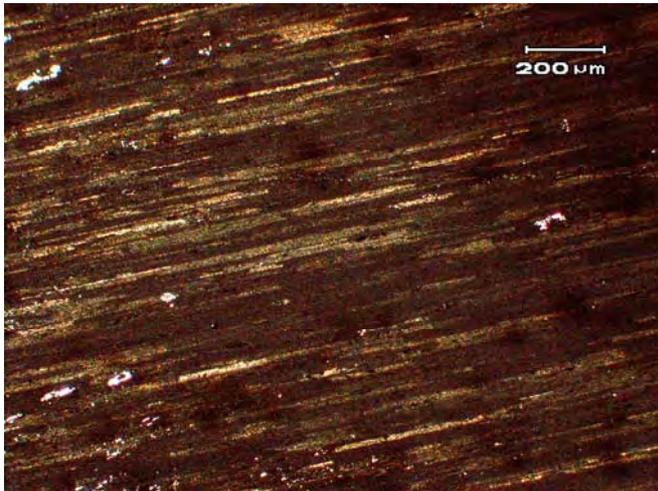


รูปที่ ข.30 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

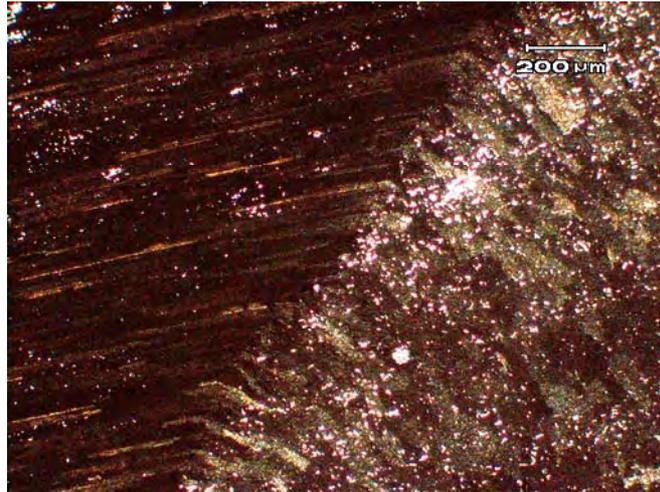
ชิ้นงาน Cold Rolling 10%  
(PWAA 6 hr)



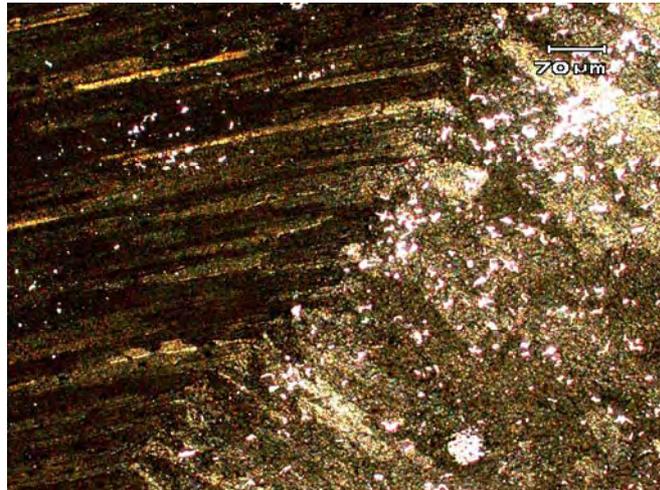
รูปที่ ข.31 โครงสร้างชิ้นงาน



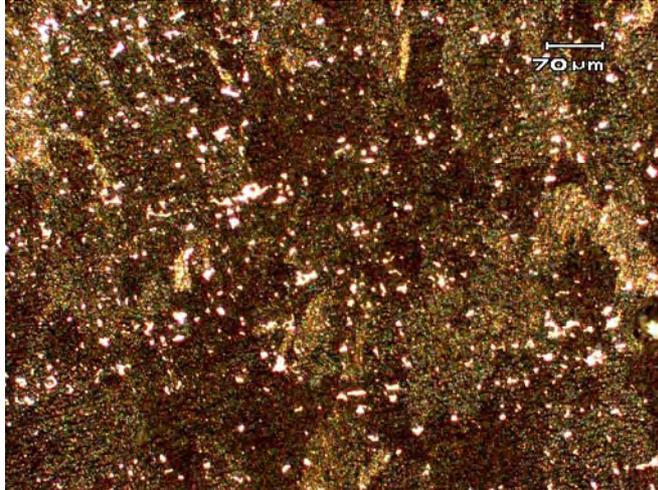
รูปที่ ข.32 โครงสร้างชิ้นงาน



รูปที่ ข.33 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

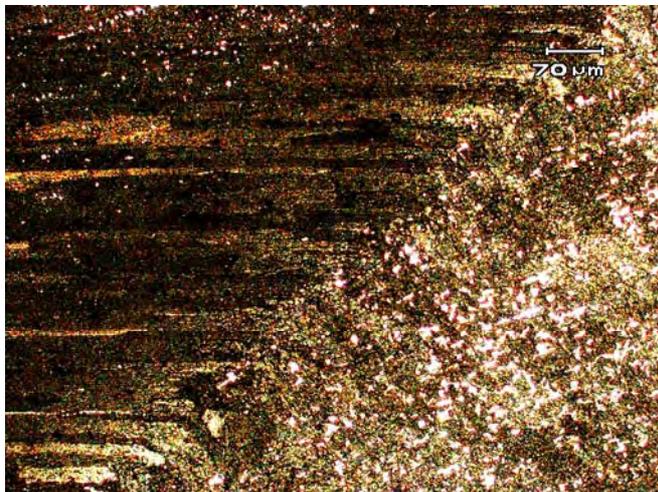


รูปที่ ข.34 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

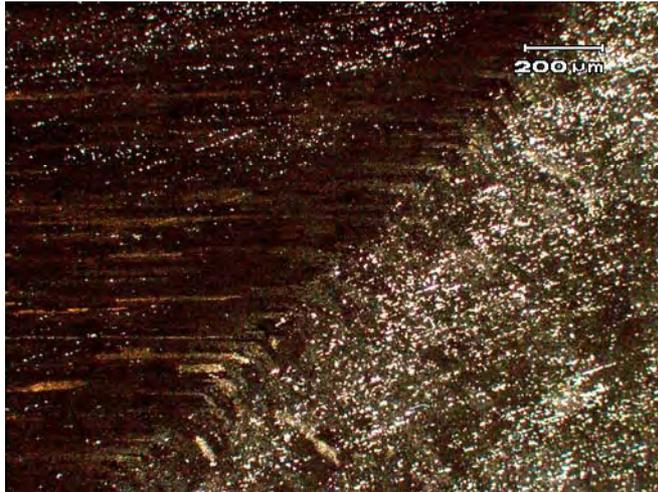


รูปที่ ข.35 โครงสร้างเนื้อเชื่อม

ชั้นงาน Cold Rolling 20%  
(PWAA 6 hr)



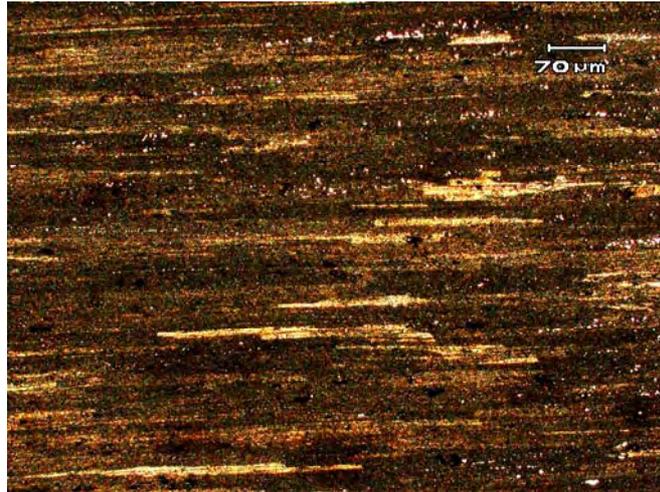
รูปที่ ข.36 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม



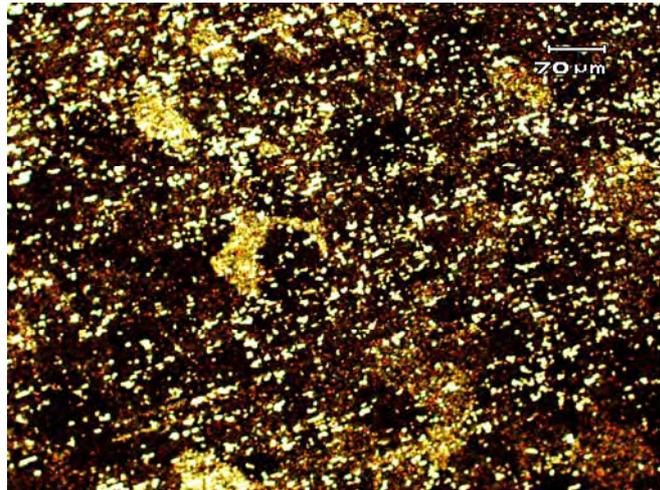
รูปที่ ข.37 โครงสร้างของบรอยเชื่อม



รูปที่ ข.38 โครงสร้างชั้นงาน

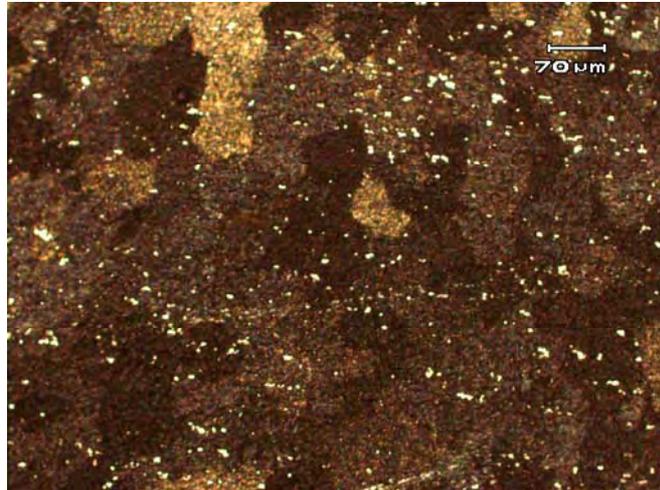


รูปที่ ข.39 โครงสร้างชิ้นงาน

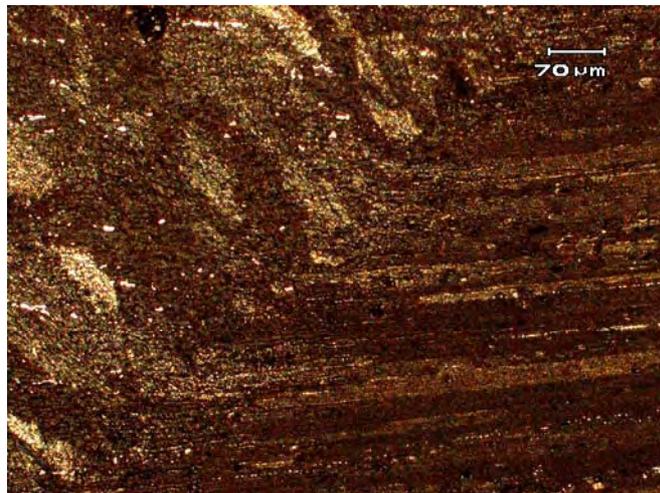


รูปที่ ข.40 โครงสร้างเนื้อเชื่อม

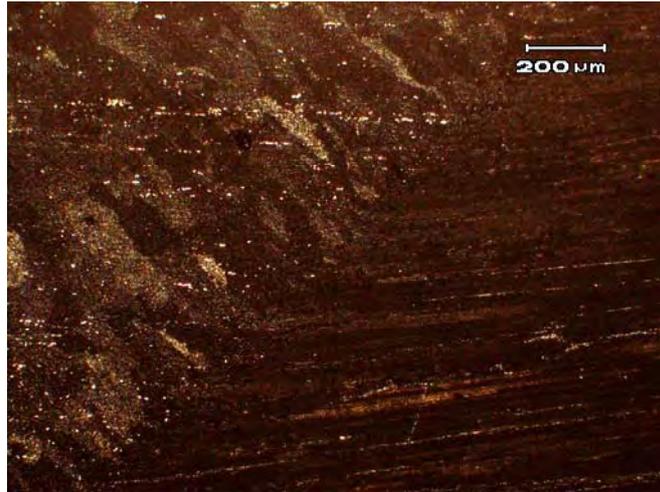
**ชิ้นงาน Non Cold Rolling  
(PWAA 12 hr)**



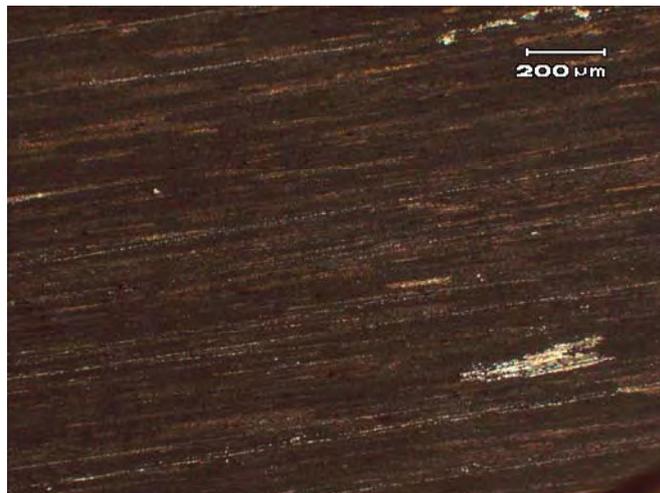
**รูปที่ ข.41 โครงสร้างเนื้อเชื่อม**



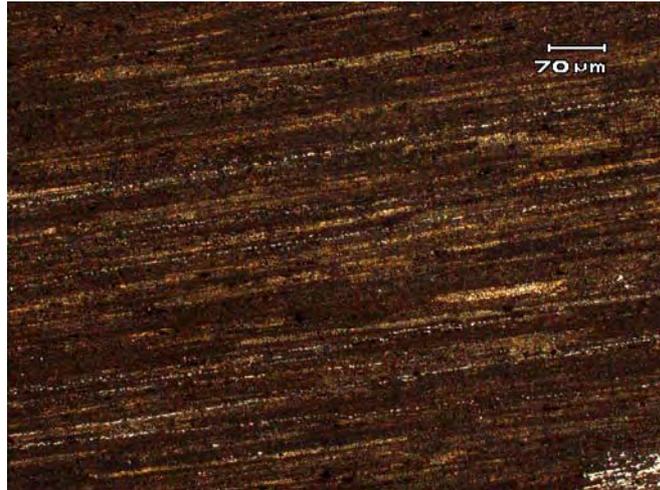
**รูปที่ ข.42 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม**



รูปที่ ข.43 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม

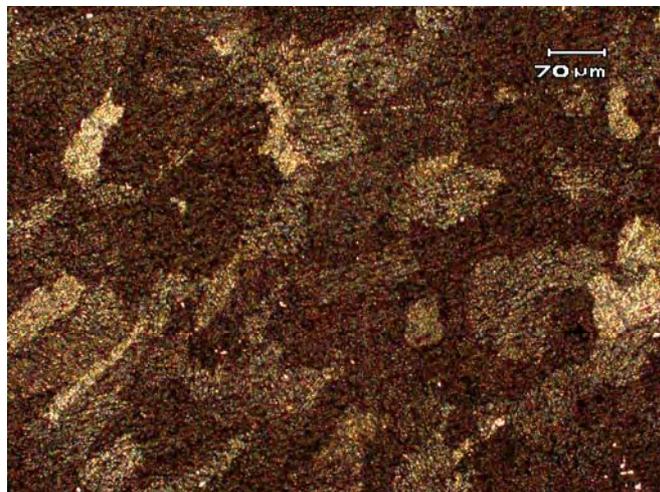


รูปที่ ข.44 โครงสร้างชั้นงาน

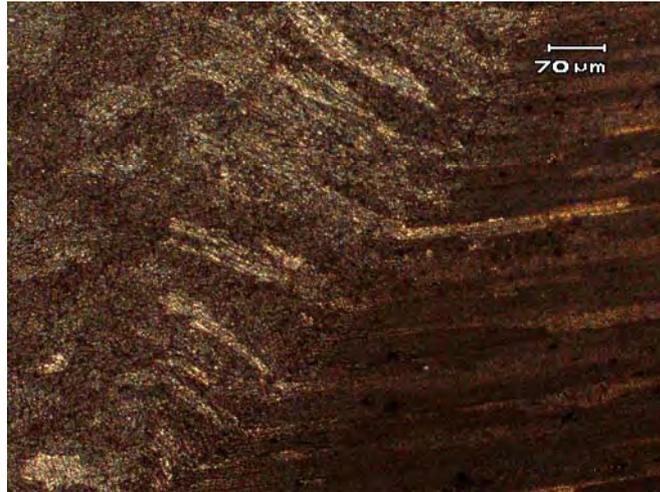


รูปที่ ข.45 โครงสร้างชิ้นงาน

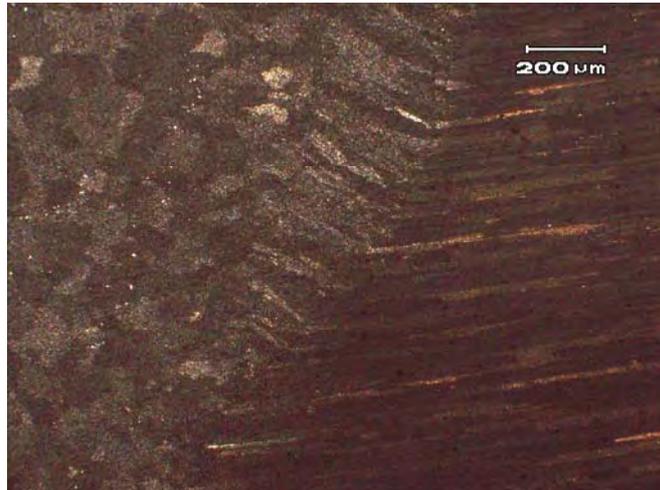
ชิ้นงาน Cold Rolling 5%  
(PWAA 12 hr)



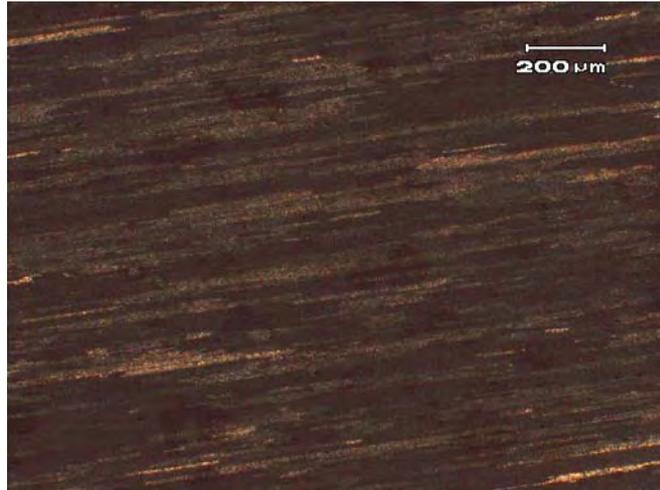
รูปที่ ข.46 โครงสร้างเนื้อเชื่อม



รูปที่ ข.47 โครงสร้างของบรอยเชื่อม



รูปที่ ข.48 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

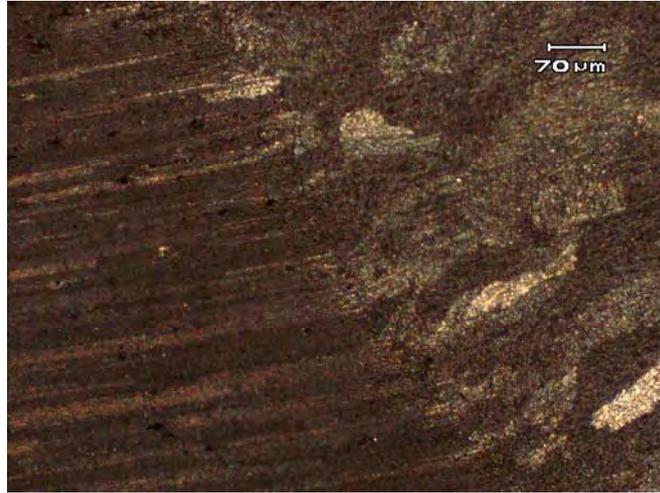


รูปที่ ข.49 โครงสร้างชิ้นงาน

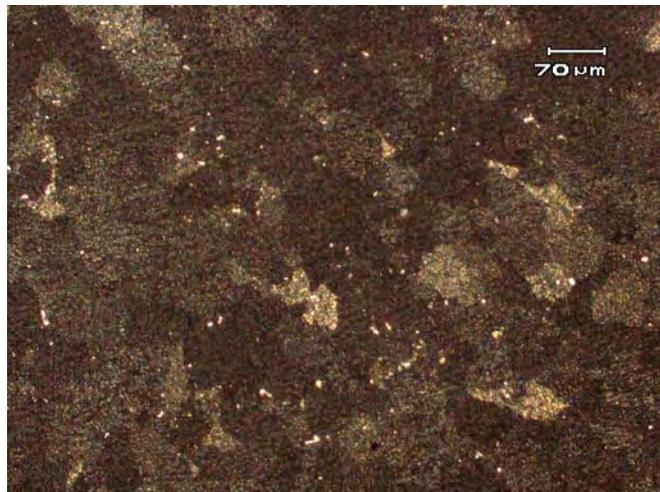


รูปที่ ข.50 โครงสร้างชิ้นงาน

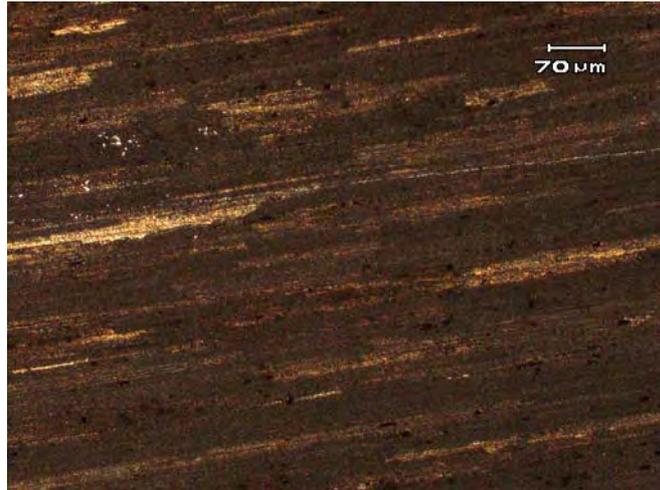
ชิ้นงาน Cold Rolling 10%  
(PWAA 12 hr)



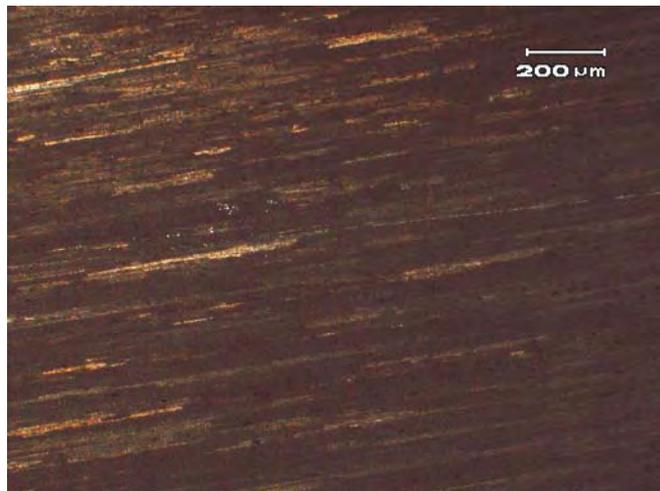
รูปที่ ข.51 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม



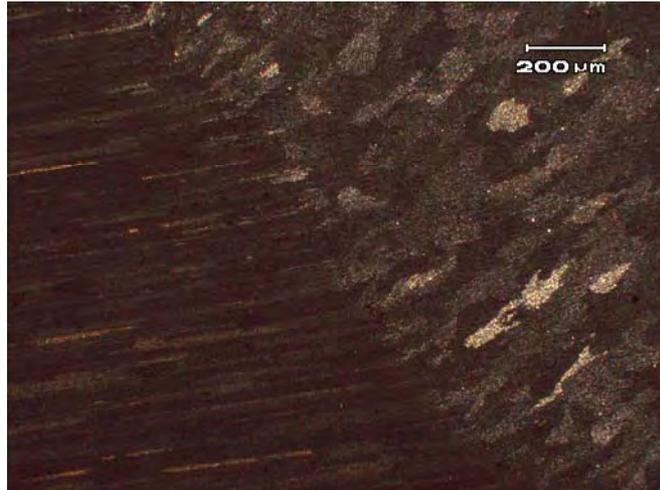
รูปที่ ข.52 โครงสร้างเนื้อเชื่อม



รูปที่ ข.53 โครงสร้างชิ้นงาน

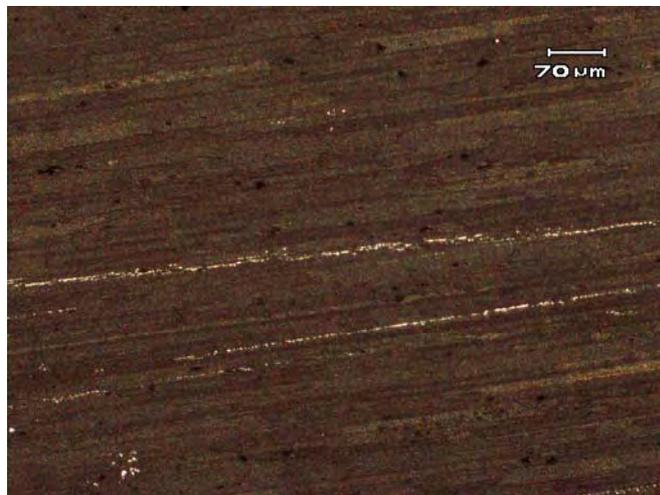


รูปที่ ข.54 โครงสร้างชิ้นงาน

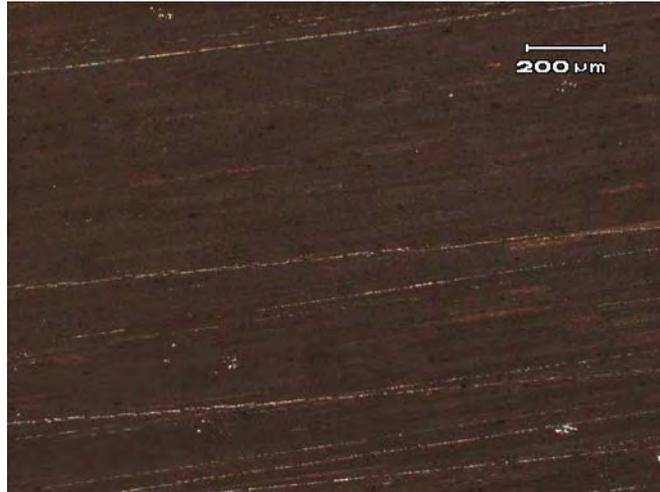


รูปที่ ข.55 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม

ชิ้นงาน Cold Rolling 20%  
(PWAA 12 hr)



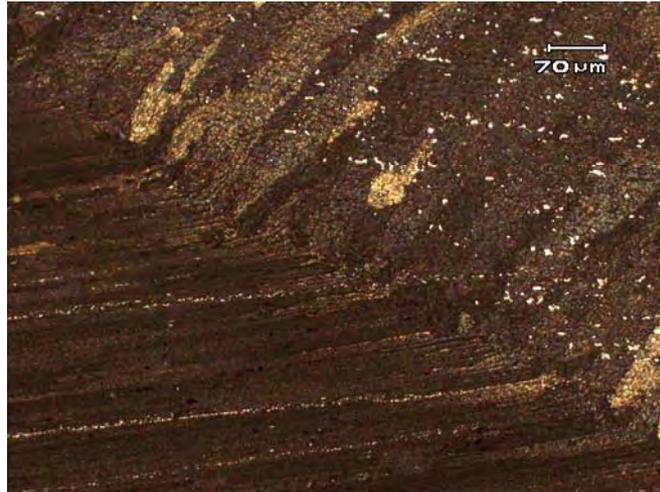
รูปที่ ข.56 โครงสร้างชิ้นงาน



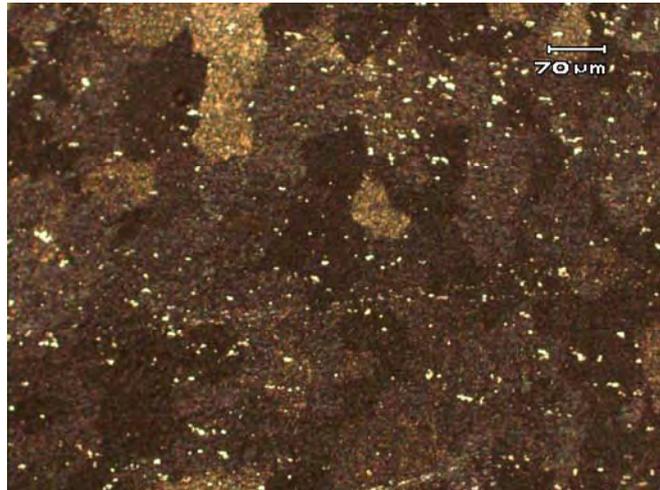
รูปที่ ข.57 โครงสร้างชิ้นงาน



รูปที่ ข.58 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม

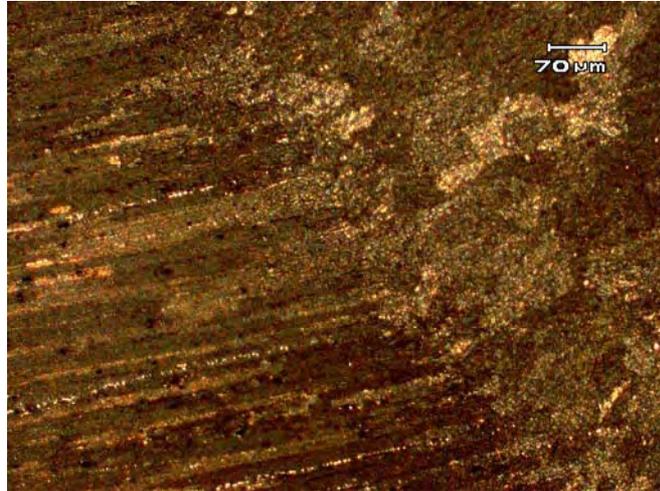


รูปที่ ข.59 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

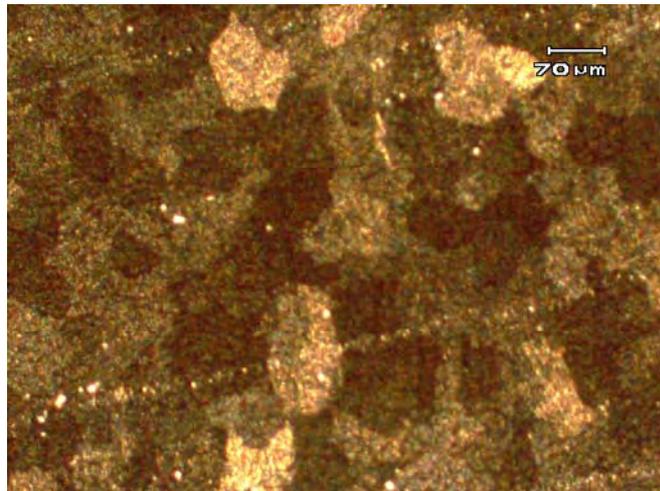


รูปที่ ข.60 โครงสร้างเนื้อเชื่อม

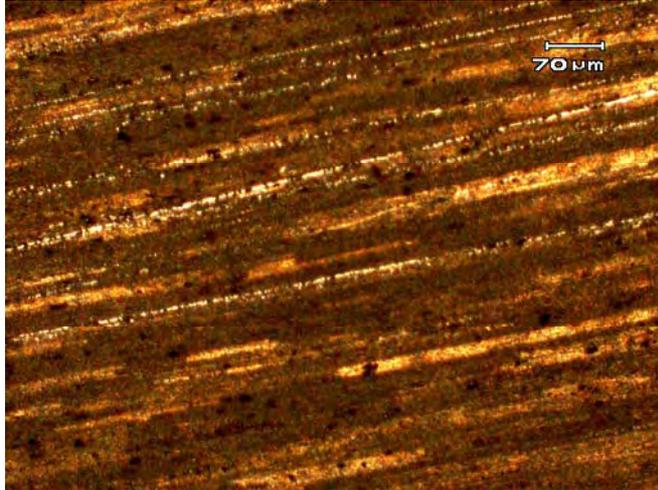
**ชิ้นงาน Non Cold Rolling  
(PWAA 24 hr)**



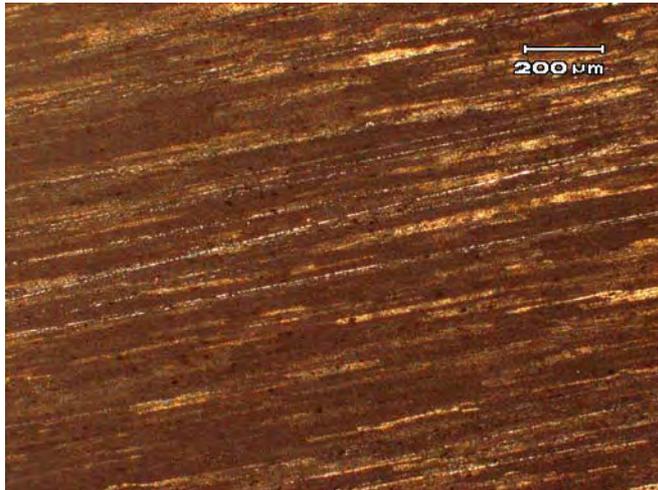
**รูปที่ ข.61 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม**



**รูปที่ ข.62 โครงสร้างเนื้อเชื่อม**



รูปที่ ข.63 โครงสร้างชิ้นงาน

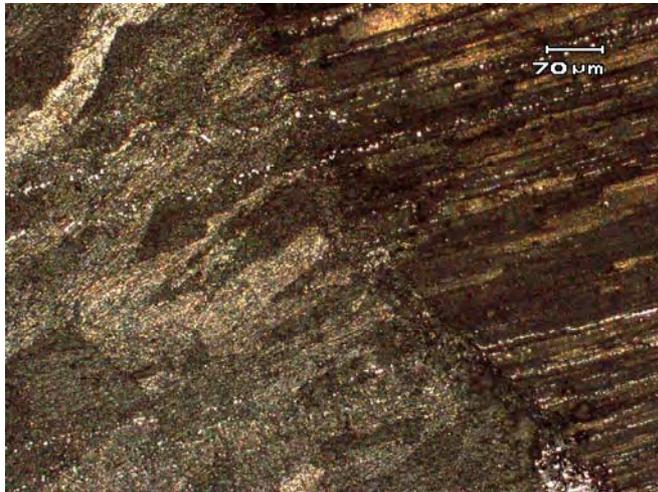


รูปที่ ข.64 โครงสร้างชิ้นงาน

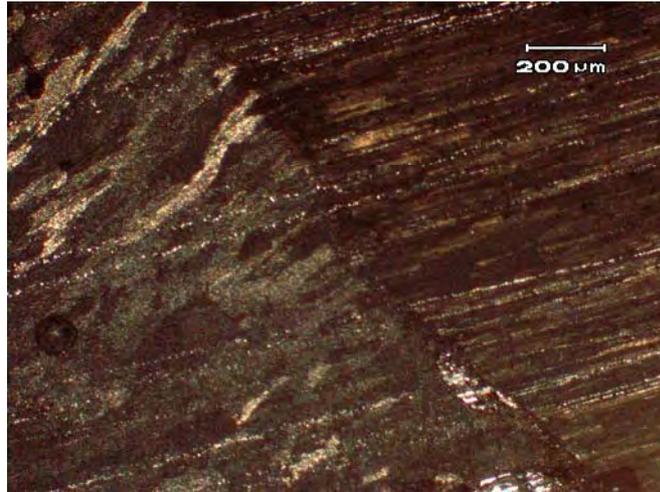


รูปที่ ข.65 โครงสร้างของบรอยเชื่อม

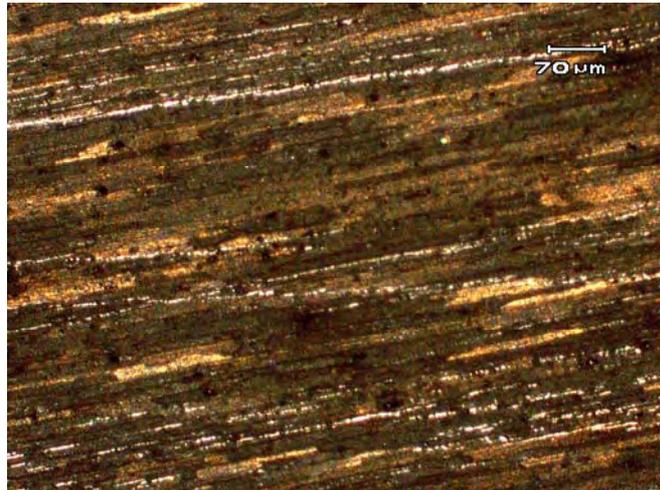
ชั้นงาน Cold Rolling 5%  
(PWAA 24 hr)



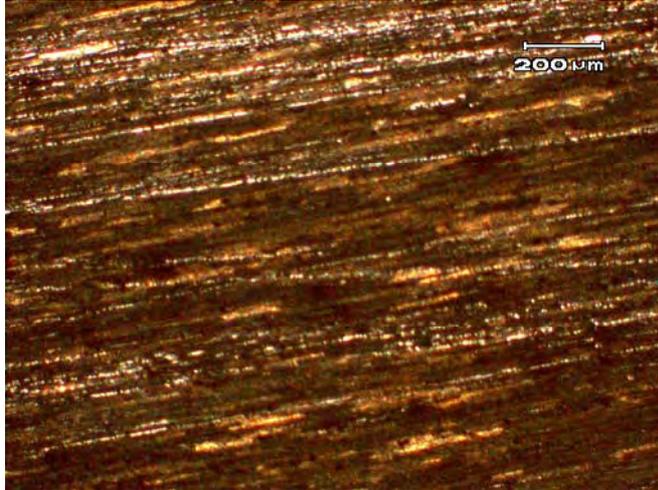
รูปที่ ข.66 โครงสร้างของบรอยเชื่อม



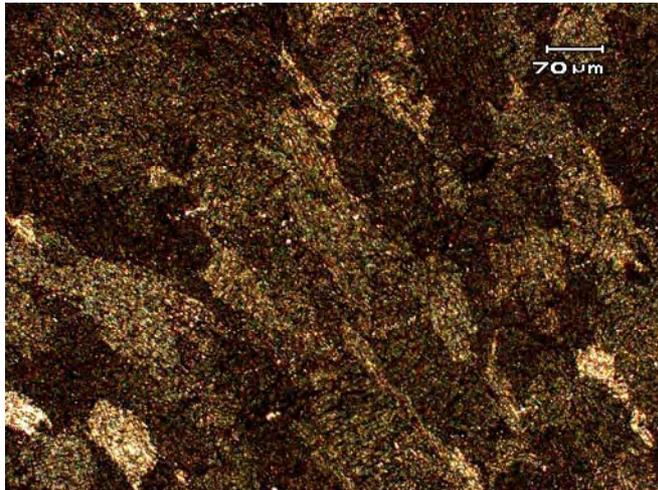
รูปที่ ข.67 โครงสร้างของบรอยเชื่อม



รูปที่ ข.68 โครงสร้างชิ้นงาน

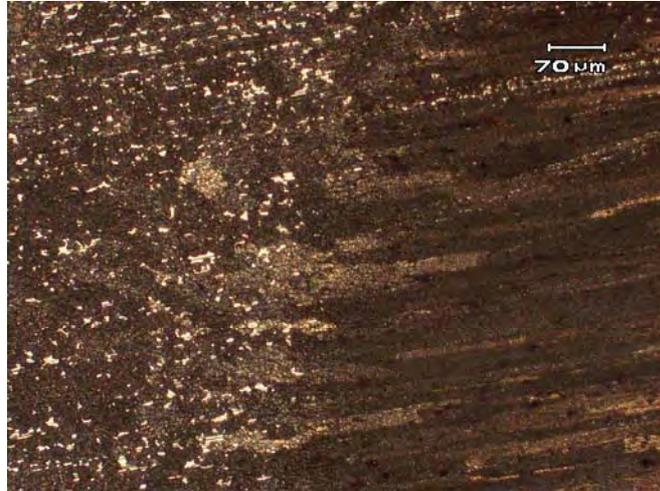


รูปที่ ข.69 โครงสร้างชั้นงาน

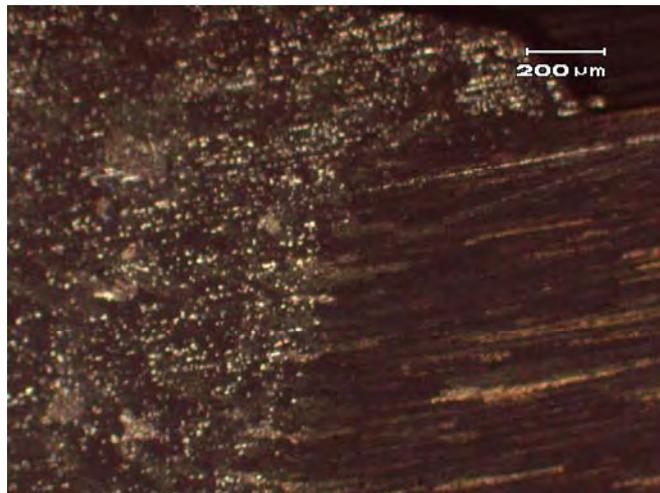


รูปที่ ข.70 โครงสร้างเนื้อเชื่อม

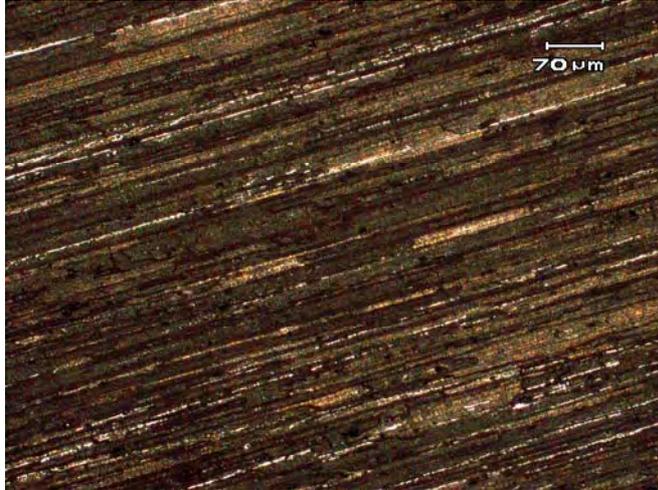
ชิ้นงาน Cold Rolling 10%  
(PWAA 24 hr)



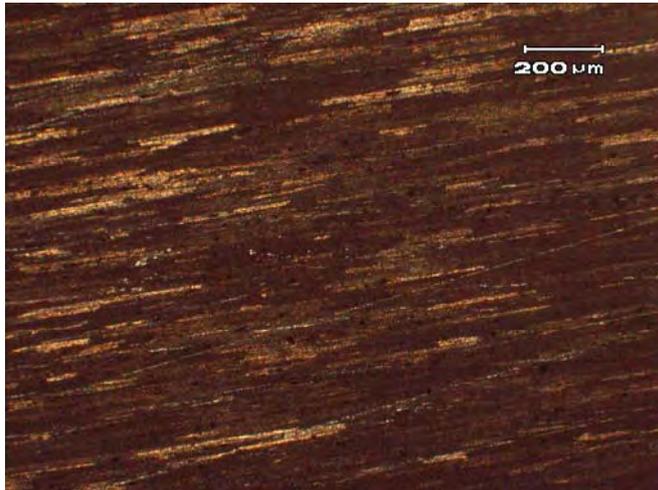
รูปที่ ข.71 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม



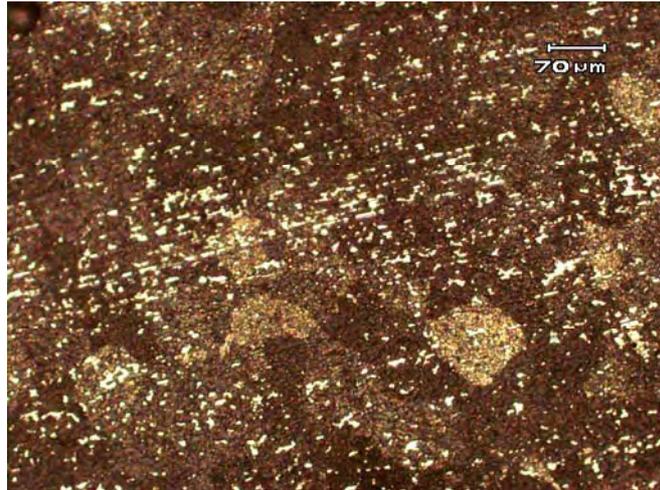
รูปที่ ข.72 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม



รูปที่ ข.73 โครงสร้างชิ้นงาน

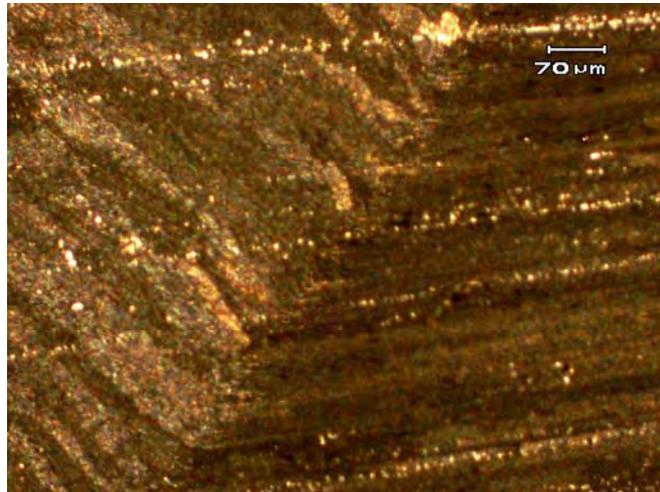


รูปที่ ข.74 โครงสร้างชิ้นงาน

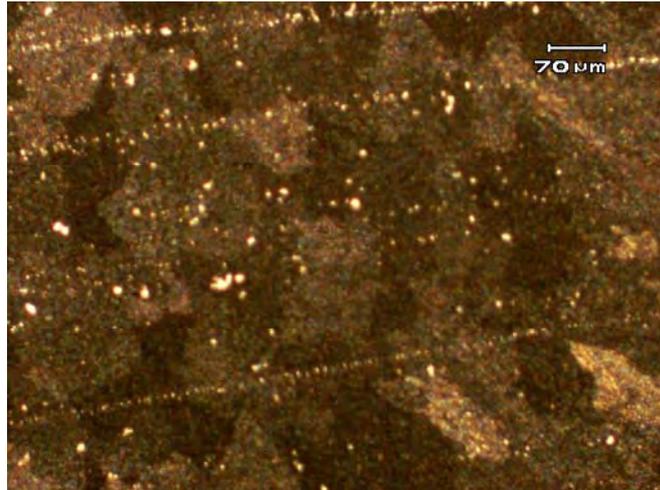


รูปที่ ข.75 โครงสร้างรอยเชื่อม

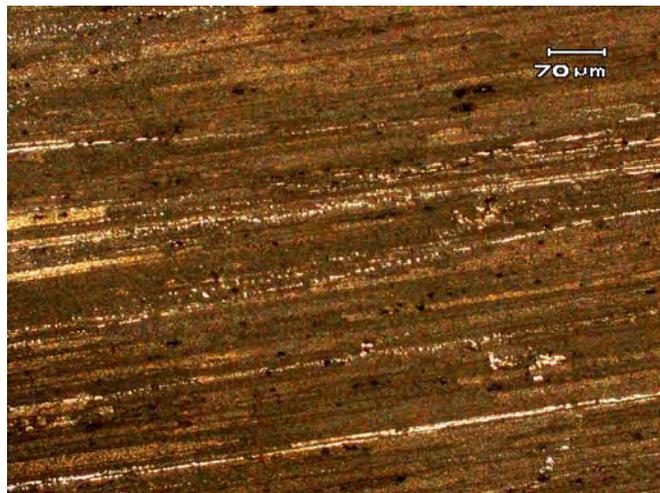
ชิ้นงาน Cold Rolling 20%  
(PWAA 24 hr)



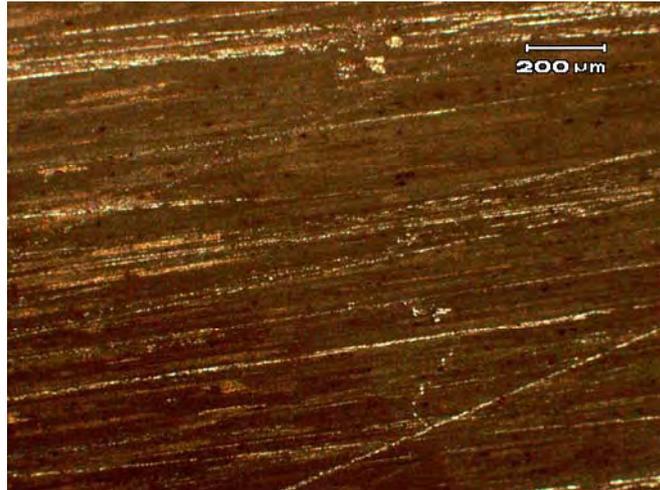
รูปที่ ข.76 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม



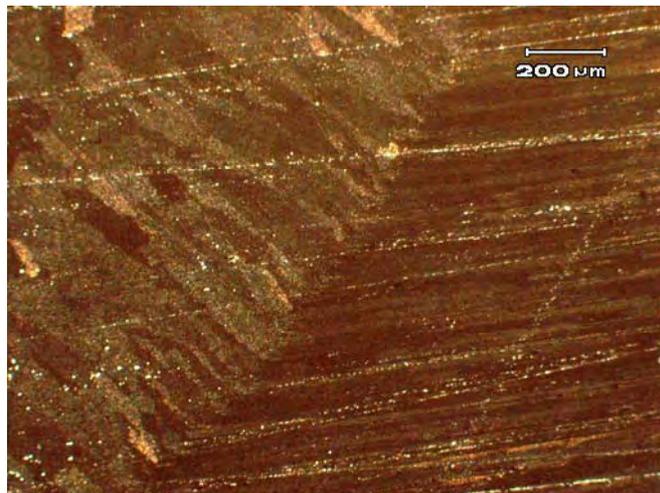
รูปที่ ข.77 โครงสร้างรอยเชื่อม



รูปที่ ข.78 โครงสร้างชั้นงาน



รูปที่ ข.79 โครงสร้างชิ้นงาน



รูปที่ ข.80 โครงสร้างขอบรอยเชื่อม

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายวสันต์ อุดมผล
วัน-เดือน-ปีเกิด	10 สิงหาคม 2520
ประวัติการศึกษา	
ระดับอาชีวศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างท่อและประสาน สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ.2541
ระดับปริญญาตรี	วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิชาเทคโนโลยีการเชื่อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ พ.ศ.2544
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549

๒๐๒๕๖๖๖๖๖๖

## มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

## ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

วันที่ 27 เดือน ธันวาคม พ.ศ 2549

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) นายวสันต์ อุดมผล รหัสประจำตัว 46430529

เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา  โท  เอก

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมการเชื่อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์

อยู่บ้านเลขที่ 6/270 หมู่ที่ - ตระกอก/ชอย รามคำแหง40 ถนน รามคำแหง ตำบล/แขวง หัวหมาก

อำเภอ/เขต บางกะปิ จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10240 ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้

ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์ ตำแหน่ง คณบดีคณะ

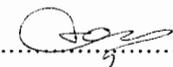
วิศวกรรมศาสตร์ เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง ผลของการรีดเย็นและกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมต่อความแข็งของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด 7075-T651 ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ รศ.ดร.ชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

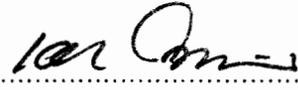
2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่า เป็นวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

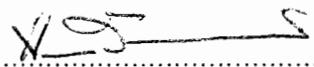
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ.....  ผู้โอนลิขสิทธิ์

(นายวสันต์ อุดมผล)

ลงชื่อ.....  ผู้รับโอนลิขสิทธิ์

(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ.....  พยาน

(รศ.ดร.ชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

ลงชื่อ.....  พยาน

(ผศ.ดร.บวร โชค ผู้พัฒนา)