

ผลของวัฏจักรความร้อนการเชื่อมต่อความแข็งและความแกร่งของเหล็กกล้าเกรด ASTM A516 - 70



นายสยาม ทิพย์สุนทรศักดิ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9739-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF WELD THERMAL CYCLE ON HARDNESS AND TOUGHNESS OF THE ASTM A516-70  
STEEL



Mr.Sayarm Tipsoontronsak

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-9739-7



สยาม ทิพย์สุนทรศักดิ์ : ผลของวัฏจักรความร้อนการเชื่อมต่อความแข็งและความแกร่งของเหล็กกล้าเกรด ASTM A516-70. (EFFECT OF WELD THERMAL CYCLE ON HARDNESS AND TOUGHNESS OF THE ASTM A516-70 STEEL) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, 55 หน้า. ISBN 974-17-9739-7.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของวัฏจักรความร้อนการเชื่อมโดยศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิสูงสุดและเวลาการเย็นตัว ต่อค่าความแกร่งและความแข็งของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 โดยทดสอบกับชิ้นงานตามแนวการรีดและตั้งฉากแนวการรีด การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ตอนที่ 1 ศึกษาผลวัฏจักรความร้อนรอบเดียว อุณหภูมิสูงสุด 1350°C เวลาการเย็นตัวจาก 800 ถึง 500°C ( $\Delta t_{8/5}$ ) 10, 20, 40 และ 80 วินาที ตอนที่ 2 ศึกษาผลวัฏจักรความร้อนการเชื่อมรอบคู่ โดยแบ่งแยกย่อยออกเป็นอีก 3 ตอนคือ ตอนแรกกำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดรอบแรกและรอบสอง ( $T_{p1}$  และ  $T_{p2}$ ) 1350°C เวลาการเย็นตัว ( $\Delta t_{8/5}$ ) 10, 20, 40 และ 80 วินาที ตอนย่อยที่ 2 กำหนดให้  $T_{p1} = 1350^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  วินาที และ  $T_{p2} = 600, 750, 900$  และ  $1350^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(2)} = 10, 20, 40$  และ 80 วินาที ตอนย่อยที่ 3 ศึกษาการจำลองการเชื่อมชิ้นงานแนวตั้งฉากการรีดโดยให้  $T_{p1} = 1350^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  วินาที และ  $T_{p2} = 1350, 900^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(2)} = 10, 20, 40$  และ 80 วินาที

ผลการวิจัยพบว่าในการจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียว ความแกร่งจะมีค่าต่ำกว่าก่อนจำลองการเชื่อม โดยที่  $\Delta t_{8/5} = 10-20$  วินาที โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่จะประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ เมื่อเวลาการเย็นตัวเพิ่มขึ้น จะเกิดโครงสร้างอซิควิลาร์เฟอร์ไรท์บางส่วน แต่ค่าความแกร่งไม่สูงขึ้น ความแข็งจะมีค่าลดลง อันมีผลมาจากโครงสร้างมาร์เทนไซต์เปลี่ยนเป็นอซิควิลาร์เฟอร์ไรท์ สำหรับการจำลองการเชื่อมแบบรอบคู่พบว่าเวลาเย็นตัวในรอบแรกไม่มีผลกระทบต่อความแกร่งขณะที่  $T_{p2} = 900^\circ\text{C}$  จะให้ความแกร่งภายหลังการจำลองการเชื่อมแบบรอบคู่สูงสุด เพราะโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และอซิควิลาร์เฟอร์ไรท์ ที่มีขนาดเกรนละเอียด ส่วนทิศทางการรีดของชิ้นงานทดสอบ จะมีผลกระทบอย่างชัดเจนที่  $T_{p2} = 900^\circ\text{C}$  โดยชิ้นงานตั้งฉากแนวการรีด จะมีความแกร่งต่ำกว่าชิ้นงานขนานแนวการรีด

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา....2545.....

4270580421 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS : EFFECT OF WELD THERMAL CYCLE ON HARDNESS AND TOUGHNESS  
OF THE ASTM A516-70. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.GOBBOON  
LOTHONGKUM ; DR.ING, 55 pp. ISBN 974-17-9739-7.

This research studied the effect of peak temperature and cooling time of weld thermal cycles on hardness and toughness of carbon ASTM A 516-70 steel. Specimens in rolling and transverse rolling direction were prepared. The first experiment was single weld thermal cycle simulation. The peak temperature ( $T_p$ ) was at  $1350^{\circ}\text{C}$  and cooling time from  $800$  to  $500^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta t_{8/5}$ ) is 10, 20, 40, and 80 seconds. The second experiment was double thermal cycle simulation, which were divided into 3 parts; the first part was  $T_{p_1} = T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$  and  $\Delta t_{8/5} = 10, 20, 40$  and  $80$  s. The second part was  $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$  and  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  s,  $T_{p_2} = 600, 750, 900$  and  $1350^{\circ}\text{C}$  and  $\Delta t_{8/5(2)} = 10, 20, 40$  and  $80$  s. The third part was experiment for transverse rolled specimens simulation. The  $T_{p_1}$  was  $1350^{\circ}\text{C}$  and  $\Delta t_{8/5}$  was 20 s, and  $T_{p_2}$  were 900 and  $1350^{\circ}\text{C}$  and  $\Delta t_{8/5}$  were 10, 20, 40 and 80 s.

The results showed that by single weld thermal cycle simulation, the specimen had the lower toughness than specimen before simulation, when  $\Delta t_{8/5} = 10-20$  s. The major microstructure is Martensite. Increasing the cooling time, acicular ferrite structure increases. The toughness does not increase, but hardness decreases. By double thermal cycle simulation, it was found that the first cooling time did not affect to toughness, but at the second peak temperature of  $900^{\circ}\text{C}$ , toughness increases. This is because microstructure comprise of fine pearlite and acicular ferrite. The effect of rolling direction was found when the second peak temperature was at  $900^{\circ}\text{C}$ . At this temperature the sample in transverse rolling direction had the lower toughness than the sample in rolling direction.

Department .... Metallurgical Engineering.... Student 's signature.....

Field of study ... Metallurgical Engineering.. Advisor 's signature.....

Academic year ...2002.....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ด้วยความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือจากบุคคลต่าง ๆ มากมาย ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ที่ให้คำปรึกษาด้วยดีมาตลอด ขอขอบคุณบริษัท สิ้นไทย จำกัด ที่อนุเคราะห์จัดหาเหล็กแผ่นที่ใช้ในการทดลองในราคาถูก ขอขอบคุณคุณมารดา ที่ช่วยเหลือเป็นกำลังใจมาตลอด ขอขอบคุณคุณเสนีย์ มณีเพชร ที่ช่วยสอนใช้ และให้คำแนะนำเกี่ยวกับเครื่องมือเตรียมชิ้นงาน ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ช่วยเหลืองานวิจัยนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการภาค ๔ ทุกคนที่ช่วยอำนวยความสะดวก

สุดท้าย ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย และอาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ ที่กรุณาใช้เวลาอันมีค่าเพื่อคำแนะนำงานวิจัยนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเหล็กกล้า ASTM A516-70.....	3
2.2 บริเวณกระทบร้อน (Heat – Affected Zone).....	3
2.3 การทำนายโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของบริเวณกระทบร้อน.....	5
2.4 การจำลองการเชื่อม (Weld Simulation).....	6
2.5 การเชื่อมแบบหลายรอย (Multi-run welds).....	7
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	16
3.1 การเตรียมการทดลอง.....	16
3.1.1 อุปกรณ์.....	16
3.1.2 การเตรียมชิ้นงานทดลอง.....	16
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	17
3.2.1 ขั้นตอนการจำลองการเชื่อม.....	17
3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบความแกร่ง.....	22
3.2.3 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	23
3.2.4 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง.....	23



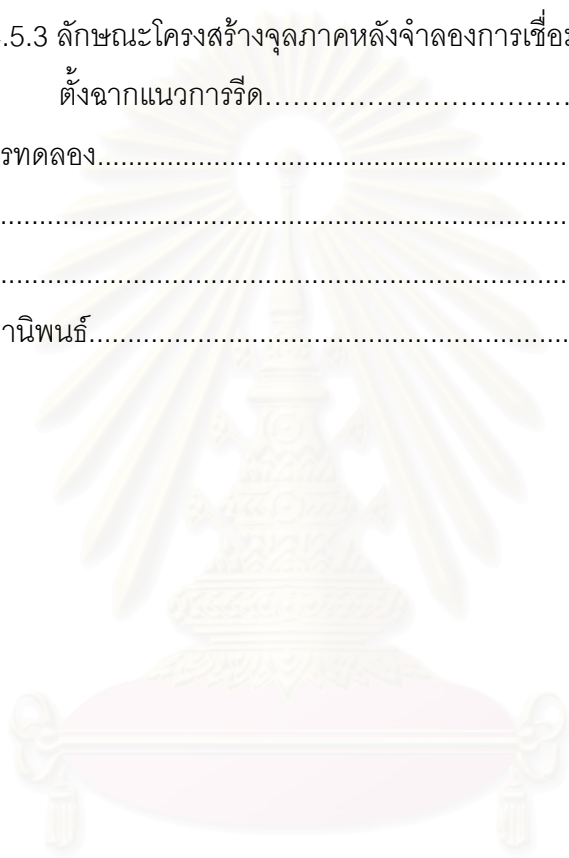
บทที่	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย.....	24
4.1 สมบัติและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70.....	24
4.1.1 ส่วนผสมทางเคมี.....	24
4.1.2 ความแกร่งและความแข็ง.....	24
4.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70.....	25
4.2 ผลการจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียว สำหรับชิ้นงานขนานและตั้งฉาก แนวการรีด.....	25
4.2.1 ความแกร่งหลังจากผ่านรอบการเชื่อมเดียว สำหรับชิ้นงานขนาน และตั้งฉากแนวการรีด.....	26
4.2.2 ความแข็งภายหลังจำลองการเชื่อมรอบเดียว สำหรับชิ้นงานขนาน และตั้งฉากแนวการรีด.....	27
4.2.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคภายหลังจำลองการเชื่อมรอบเดียว.....	28
4.3 ผลการจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนานแนวการรีด แปรผัน เวลาการเย็นตัว.....	29
4.3.1 ความแกร่งหลังจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนานแนว การรีดแปรผันเวลาเย็นตัว.....	30
4.3.2 ความแข็งหลังจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนานแนวการรีด แปรผันเวลาการเย็นตัว.....	30
4.3.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคภายหลังจำลองการเชื่อมรอบคู่ ชิ้นงาน ขนานแนวการรีด แปรผันเวลาการเย็นตัว.....	31
4.4 ผลการจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนานแนวการรีด แปรผัน อุณหภูมิสูงสุดรอบสอง.....	31
4.4.1 ความแกร่งหลังจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนานแนวการรีด แปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง.....	32
4.4.2 ความแข็งหลังจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนานแนวการรีด แปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง.....	33
4.4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการจำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ ชิ้นงาน ขนานการรีด แปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง.....	34



บทที่

หน้า

4.5 ผลการจำลองการเชื่อมรอบคู้ ขึ้นงานทดสอบตั้งฉากแนวการรีด.....	35
4.5.1 ความแกร่งหลังจำลองการเชื่อมรอบคู้ ขึ้นงานทดสอบตั้งฉาก แนวการรีด.....	35
4.5.2 ความแข็งหลังจำลองการเชื่อมคู้ ขึ้นงานทดสอบตั้งฉากแนวการรีด.....	36
4.5.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังจำลองการเชื่อมรอบคู้ขึ้นงานทดสอบ ตั้งฉากแนวการรีด.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	38
รายการอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	40
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	55



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70.....	3
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70.....	3
ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า SQV-2A.....	8
ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของ HSLA-100 ที่ใช้ในการศึกษาของ G. Spanos และคณะ.....	11
ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า Nb-V และ Nb-Mo.....	13
ตารางที่ 2.6 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้สำหรับจำลองวัฏจักรความร้อนการเชื่อม.....	14
ตารางที่ 3.1 จำนวนชิ้นงาน ที่สภาวะการจำลองการเชื่อมสำหรับศึกษาผลของรอบ การเชื่อมเดียว ที่อุณหภูมิสูงสุด 1350°C.....	17
ตารางที่ 3.2 จำนวนชิ้นงาน ที่สภาวะจำลองการเชื่อมต่างๆ สำหรับศึกษาผลของรอบการ เชื่อมคู่สำหรับชิ้นงานขนานแนวการรีด แปรรูปเวลาการเย็นตัวทั้งสองรอบ โดย $Tp_1 = Tp_2 = 1350^{\circ}C$ .....	19
ตารางที่ 3.3 จำนวนชิ้นงาน ที่สภาวะจำลองการเชื่อมสำหรับศึกษาผลของรอบการเชื่อมคู่ ชิ้นงานขนานแนวการรีดแปรรูปอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง โดย $Tp_1 = 1350^{\circ}C$ และ $\Delta t_{8/5(1)} = 20$ s.....	20
ตารางที่ 3.4 จำนวนชิ้นงาน ที่สภาวะจำลองการเชื่อมสำหรับศึกษาผลของรอบการเชื่อมคู่ ชิ้นงานทดสอบตั้งฉากแนวการรีด โดย $Tp_1 = 1350^{\circ}C$ และ $\Delta t_{8/5(1)} = 20$ s.....	22
ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70.....	24
ตารางที่ 4.2 ความแกร่งและความแข็งของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70.....	24
ตารางที่ 4.3 อักษรย่อของโครงสร้างจุลภาคที่พบในบริเวณกระทันร้อน.....	26

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนย่อยภายในบริเวณกระทันของเหล็กกล้าคาร์บอน (0.15 %โดยน้ำหนัก) เทียบกับแผนภูมิสมดุล Fe-Fe <sub>3</sub> C.....	4
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคระหว่าง (a) รอยเชื่อมแบบรอยเดี่ยว (b) รอยเชื่อมแบบหลายรอย.....	8
รูปที่ 2.3 กราฟของวัฏจักรความร้อนสำหรับจำลอง Intercritically reheated coarse-grained HAZ (a) และ (b), และที่ใช้ใน Temper-bead thermal cycle (c).....	9
รูปที่ 2.4 พลังงานที่ถูกดูดซับ (ทดสอบ Charpy impact) ของ Intercritically reheated coarse-grained HAZ และค่าของอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรความร้อน รอบที่สอง.....	10
รูปที่ 2.5 พลังงานที่ถูกดูดซับ (ทดสอบ Charpy impact) และค่าของอุณหภูมิสูงสุด ของ Temper-bead thermal cycle.....	10
รูปที่ 2.6 บริเวณที่หลอมละลาย และบริเวณกระทันจากการเชื่อม.....	11
รูปที่ 2.7 วัฏจักรความร้อนที่ใช้ในการทดลองของ G. Spanos และคณะ Tp = 1400°C และอัตราการเย็นตัว 5°C/s.....	12
รูปที่ 2.8 ค่าความแข็งเฉลี่ยแบบไมโครวิกเกอร์ที่อุณหภูมิสูงสุด และอัตราการเย็นตัวต่างๆ.....	13
รูปที่ 2.9 บริเวณกระทันที่ผ่านการเชื่อมสองรอย ซึ่งใช้จำลองในการศึกษา Nazmul Alam และคณะ.....	14
รูปที่ 2.10 ค่าความแกร่งของบริเวณกระทันที่จำลอง โดยแปรผันค่าอุณหภูมิสูงสุด.....	15
รูปที่ 2.11 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่จำลองบริเวณกระทันโดยแปรผันอุณหภูมิสูงสุด...15	
รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบขนานแนวการรีด และตั้งฉากแนวการรีดที่ใช้ใน การจำลองการเชื่อม.....	17
รูปที่ 3.2 ลักษณะวัฏจักรความร้อนที่ใช้ในการจำลองการเชื่อมรอบเดี่ยว สำหรับชิ้นงาน ขนานและตั้งฉากแนวการรีด.....	18
รูปที่ 3.3 ลักษณะวัฏจักรความร้อนที่ใช้ในการจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนาน การรีดโดยแปรผันอัตราการเย็นตัวทั้งสองรอบ.....	19
รูปที่ 3.4 ลักษณะวัฏจักรความร้อนที่ใช้ในการจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนาน การรีดโดยแปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง.....	20

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ฎ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.5 ลักษณะวัฏจักรความร้อนที่ใช้ในการจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานตั้งฉาก แนวการรีด โดยใช้อุณหภูมิสูงสุดรอบสองที่ 1350 และ 900 °C.....	21
รูปที่ 3.6 ชิ้นงานทดสอบความแกร่งแบบ Charpy ตามมาตรฐาน ASTM E23 – 96.....	22
รูปที่ 3.7 ลักษณะการตัดชิ้นงานเพื่อทดสอบโครงสร้างจุลภาค.....	23
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70 ที่ผ่านการรีดร้อน พิจารณาตั้งฉากแนวการรีดร้อน กำลังขยาย 500 เท่า.....	25
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25 °C กับเวลาการเย็นตัว ที่ผ่าน การจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียวที่อุณหภูมิสูงสุด 1350 °C.....	26
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาการเย็นตัว ของชิ้นงานทดสอบหลัง การจำลองการเชื่อมรอบเดียว ที่อุณหภูมิสูงสุด 1350 °C.....	27
รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ที่ผ่านการจำลอง การเชื่อมรอบเดียว ที่อุณหภูมิสูงสุด 1350 °C.....	28
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25 °C กับเวลาการเย็นตัวในรอบสอง โดย $T_{p_1} = T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$ .....	29
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาการเย็นตัวรอบสอง โดย $T_{p_1} = T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$ .....	30
รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ที่ผ่านการจำลอง การเชื่อมรอบคู่ โดย $T_{p_1} = T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$ และ $\Delta t_{8/5(1)} = 20$ วินาที.....	31
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25 °C กับเวลาการเย็นตัวรอบสอง แปรผัน อุณหภูมิสูงสุดรอบสอง โดย $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$ และ $\Delta t_{8/5(1)} = 20$ วินาที.....	32
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาการเย็นตัวรอบสองที่ $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$ และ $\Delta t_{8/5(1)} = 20$ วินาที.....	33
รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ที่ผ่านการจำลอง การเชื่อมรอบคู่ โดย $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20$ วินาที $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$ .....	34
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25 °C กับเวลาการเย็นตัวรอบสองของชิ้นงาน ทดสอบทิศทางตั้งฉากและขนานแนวการรีด.....	35

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ฐึ

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาการเย็นตัวรอบสอง ของชิ้นงานทดสอบ ทิศทางตั้งฉากและขนานแนวการรีด.....	36
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ในแนวขนานและตั้งฉากการรีด ที่ผ่านการจำลองการเชื่อมรอบคู่ โดย $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20$ วินาที $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$ .....	37



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์หรือคำย่อ	ความหมาย
A	ออสเตนไนท์
AF	อซิควิลาร์เฟอไรท์
B	เบนไนท์
$\Delta t_{8/5}$	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวผ่านช่วงอุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 500 °C
F	เฟอไรท์
FS	ferrite with aligned secondary phases
GF	grain boundary ferrite
HAZ	บริเวณกระทบร้อน (heat – affected zone)
HRC	ความแข็งหน่วยรีดเวลสเกล C
M	มาร์เทนไซต์
P	เพิร์ลไลท์
PF	polygonal ferrite
s	เวลาหน่วยวินาที
Tp	อุณหภูมิสูงสุดของรอบการเชื่อม
WF	widmanstatten pattern

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันมีอุตสาหกรรมหลายประเภทที่มีการใช้ภาชนะทนความดัน (Pressure Vessel) และหม้อต้ม (Boiler) เป็นส่วนประกอบในกระบวนการผลิต โดยนิยมใช้เหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 เป็นวัสดุดิบ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการขึ้นรูปเย็น (Cold forming) และความสามารถในการเชื่อม (Weldability) สูง ซึ่งการประกอบติดตั้งรวมถึงการซ่อมบำรุงมักใช้การเชื่อม ทำให้บริเวณจุดเชื่อมต่อ และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affecte Zone : HAZ) มีคุณสมบัติเชิงกลลดลงต่ำกว่าบริเวณของเนื้อเหล็ก และบ่อยครั้งพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเกิดในบริเวณกระทบร้อน

การเชื่อมต่อแผ่นเหล็กในการผลิตภาชนะทนความร้อน และหม้อต้ม ส่วนใหญ่ใช้การเชื่อมหลายรอย (Multi-run welds) ส่งผลให้บริเวณกระทบร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติเชิงกล เนื่องจากโลหะบริเวณรอยเชื่อมได้รับผลกระทบจากความร้อนไม่เท่ากัน ทำให้คุณสมบัติเริ่มต้น และอัตราการเย็นตัวที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดได้รับผลกระทบ ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากรอยเชื่อม

จุดประสงค์ของงานวิจัยคือศึกษาความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกล เนื่องจากปัจจัยทางความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบของการเชื่อม โดยจำลองการเชื่อมเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 และศึกษาสมบัติเชิงกลอันได้แก่ ความแกร่ง และความแข็ง รวมถึงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาถึงผลของอัตราการเย็นตัว อุณหภูมิสูงสุด และจำนวนวัฏจักรความร้อน (Thermal Cycle) ของการเชื่อม ต่อค่าความแข็ง และความแกร่ง ของบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ที่สภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิ 25°C



### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

จำลองการเชื่อมบริเวณกระทบร้อน โดยใช้เครื่องจำลองการเชื่อม (Welding Simulator) จำลองสภาวะที่เกิดขึ้นในบริเวณกระทบร้อน ให้คล้ายกับสภาพที่เกิดขึ้นในการเชื่อมจริง ดังนี้

1.3.1  $T_p = 1350^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5} = 10, 20, 40$  และ  $80$  วินาที

1.3.2  $T_{p_1} = T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 10, 20, 40$  และ  $80$  วินาที,  $\Delta t_{8/5(2)} = 10, 20, 40$  และ  $80$  วินาที

1.3.3  $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  วินาที และ  $T_{p_2} = 1350, 900, 750$  และ  $600^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(2)} = 10, 20, 40$  และ  $80$  วินาที

1.3.4 วัดค่าความแกร่งตาม ASTM E23-96 ที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  และความแข็งของตัวอย่าง และศึกษาโครงสร้างจุลภาค

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิสูงสุด และอัตราการเย็นตัว จากการเชื่อมเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ต่อความแข็งและความแกร่ง

1.4.2 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับแต่งตัวแปรในการปฏิบัติงานเชื่อม สำหรับงานเชื่อมเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 และปรับปรุงค่าความแข็ง รวมถึงความแกร่งให้ตรงตามความต้องการในการใช้งาน

## บทที่ 2 การศึกษาเบื้องต้น

### 2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70

เหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 เป็นเหล็กกล้าที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตภาชนะทนความดัน และหม้อต้ม โดยมีส่วนผสมทางเคมี และสมบัติดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70<sup>1</sup>

ชนิดของเหล็ก	ส่วนผสมทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)				
	C	Si	Mn	P	S
ASTM A516 เกรด 70	0.27-0.31	0.13-0.45	0.79-1.30	สูงสุด 0.035	สูงสุด 0.040

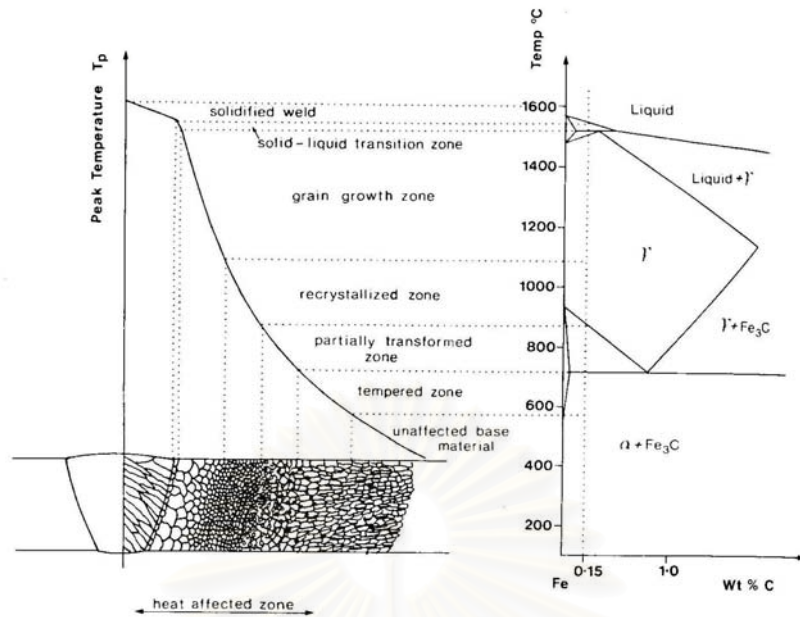
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70<sup>1</sup>

ชนิดของเหล็ก	ความแข็งแรงจุดคราก (N/mm <sup>2</sup> )	ความแข็งแรง (N/mm <sup>2</sup> )	การยืดตัว (%)
ASTM A516 เกรด 70	260	485-625	Min 17

### 2.2 บริเวณกระทบร้อน (Heat – Affected Zone)<sup>2</sup>

เมื่อเชื่อมโลหะ รอยเชื่อมจะได้รับความร้อนจนกระทั่งเกิดการหลอมตัว และเย็นตัวอีกครั้งอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดวัฏจักรความร้อนที่รุนแรงส่งผลให้โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเดิมของโลหะในบริเวณที่ใกล้กับรอยเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะถูกเรียกว่า บริเวณกระทบร้อน (Heat-Affected Zone : HAZ)

บริเวณกระทบร้อนในเหล็กกล้าสามารถแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ ซึ่งแต่ละบริเวณจะมีโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างของเหล็กกล้าคาร์บอน 0.15% โดยน้ำหนักในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนย่อยภายในบริเวณกระทันของเหล็กกล้าคาร์บอน (0.15 %โดยน้ำหนัก) เทียบกับแผนภูมิสมดุล Fe-Fe<sub>3</sub>C<sup>2</sup>

ส่วนย่อยแต่ละส่วนของบริเวณกระทัน สามารถแบ่งได้ตามลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นดังนี้

1. บริเวณที่เกิดการโตขึ้นของเกรน (Grain growth zone) เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุดขณะเชื่อมสูงกว่าอุณหภูมิที่เกรนหยาบขึ้น (Grain coarsening temperature) ซึ่งมีค่าอุณหภูมิประมาณ 1200°C ณ อุณหภูมินี้ อณูภาคคาร์ไบด์ และไนไตรต์เกิดการละลายกลับเข้าสู่เนื้อเหล็ก ทำให้อัตราการโตขึ้นของเกรนออกสเทนไนท์สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยอัตราการโตขึ้นของเกรนขึ้นอยู่กับการให้ความร้อน และเวลาที่อยู่สูงกว่าอุณหภูมิที่เกรนหยาบขึ้น ถ้าอัตราการให้ความร้อน และเวลาที่ให้สูง จะทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น

2. บริเวณที่เกรนละเอียด (Grain refined zone) อุณหภูมิสูงสุดของช่วงนี้มีค่าประมาณ 1200°C โครงสร้างจุลภาคของบริเวณนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $\alpha \rightarrow \gamma$  ในระหว่างการให้ความร้อน เนื่องจากเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงมีไม่เพียงพอ และอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่อณูภาคคาร์ไบด์เกิดการละลายเข้าไปในออกสเทนไนท์อย่างสมบูรณ์ การโตขึ้นของเกรนออกสเทนไนท์จึงถูกขัดขวางโดยอณูภาคคาร์ไบด์ที่ยังไม่ละลาย ทำให้เกรนออกสเทนไนท์มีขนาดเล็ก เมื่อเย็นตัวลงจะมีแนวโน้มเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเกรนออกสเทนไนท์เป็นโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ ที่มีเกรนละเอียด

3. บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงบางส่วน (Partially transformed zone) อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่างเส้น  $Ac_1$  และ  $Ac_3$  ซึ่งในช่วงนี้เฟิร์ลไลต์ที่อยู่ในโลหะพื้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นออสเทนไนต์อย่างรวดเร็ว เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนจาก  $\alpha \rightarrow \gamma$  ต่ำกว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด ทำให้ออสเทนไนต์ที่เกิดมีปริมาณคาร์บอนและแมงกานีสมาก เมื่อเย็นตัวโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนกลับมาจากออสเทนไนต์สามารถเกิดขึ้นได้หลายชนิด เช่น เฟิร์ลไลต์ อีเปอไรเบนไนต์ ออโตเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ หรือ มาร์เทนไซต์ปริมาณคาร์บอนสูง (Twinned) ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว

4. บริเวณที่เกิดการอบคืนตัว (Tempered zone) อยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าเส้น  $Ac_1$  ลงมา ถึงประมาณ  $550^\circ\text{C}$  ซึ่งโครงสร้างจุลภาคจะเปลี่ยนจาก  $\alpha \rightarrow \gamma$  เพียงเล็กน้อย อันเนื่องมาจากการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเด่นชัดคือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากแลมเบลลาลเฟิร์ลไลต์เป็นซีเมนไทต์ที่มีลักษณะกลมขึ้นตามขอบเกรน

## 2.3 การทำนายโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของบริเวณกระทบร้อน<sup>2</sup>

การผลิตเหล็กกล้าให้มีความแข็งแรงสูงมีพื้นฐานสำคัญในการพัฒนา คือ การผลิตให้มีขนาดเกรนเล็กที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ สมบัติที่ประกอบด้วยความแข็งแรง และความแกร่งสูงโดยมีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงจากเหนียวเป็นเปราะต่ำที่พบในเหล็กกล้า วัฏจักรความร้อนการเชื่อมที่รุนแรงเช่น การเชื่อมที่ใช้พลังงานสูงอย่างซับเมอร์ท (Submerged arc) ทำให้ขนาดเกรนใหญ่ขึ้น 10 เท่าหรือมากกว่าในบริเวณที่ใกล้กับแนวรอยเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าที่มีค่า  $C.E \geq 0.4$  บริเวณที่เกิดการโตขึ้นของเกรนจะประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ และปริมาณมาร์เทนไซต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความร้อนที่ลดลง อันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่สูงขึ้น

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่เกิดการโตขึ้นของเกรนในบริเวณกระทบร้อนจะเป็นตัวกำหนดสมบัติของงานเชื่อม การทำนายโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของบริเวณที่เกิดการโตขึ้นของเกรนจำเป็นต้องทราบจำนวนและขนาดของเกรนที่โตขึ้นรวมไปถึงลักษณะวัฏจักรความร้อนการเชื่อมที่เกิด ความกว้างของบริเวณที่เกิดการโตขึ้นของเกรนจะมีความสำคัญต่อการหาความยาวสูงสุดของการแพร่ขยายรอยแตกซึ่งสัมพันธ์กับความแกร่งของการแตกหัก (Fracture toughness) ส่วนวัฏจักรความร้อนการเชื่อมมีความสำคัญในการหาขอบเขตของเกรนที่โตและอัตราการเย็นตัว

โดยทั่วไปมีการทำนายโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลอยู่สองวิธี วิธีแรกทำการเชื่อมจริงชิ้นงานตัวอย่างที่สนใจและทดสอบสมบัติเชิงกลซึ่งจะเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง ส่วนวิธีที่สองเป็นการทำนายโดยใช้การทดลอง เช่น การจำลองการเชื่อมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบ Charpy V-notch, Crack-opening Displacement (COD) หรือใช้แบบจำลองทางทฤษฎี ซึ่งการทำนายโดยวิธีที่สองจะมีความน่าเชื่อถือน้อยกว่าแต่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า

## 2.4 การจำลองการเชื่อม (Weld Simulation)<sup>2</sup>

การจำลองวัฏจักรความร้อนของการเชื่อมในห้องทดลองเป็นประโยชน์อย่างมากต่อข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาค และการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ถึงแม้ว่าตามหลักการสิ่งเหล่านี้จะสามารถศึกษาได้จากงานเชื่อมจริง แต่การจำลองวัฏจักรความร้อนของการเชื่อมจะสามารถปรับควบคุมตัวแปรได้ง่ายกว่า ด้วยเหตุนี้เครื่องจำลองการเชื่อมจึงถูกพัฒนาขึ้นโดยที่เครื่องนี้สามารถสร้างวัฏจักรความร้อนตามต้องการโดยใช้การเหนี่ยวนำกระแสและความต้านทานของชิ้นงานทดสอบในการให้ความร้อน และใช้แก๊สหรือน้ำในการควบคุมอัตราการเย็นตัว การวัดอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด Pt/Pt-13%Rh ที่เชื่อมแบบจุด (Spot Welded) บนผิวชิ้นงาน แล้วแสดงผลเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา นอกจากนี้บางครั้งอาจออกแบบให้เครื่องดึงหรืออัดชิ้นงานไปพร้อมกันขณะที่มีการให้ความร้อน และหล่อเย็นได้ โดยทั่วไปขนาดชิ้นงานที่ทำการจำลองการเชื่อมจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดมาตรฐานของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกเล็กน้อย ทำให้สามารถศึกษาหาค่าความแกร่งได้

ในการศึกษาอัตราการเย็นตัวของงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน หรือเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำ จะใช้ระยะเวลาการเย็นตัวระหว่างอุณหภูมิ 800 ถึง 500°C ( $\Delta t_{8/5}$ ) เป็นตัวแปรเพราะเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค การหาค่า  $\Delta t_{8/5}$  สำหรับงานเชื่อมแต่ละประเภทสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 1 และ 2 ดังต่อไปนี้

$$\Delta t_{8/5} = \frac{q/v}{2\pi\lambda\theta_1} \quad (1)$$

เมื่อ  $q/v$  = อัตราการให้ความร้อนการเชื่อม -  $\text{jm}^{-1}$

$\lambda$  = ค่าการนำความร้อน -  $\text{Jm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}$

$\theta_1$  หาจากสมการ  $\frac{1}{\theta_1} = \frac{1}{773 - T_0} - \frac{1}{1073 - T_0}$  เมื่อ  $T_0 =$  อุณหภูมิเริ่มต้นเชื่อม  
และหาค่าอัตราการใช้ความร้อนการเชื่อม ได้จากสมการที่ 2<sup>2</sup>

$$\frac{q}{v} = \frac{\eta IV}{v} \quad (2)$$

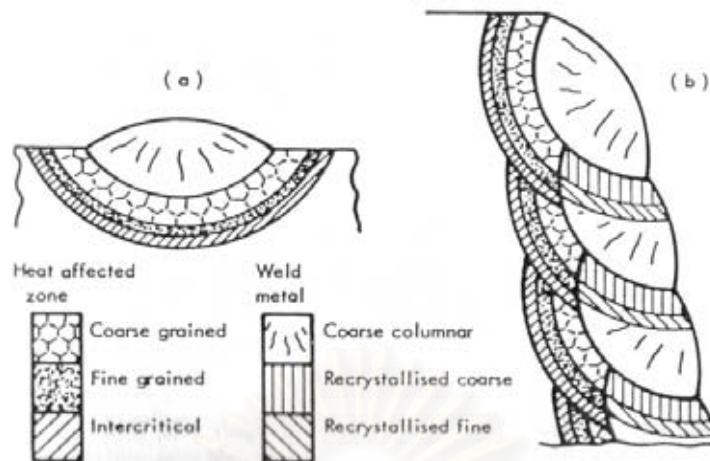
โดย  $\eta$  = ประสิทธิภาพการอาร์ก  
I = กระแส - แอมแปร์  
V = ความต่างศักย์ - โวลท์  
v = ความเร็วการเชื่อม - เมตร/วินาที

## 2.5 การเชื่อมแบบหลายรอย (Multi-run welds)<sup>2,3</sup>

การเชื่อมแบบหลายรอยหรือหลายเที่ยวเชื่อมจะทำให้โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบร้อนละเอียดขึ้น ปรับปรุงความแกร่ง และลดความเค้นตกค้างจากการเชื่อม เมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบรอยเดียวที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน โดยมีสาเหตุมาจาก

1. วัฏจักรความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมแต่ละรอบจะส่งผลทำให้ขนาดของเกรนละเอียดขึ้น หรือเกิดการอบอ่อนอบปกติ (Normalizes) ขึ้นในบริเวณกระทบร้อนจากความร้อนของการเชื่อมครั้งก่อน
  2. พลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบการเชื่อมลดลง ส่งผลทำให้ปริมาณของเกรนที่โตขึ้นลดลง
  3. การเชื่อมในครั้งก่อนเปรียบเสมือนกับการให้ความร้อนก่อน (Preheat) การเชื่อมในรอบต่อไป ทำให้แนวโน้มของค่า  $\Delta t_{8/5}$  ของการเชื่อมครั้งหลังเพิ่มขึ้น
  4. การเชื่อมรอบหลังส่งผลให้ความเค้นตกค้างที่เกิดจากการเชื่อมรอบก่อนลดลง
- การเชื่อมแบบหลายรอยจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของบริเวณกระทบร้อนดังในรูปที่ 2.2





รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคระหว่าง (a) รอยเชื่อมแบบรอยเดียว (b) รอยเชื่อมแบบหลายรอย<sup>2</sup>

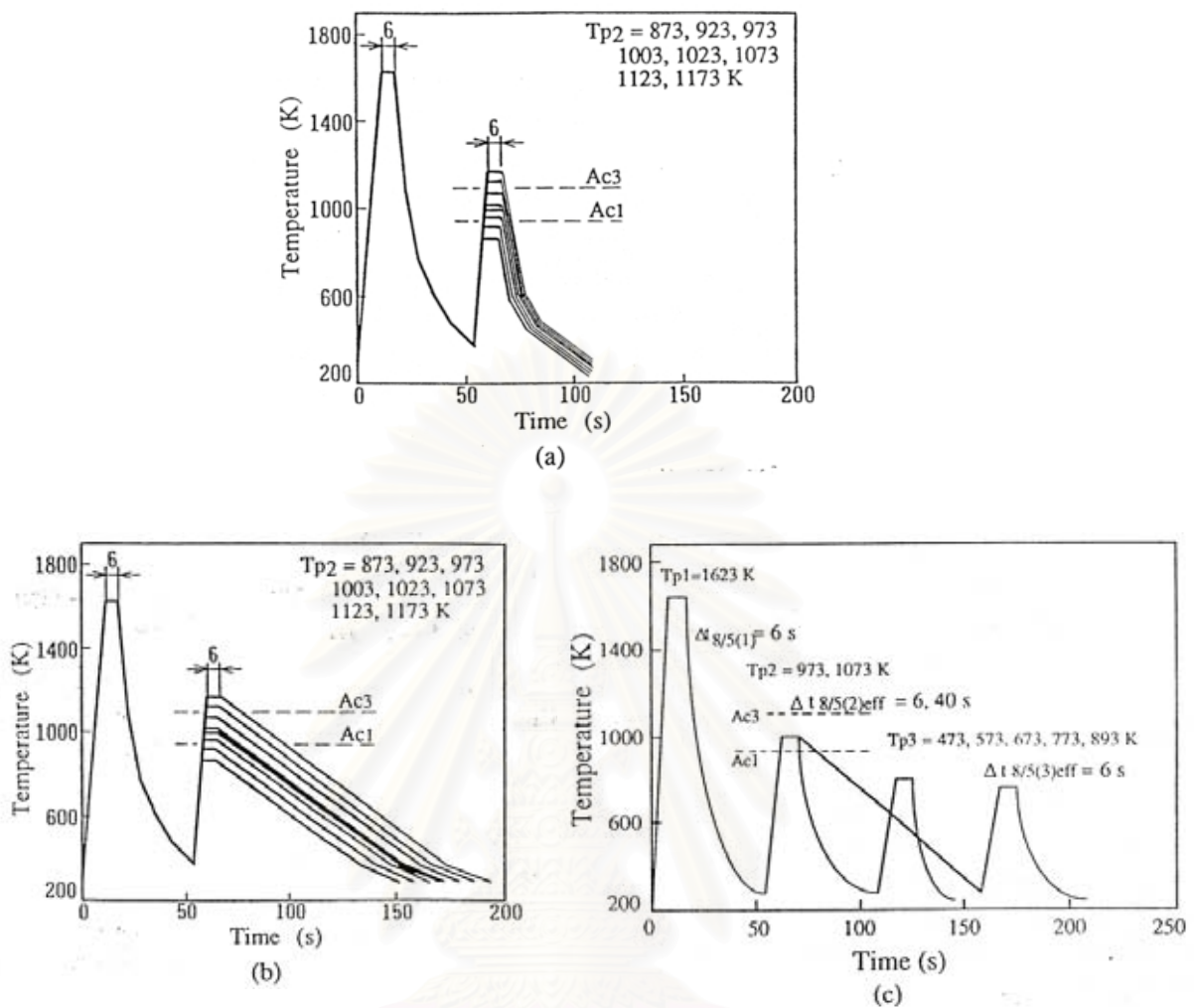
## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kenji Ikeuchi, Jinsun Liao, Hiroki Tanabe, และ Fukuhisa Matsuda<sup>4</sup> ศึกษาผลของ Temper-bead Thermal Cycle ต่อ Toughness ของ Intercritically Reheated Coarse-Grained HAZ ที่เกิดจากการเชื่อม Low Alloy Steel SQV-2A โดยจำลองการเชื่อมเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำ SQV-2A ที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 2.3 และแปรผันค่าอัตราการเย็นตัวของวัฏจักรความร้อนรอบที่สอง โดยใช้  $\Delta t_{8/5}$  เป็น 6 และ 40 วินาที แปรผันอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรความร้อนรอบที่สอง จาก 873 – 1173K และใช้อุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรความร้อนรอบที่สามระหว่าง 473-893 K ดังรูปที่ 2.3 แล้วทดสอบความต้านทานการกระแทกแบบ Charpy V-notch และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า SQV-2A<sup>4</sup>

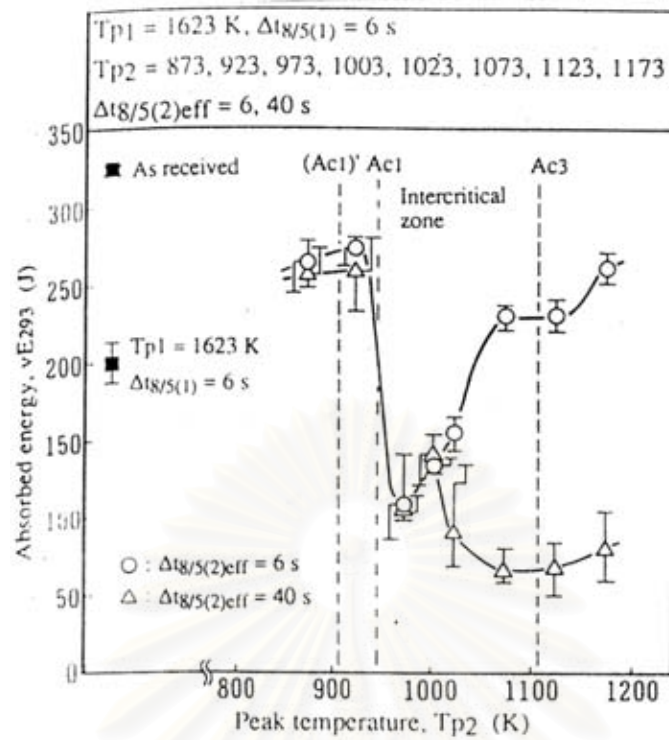
วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
SQV-2A	0.19	0.24	1.48	< 0.01	< 0.01	0.62	0.56



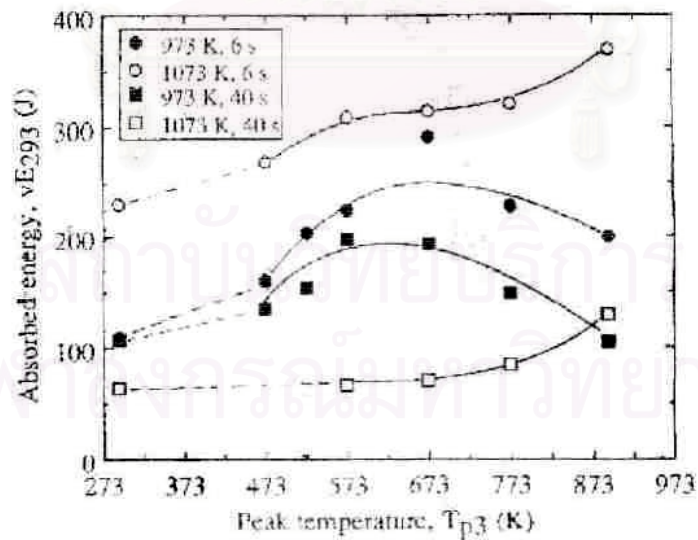


รูปที่ 2.3 กราฟของวัฏจักรความร้อนสำหรับจำลอง Intercritically reheated coarse-grained HAZ (a) และ (b), และที่ใช้ใน Temper-bead thermal cycle (c)<sup>4</sup>

ผลจากการจำลองการเชื่อมพบว่าความแกร่งของเหล็กกล้า SQV-2A จะลดลงในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 973 – 1003 K โดยไม่ขึ้นกับผลของอัตราการเย็นตัว แต่อัตราการเย็นตัวจะมีผลอย่างมากในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 1003 K ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เปรียบเทียบความแกร่งที่เกิดจากการทำ Temper-bead thermal cycle ในรูปที่ 2.5 พบว่าความแกร่งที่เกิดจากการทำ Temper-bead thermal cycle ที่อุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรความร้อนรอบที่สองที่ 973 และ 1073K มีส่วนช่วยในการปรับปรุงความแกร่งของเหล็กกล้า SQV-2A



รูปที่ 2.4 พลังงานที่ถูกดูดซับ (ทดสอบ Charpy impact) ของ Intercritically reheated coarse-grained HAZ และค่าของอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรความร้อนรอบที่สอง ( $T_{p2}$ )

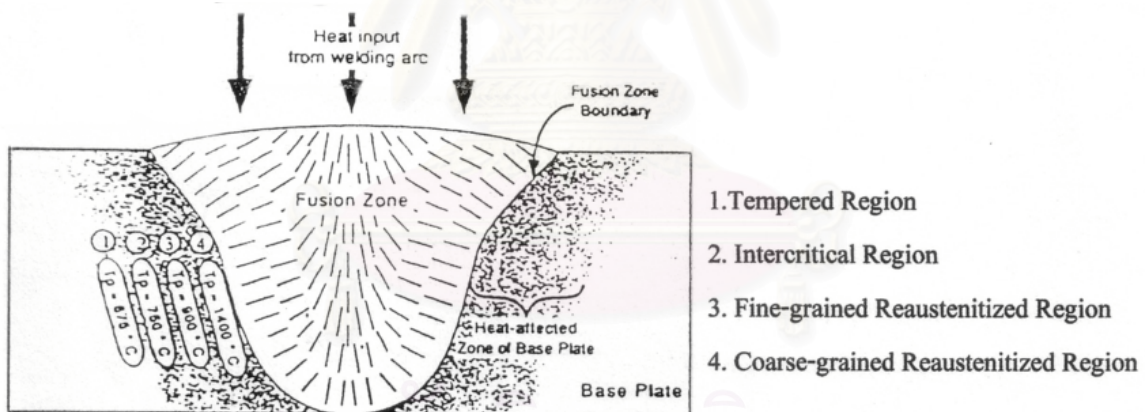


รูปที่ 2.5 พลังงานที่ถูกดูดซับ (ทดสอบ Charpy impact) และค่าของอุณหภูมิสูงสุดของ Temper-bead thermal cycle

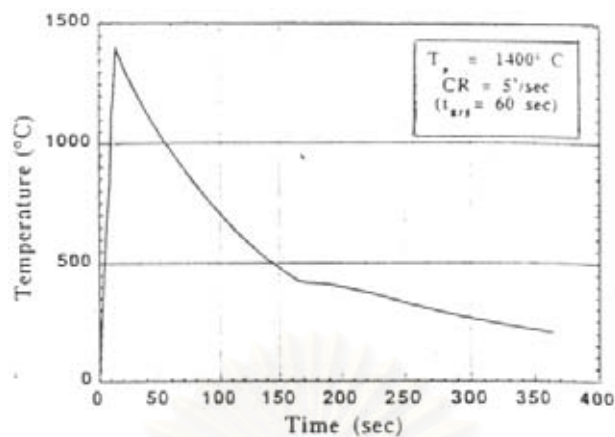
G. Spanos, R.W. Fonda, R.A. Vandermeer และ A. Matuszeski<sup>5</sup> ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนในเหล็กกล้าแรงดึงสูงธาตุผสมต่ำ-100 (HSLA-100) ซึ่งมีส่วนผสมดังตารางที่ 2.4 วิธีการศึกษาใช้วัฏจักรความร้อนจำลองบริเวณกระทบร้อนต่างๆ ดังรูปที่ 2.6 โดยจำลองวัฏจักรความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.7 มีอุณหภูมิสูงสุดเป็น 1400, 900, 750 และ 675°C และใช้อัตราการเย็นตัวเป็น 60°C/s ในกรณีที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ (Low heat input rate) และใช้อัตราการเย็นตัวเป็น 5°C/s ในกรณีที่อัตราการให้ความร้อนสูง (High heat input rate)

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของ HSLA-100 ที่ใช้ในการศึกษาของ G. Spanos และคณะ<sup>5</sup>

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)										
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Nb
HSLA-100	0.07	0.80	0.012	0.004	0.37	1.61	3.49	0.57	0.58	0.023	0.028



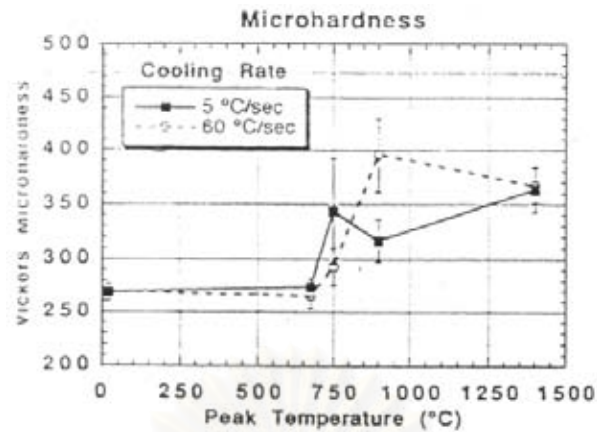
รูปที่ 2.6 บริเวณที่หลอมละลาย และบริเวณกระทบร้อนจากการเชื่อม<sup>5</sup>



รูปที่ 2.7 วัฏจักรความร้อนที่ใช้ในการทดลองของ G. Spanos และคณะ  $T_p = 1400^{\circ}\text{C}$  และอัตราการเย็นตัว  $5^{\circ}\text{C/s}$ <sup>5</sup>

จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิสูงสุด  $675^{\circ}\text{C}$  (Tempered Region) โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ และเฟอร์ไรท์ ที่อุณหภูมิสูงสุดที่  $750^{\circ}\text{C}$  (Intercritical region) โครงสร้างจุลภาคจะเปลี่ยนกลับเป็นออสเตนไนท์บางส่วนเมื่อเย็นตัวจะเกิดเป็นมาร์เทนไซต์ ทำให้ความแข็งสูงขึ้น โดยจำนวนของการเปลี่ยนกลับเป็นออสเตนไนท์จะขึ้นกับอัตราการให้ความร้อนซึ่งจะมีปริมาณมากถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ที่อุณหภูมิสูงสุดที่  $900^{\circ}\text{C}$  (Fine-grained austenitized region) โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วย อีคิวแอก (Equiaxed) และ อซิคูล่าเฟอร์ไรท์ (Acicular ferrite) ในกรณีที่ใช้อัตราการให้ความร้อนสูง (อัตราการเย็นตัวต่ำ,  $5^{\circ}\text{C/s}$ ) และประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ในกรณีที่ใช้อัตราการให้ความร้อนต่ำ (อัตราการเย็นตัวสูง,  $60^{\circ}\text{C/s}$ ) ที่อุณหภูมิสูงสุดที่  $1400^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยแลทมาร์เทนไซต์ (Lath martensite) โดยอาจจะเกิดอซิคูล่า เฟอร์ไรท์ขึ้นได้เล็กน้อยในกรณีที่ใช้อัตราการให้ความร้อนสูง ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าความแข็งแบบไมโคร (Micro hardness) จะพบว่าความแข็งของ HSLA-100 จะเปลี่ยนแปลงดัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 ค่าความแข็งเฉลี่ยแบบไมโครวิคเกอร์ที่อุณหภูมิสูงสุด และอัตราการเย็นตัวต่างๆ<sup>5</sup>

Nazmul Alam, Druce Dunne และ Stuart Edeny<sup>6</sup> ศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างจุลภาค และความแกร่งของบริเวณกระทันร้อนของ เหล็กกล้า Nb-V และเหล็กกล้า Nb-Mo ขนาด 11 x 11 x 110 มม. ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 2.5 จำลองการเชื่อมบริเวณกระทันร้อนด้วยอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรความร้อนรอบที่ 1 และ 2 แสดงในตารางที่ 2.6 และแสดงถึงลักษณะการเชื่อมรอบคู่ในส่วนของบริเวณกระทันร้อนซึ่งใช้จำลอง ดังรูปที่ 2.9

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า Nb-V และ Nb-Mo<sup>6</sup>

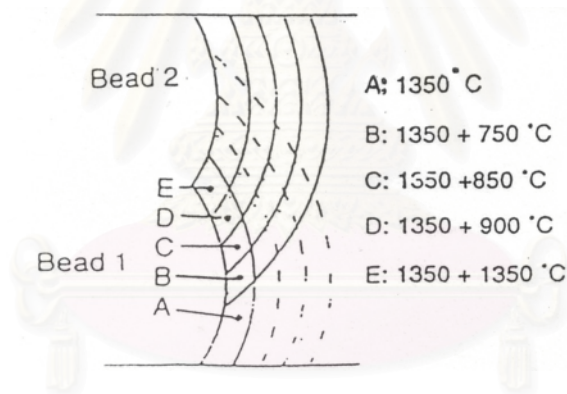
เหล็กกล้า	ส่วนผสมทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)													
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Ti	Nb	V	CE
Nb-V	0.08	1.43	0.25	0.001	0.014	0.096	0.015	0.003	0.18	0.029	0.011	0.036	0.034	0.347
Nb-Mo	0.07	1.62	0.33	0.001	0.019	0.028	0.029	0.22	0.009	0.031	0.013	0.058	0.003	0.393

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.6 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้สำหรับจำลองวัฏจักรความร้อนการเชื่อม<sup>6</sup>

อุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักรเดียว (Single cycle), °C	
เหล็กกล้า Nb-V	เหล็กกล้า Nb-Mo
1315	1330
อุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักรสองครั้ง (Double cycle), °C	
เหล็กกล้า Nb-V	เหล็กกล้า Nb-Mo
1330 + 1330	1330 + 1330
1320 + 1130	1325 + 1120
1300 + 900	1345 + 900
1325 + 850	1350 + 850
1320 + 750	1350 + 750

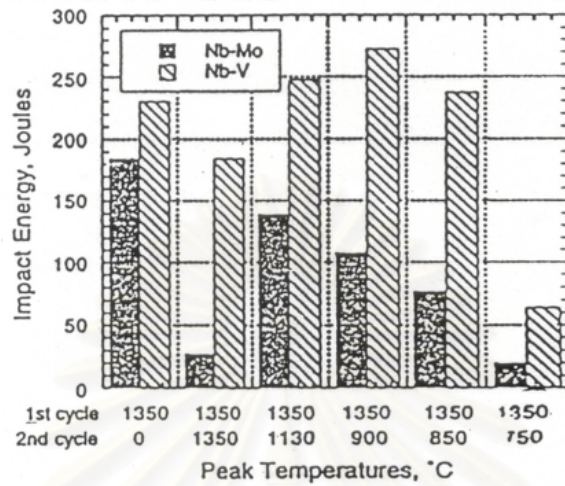


รูปที่ 2.9 บริเวณกระทบร้อนที่ผ่านการเชื่อมสองรอย ซึ่งใช้จำลองในการศึกษาของ Nazmul Alam และคณะ<sup>6</sup>

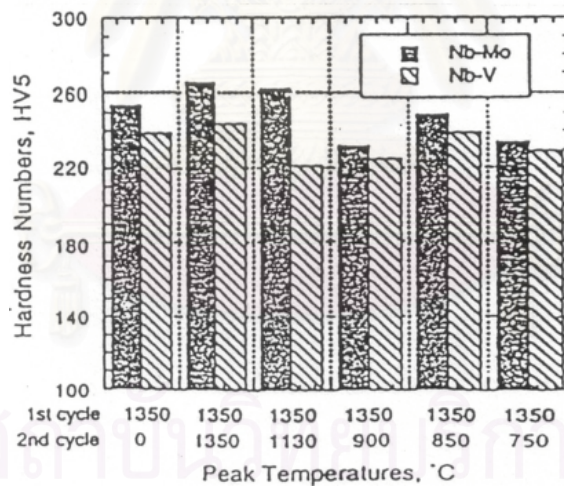
Nazmul Alam และคณะ ทดสอบหาความแกร่งแบบ Charpy V-notch ที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย Optical microscopy และวัดความแข็ง วิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

จากการทดลองพบว่าค่าความแกร่งสูงสุดที่ทดสอบได้จะเกิดขึ้นจากอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรความร้อนรอบที่สองระหว่าง  $850-950^{\circ}\text{C}$  ในเหล็กกล้าทั้งสองชนิด และค่าความแกร่งของ

บริเวณกระทบบร้อนในเหล็กกล้า Nb-Mo จะน้อยกว่าในเหล็กกล้า Nb-V ดังรูปที่ 2.10 แต่ความแข็งของเหล็กกล้า Nb-Mo จะสูงกว่า เหล็กกล้า Nb-V ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ค่าความแกร่งของบริเวณกระทบบร้อนที่จำลอง โดยแปรผันค่าอุณหภูมิสูงสุด<sup>6</sup>



รูปที่ 2.11 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่จำลองบริเวณกระทบบร้อนโดยแปรผันอุณหภูมิสูงสุด<sup>6</sup>



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมการทดลอง

##### 3.1.1 อุปกรณ์

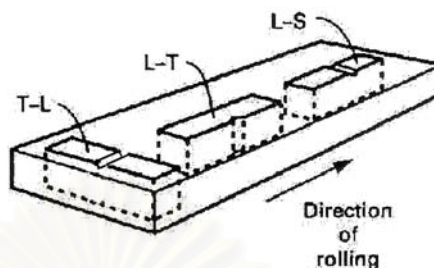
- 1) อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการเชื่อม
  - 1.1) เครื่องจำลองการเชื่อม (Welding Simulator) ทำหน้าที่ให้ความร้อน และควบคุมอัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน
  - 1.2) เครื่องเชื่อมเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Welding) ทำหน้าที่เชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลกับชิ้นงาน เพื่อวัดอุณหภูมิขณะจำลองการเชื่อม
  - 1.3) พล็อตเตอร์ (Plotter) ทำหน้าที่แสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับเวลาที่เกิดขึ้นขณะจำลองการเชื่อม
- 2) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล
  - 2.1) เครื่องทดสอบความแกร่ง
  - 2.2) เครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล

##### 3.1.2 การเตรียมชิ้นงานทดลอง

เหล็กแผ่น ASTM A516 เกรด 70 ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดความหนา 13.1 mm กว้าง 130 mm ยาว 600 mm โดยเตรียมชิ้นงานทดลองดังขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) ตัดแผ่นเหล็กเป็นชิ้นงานย่อยขนาด 13x13 mm ยาว 120 mm โดยตัดตามทิศ L-S (จากรูปที่ 3.1) สำหรับชิ้นงานขนานแนวการรีด และตามทิศ T-L สำหรับชิ้นงานตั้งฉากแนวการรีด
- 2) เตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบ จนชิ้นงานมีหน้าตัด 12.5x12.5 mm ด้วยเครื่องมือลิ้ง
- 3) ตัดชิ้นงานแบ่งเป็นขนาด 12.5x12.5 mm ยาว 60 mm เจาะรูหัวท้ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm
- 4) วัดค่าความแกร่ง และความแข็งแบบรีอคเวลของชิ้นงาน ในสภาพก่อนจำลองการเชื่อม

5) ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Emission spectrometer และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานก่อนจำลองการเชื่อม



รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบขนาดแนวการรีด และตั้งฉากแนวการรีดที่ใช้ในการจำลองการเชื่อม

### 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.2.1 ขั้นตอนการจำลองการเชื่อม

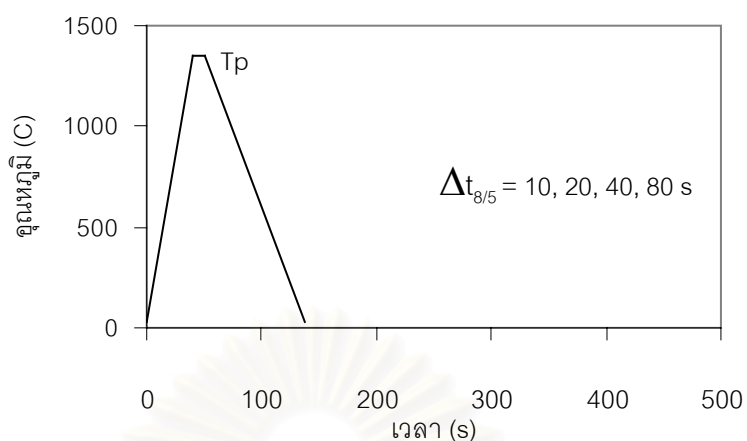
3.2.1.1 การทดลองที่ 1 จำลองการเชื่อมแบบรอบเดียว สำหรับชิ้นงานขนาดและตั้งฉากแนวการรีด

1) จำลองการเชื่อมชิ้นงานทดสอบทั้งขนาดและตั้งฉากแนวการรีด ตามวัฏจักรความร้อนดังรูปที่ 3.2 อัตราการให้ความร้อน  $34^{\circ}\text{C/s}$  อุณหภูมิสูงสุด  $1350^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 วินาที เวลาการเย็นตัว ( $\Delta t_{8/5}$ ) 10 วินาที

2) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1  $\Delta t_{8/5}$  เปลี่ยน เป็น 20 ,40 ,80 วินาที จำนวนชิ้นงานที่ใช้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนชิ้นงาน ที่สภาวะจำลองการเชื่อมสำหรับศึกษาผลของรอบการเชื่อมเดียวที่อุณหภูมิสูงสุด  $1350^{\circ}\text{C}$

ทิศทางการขึ้นงาน ทดสอบ	เวลาเย็นตัว $\Delta t_{8/5}$ (วินาที)			
	10	20	40	80
ขนาดแนวการรีด	3	3	3	3
ตั้งฉากแนวการรีด	3	3	3	3



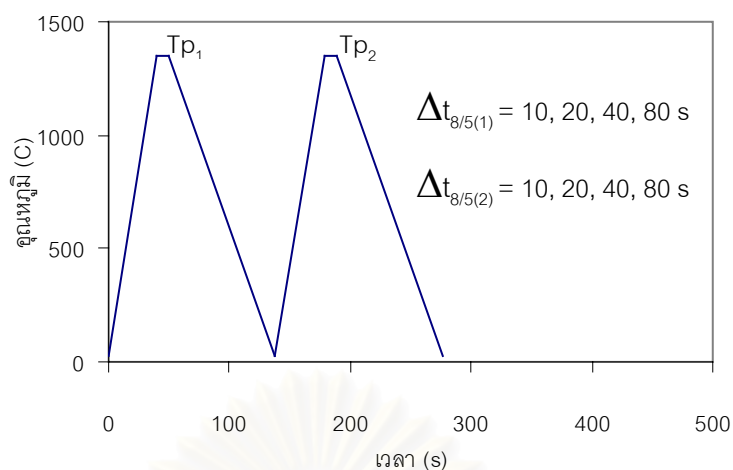
รูปที่ 3.2 ลักษณะวัฏจักรความร้อนที่ใช้ในการจำลองการเชื่อมรอบเดียว สำหรับชิ้นงานขนานและตั้งฉากแนวการรีด

### 3.2.1.2 การทดลองที่ 2 จำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนานแนวการรีด โดยแปรผันเวลาการเย็นตัวทั้งสองรอบ

จำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ โดยแปรผันเวลาการเย็นตัวรอบแรกและรอบที่สอง หาเวลาการเย็นตัวรอบแรก ที่ให้ค่าความแกร่งของชิ้นงานต่ำสุด เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

1) จำลองการเชื่อม ตามวัฏจักรความร้อนงานเชื่อม ดังรูปที่ 3.3 อัตราการให้ความร้อน  $34^{\circ}\text{C/s}$  อุณหภูมิสูงสุดรอบแรก  $1350^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 วินาที เวลาการเย็นตัวรอบแรก ( $\Delta t_{8/5(1)}$ ) 10 วินาที จนถึงอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ให้ความร้อนอีกครั้งด้วยอัตรา  $34^{\circ}\text{C/s}$  อุณหภูมิสูงสุดรอบสอง  $1350^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 วินาที เวลาการเย็นตัวรอบสอง ( $\Delta t_{8/5(2)}$ ) 10, 20, 40 และ 80 วินาที จนถึงอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$

2) จำลองการเชื่อมซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 โดยเปลี่ยนเวลาในการเย็นตัวรอบแรก ( $\Delta t_{8/5(1)}$ ) เป็น 20, 40 และ 80 วินาที จำนวนชิ้นงานในการทดลองดังตารางที่ 3.2



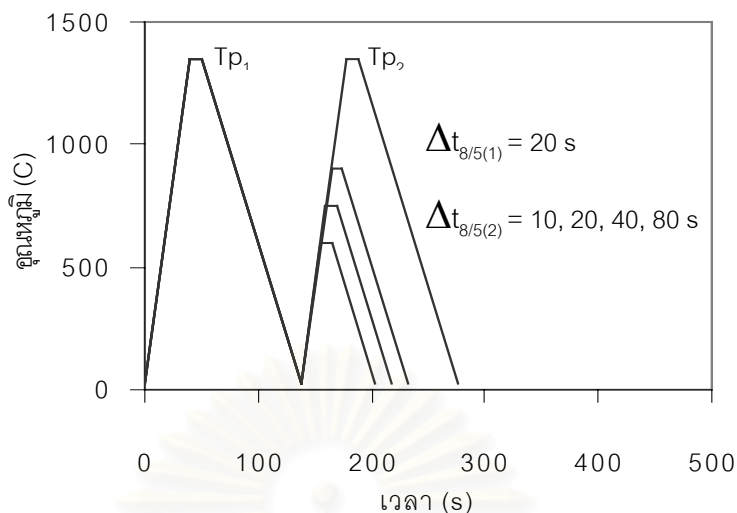
รูปที่ 3.3 ลักษณะวัฏจักรความร้อนที่ใช้ในการจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับขึ้นงานขนานการรีด โดยแปรผันอัตราการเย็นตัวทั้งสองรอบ

ตารางที่ 3.2 จำนวนขึ้นงาน ที่สภาวะจำลองการเชื่อมต่างๆ สำหรับศึกษาผลของรอบการเชื่อมคู่ สำหรับขึ้นงานขนานแนวการรีด แปรผันเวลาการเย็นตัวทั้งสองรอบ โดย  $T_{p_1} = T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$

$\Delta t_{8/5(1)}$ (s)	$\Delta t_{8/5(2)}$ (s)			
	10	20	40	80
10	3	3	3	3
20	3	3	3	3
40	3	3	3	3
80	3	3	3	3

### 3.1.2.3 การทดลองที่ 3 จำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ สำหรับขึ้นงานขนานแนวการรีด แปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง

จำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ โดยแปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง ใช้  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  s ที่ได้จากการทดลองที่ 2 และหาอุณหภูมิที่ให้ความแกร่งสูงสุดและต่ำสุด เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.4 ลักษณะวัฏจักรความร้อนที่ใช้ในการจำลองการเชื่อมรอบคู้ สำหรับชิ้นงานขนานการรีด โดยแปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง

1) จำลองการเชื่อม ตามวัฏจักรความร้อนงานเชื่อม ดังรูปที่ 3.4 อัตราการให้ความร้อน  $34^{\circ}\text{C/s}$  อุณหภูมิสูงสุดรอบแรก  $1350^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 วินาที เวลาการเย็นตัวรอบแรก ( $\Delta t_{8/5(1)}$ ) 20 วินาที จนถึงอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ให้ความร้อนอีกครั้งด้วยอัตรา  $34^{\circ}\text{C/s}$  อุณหภูมิสูงสุดรอบสอง  $1350^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 วินาที เวลาการเย็นตัวรอบสอง ( $\Delta t_{8/5(2)}$ ) 10, 20, 40 และ 80 วินาที จนถึงอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$

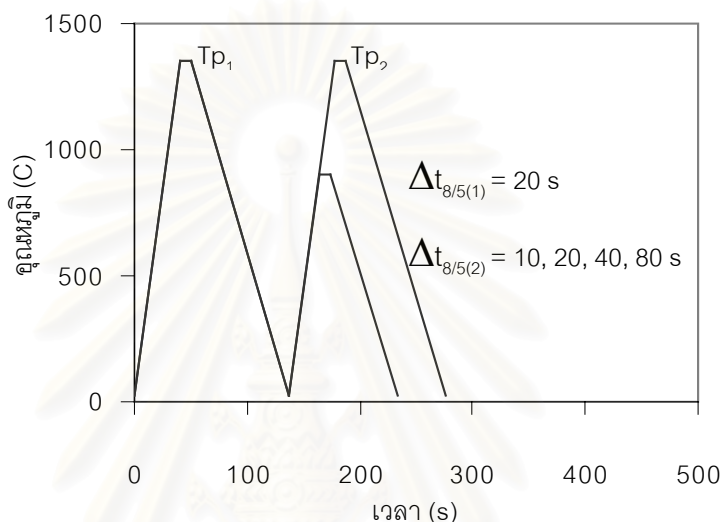
2) จำลองการเชื่อมซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 เปลี่ยนอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง ( $T_{p2}$ ) เป็น 900, 750 และ  $600^{\circ}\text{C}$  จำนวนชิ้นงานในการทดลองดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 จำนวนชิ้นงาน ที่สภาวะจำลองการเชื่อมสำหรับศึกษาผลของรอบการเชื่อมคู่ แปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง โดย  $T_{p1} = 1350^{\circ}\text{C}$  และ  $\Delta t_{8/5(1)} = 20\text{ s}$

$\Delta t_{8/5(2)}$ (s)	$T_{p2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	1350	900	750	600
10	3	3	3	3
20	3	3	3	3
40	3	3	3	3
80	3	3	3	3

3.1.2.4 การทดลองที่ 4 จำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ ชี้นงานตั้งฉากแนวการรีด โดยเลือกอุณหภูมิสูงสุดรอบสองที่ให้ค่าความแกร่งสูงสุด และต่ำสุดจากการทดลองที่ 3

จำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ โดยใช้อุณหภูมิสูงสุดรอบสองที่ 1350 และ 900°C ที่ได้จากทดลองที่ 3



รูปที่ 3.5 ลักษณะวัฏจักรความร้อนที่ใช้ในการจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชี้นงานตั้งฉากแนวการรีด โดยใช้อุณหภูมิสูงสุดรอบสองที่ 1350 และ 900°C

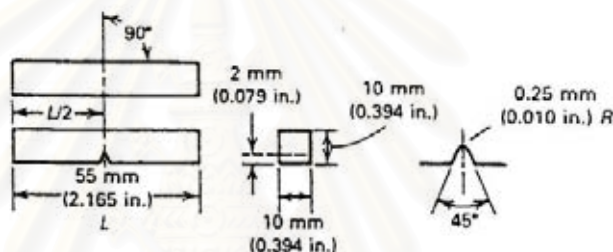
1) จำลองการเชื่อม ตามวัฏจักรความร้อนงานเชื่อม ดังรูปที่ 3.5 อัตราการให้ความร้อน 34°C/s อุณหภูมิสูงสุดรอบแรก 1350°C เป็นเวลา 10 วินาที เวลาการเย็นตัวรอบแรก ( $\Delta t_{8/5(1)}$ ) 20 วินาที จนถึงอุณหภูมิ 25°C ให้ความร้อนอีกครั้งด้วยอัตรา 34°C/s อุณหภูมิสูงสุดรอบสอง 1350°C เป็นเวลา 10 วินาที เวลาการเย็นตัวรอบสอง ( $\Delta t_{8/5(2)}$ ) 10, 20, 40 และ 80 วินาที จนถึงอุณหภูมิ 25°C

2) จำลองการเชื่อมซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 เปลี่ยนอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง ( $T_{p2}$ ) เป็น 900°C จำนวนชี้นงานในการทดลองดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.4 จำนวนชิ้นงาน และสภาพการจำลองการเชื่อมสำหรับศึกษาผลของรอบการเชื่อมคู่  
ชิ้นงานทดสอบตั้งฉากการรีด โดย  $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$  และ  $\Delta t_{8/5(1)} = 20 \text{ s}$

$T_{p_2} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta t_{8/5(2)} (\text{s})$			
	10	20	40	80
1350	3	3	3	3
900	3	3	3	3

### 3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบความแกร่ง



หมายเหตุ - ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

แนวรอยบากเทียบกับขอบ	$90 \pm 2^{\circ}$
องศาของด้านที่ติดกัน	$90^{\circ} \pm 10 \text{ min}$
ขนาดหน้าตัด	$\pm 0.075 \text{ mm} (\pm 0.003 \text{ in.})$
ความยาวชิ้นงาน(L)	$+0, -2.5 \text{ mm} (+0, -0.100 \text{ in.})$
ตำแหน่งรอยบาก(L/2)	$\pm 1 \text{ mm} (\pm 0.039 \text{ in.})$
มุมรอยบาก	$\pm 1^{\circ}$
รัศมีรอยบาก	$\pm 0.025 \text{ mm} (\pm 0.001 \text{ in.})$
ความลึกรอยบาก	$\pm 0.025 \text{ mm} (\pm 0.003 \text{ in.})$
ความเรียบผิว	$2 \mu\text{m} (63 \mu\text{in.})$ สำหรับด้านที่มีรอยบากและด้านตรงข้าม ; $4 \mu\text{m} (125 \mu\text{in.})$ สำหรับสองด้านที่เหลือ

รูปที่ 3.6 ชิ้นงานทดสอบความแกร่งแบบ Charpy ตามมาตรฐาน ASTM E23 – 96

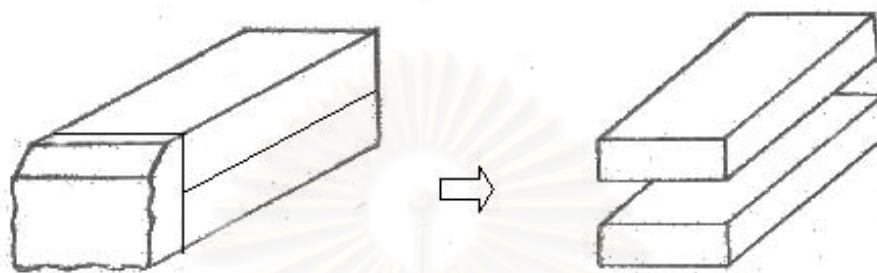
1) นำชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการเชื่อมไปทำการเตรียมทดสอบความแกร่ง ให้ได้ขนาดตามมาตรฐานการทดสอบความแกร่ง ASTM E23 – 96 ดังรูปที่ 3.6

2) นำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมทดสอบความแกร่ง ไปทดสอบความแกร่งที่  $25^{\circ}\text{C}$  บันทึกค่าพลังงานที่ดูดซับ



### 3.2.3 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

1) นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความแกร่ง ไปตัดผิวรอยแตกออก ตัดตามยาวออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กันขนานกับด้านที่รับแรงกระทำ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะการตัดชิ้นงานเพื่อทดสอบโครงสร้างจุลภาค

- 2) ขัดผิวรอยตัดกระดาศทรายเบอร์ 220, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200
- 3) ขัดผิวด้วยผงอลูมินา แล้วกัดด้วยสารละลายไนตริก 2 %
- 4) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ บันทึกรูปภาพไว้

### 3.2.4 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ไปทำการวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบรีอคเวล โดยใช้สเกล C ใช้เวลาการกดวัดความแข็ง 20 วินาที จำนวน 5 จุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย

### 4.1 สมบัติและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70

#### 4.1.1 ส่วนผสมทางเคมี

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ด้วยเครื่อง Emission spectrometer ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70

วัสดุ	ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)						
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr
ASTM A516 เกรด 70	0.2477	0.2674	1.1019	0.0047	0.0123	0.0193	0.0198
	Mo	V	Ti	Cu	Al	Sn	As
	0.0002	0.0007	0.0033	0.0184	0.0369	0.0013	0.0041

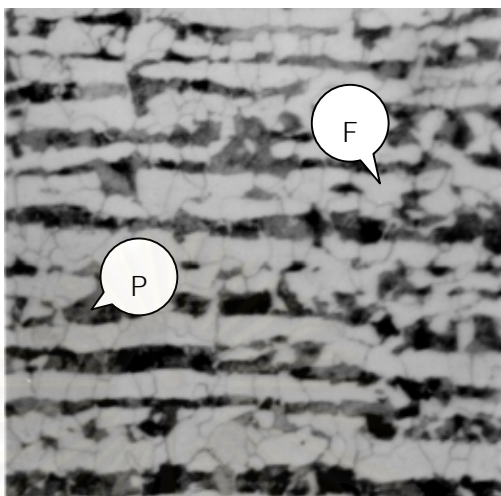
#### 4.1.2 ความแกร่งและความแข็ง

ตารางที่ 4.2 ความแกร่งและความแข็งของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70

วัสดุ	ความแกร่งที่ 25°C (J)		ความแข็ง (HRC)
	ขนานแนวการรีด	ตั้งฉากแนวการรีด	
ASTM A516 เกรด70	155	111	21

ความแกร่งของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70 ที่ผ่านการรีดร้อน พบว่าความแกร่งของชิ้นงานทดสอบขนานแนวการรีดจะมากกว่าชิ้นงานทดสอบตั้งฉากแนวการรีด เป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลท์วางตัวตามแนวการรีดร้อนขัดขวางทางเดินของรอยแตก ส่วนชิ้นงานวางตัวตามแนวตั้งฉากการรีดร้อน ไม่ขัดขวางทางเดินของรอยแตก รูปที่ 4.1 เป็นโครงสร้างจุลภาคที่สังเกตตั้งฉากแนวการรีด

#### 4.1.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70 ที่ผ่านการรีดร้อน พิจารณาตั้งฉากแนวการรีดร้อน กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.1 พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการรีดร้อน ประกอบด้วยเฟอไรต์ และเพิร์ลไลต์ เรียงตัวขนานไปตามทิศทางการรีด ซึ่งลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ความแกร่งของชิ้นงานทดสอบขนานแนวการรีดสูงกว่าชิ้นงานทดสอบที่ตั้งฉากแนวการรีด

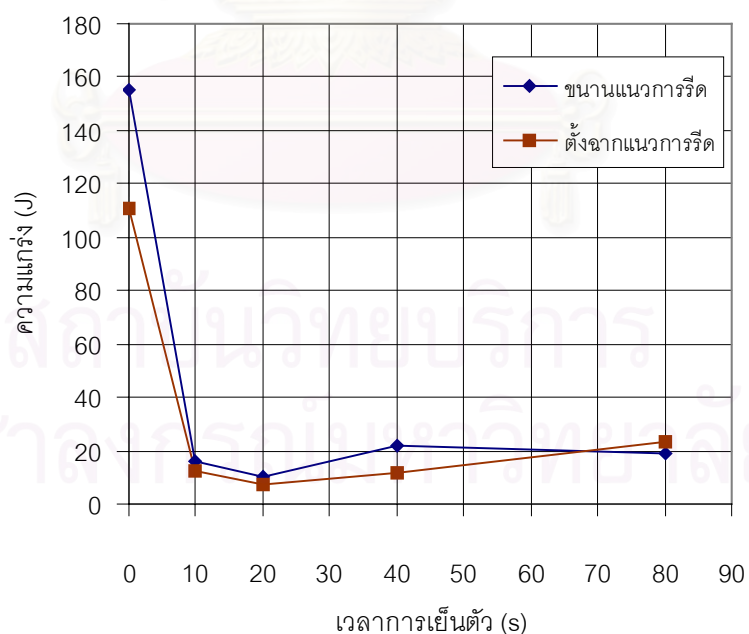
#### 4.2 ผลการจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียว สำหรับชิ้นงานทดสอบขนานและตั้งฉากแนวการรีด

การทดลองนี้ศึกษาผลของรอบการเชื่อมเดียว โดย  $T_p = 1350^{\circ}\text{C}$  และแปรผัน  $\Delta t_{8/5}$  ที่ 10, 20, 40 และ 80 วินาที และเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบร้อนสามารถพบได้มากมาย เพื่อความสะดวกจึงขอใช้อักษรย่อดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อักษรย่อของโครงสร้างจุลภาคที่พบในบริเวณกระทบบร้อน

สัญลักษณ์ที่ใช้	ความหมายของโครงสร้างจุลภาค
GF	Grain boundary ferrite
AF	Acicular ferrite
PF	Polygonal ferrite
FS	Ferrite with aligned secondary phase
P	Lamellar pearlite
B	Bainite
M	Martensite
A	Austenite
WF	Widmanstatten pattern

#### 4.2.1 ความแกร่งหลังจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียว สำหรับชิ้นงานทดสอบขนาดและตั้งฉากแนวกรรรีด

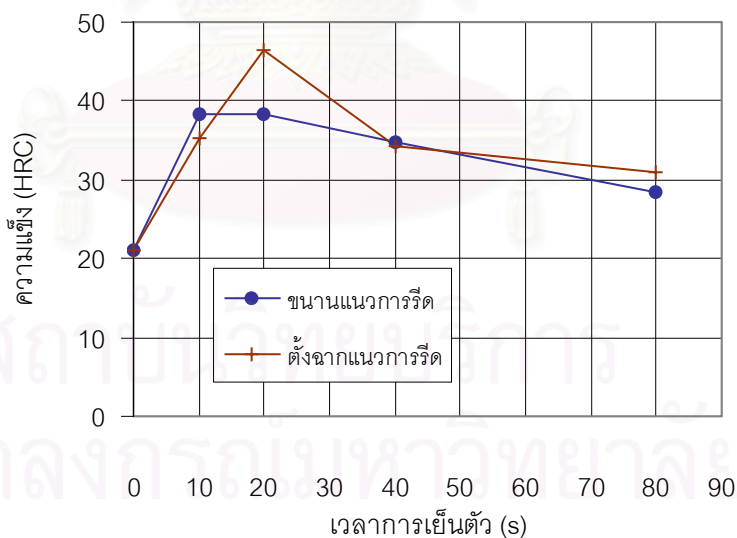


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25 °C กับเวลาการเย็นตัว ที่ผ่านกรจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียวที่อุณหภูมิสูงสุด 1350°C

จากรูปที่ 4.2 พบว่าความแรงแห่งชิ้นงานทดสอบทั้งสองทิศทาง จะมีค่าอยู่ในช่วง 7-24 J ความแรงแห่งชิ้นงานทดสอบทั้งขนานและตั้งฉากแนวการรีดมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย และความแรงแห่งที่ได้จากการจำลองการเชื่อมมีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับความแรงแห่งชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อน อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดการโตขึ้นของเกรน

สาเหตุที่ค่าความแรงแห่งลดลงหลังจำลองการเชื่อมรอบเดียว สามารถอธิบายจากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่มีทิศทางขนานการรีดดังรูปที่ 4.4 เมื่อ  $\Delta t_{8/5} = 10$  s โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วย M โดยมี FS เกิดขึ้นเล็กน้อย เมื่อ  $\Delta t_{8/5} = 20$  s โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็น M และมี FS เล็กน้อย โดยจะเริ่มเกิด GF ขึ้นที่ขอบเกรนออกสเทนไนต์เดิม เมื่อ  $\Delta t_{8/5} = 40$  s เริ่มเกิด AF ขึ้นภายในเกรนออกสเทนไนต์เดิม และ M ที่เกิดขึ้นลดลง เริ่มเกิด GF มากขึ้น และเมื่อ  $\Delta t_{8/5} = 80$  s โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย AF และ GF และมี P เกิดขึ้น การที่ความแรงแห่งเมื่อ  $\Delta t_{8/5} = 80$  s ไม่แตกต่างจากความแรงแห่งในช่วง  $\Delta t_{8/5} = 10-40$  s ที่มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย M และ FS ที่มีความแรงแห่งต่ำ เป็นผลมาจาก GF ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเน็ตเวิร์ค

#### 4.2.2 ความแข็งแรงหลังจำลองการเชื่อมรอบเดียว สำหรับชิ้นงานขนานและตั้งฉากแนวการรีด



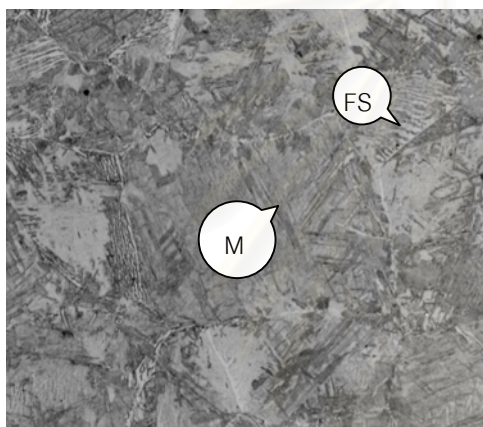
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง กับเวลาการเย็นตัว ของชิ้นงานทดสอบหลังการจำลองการเชื่อมรอบเดียว ที่อุณหภูมิสูงสุด  $1350^{\circ}\text{C}$



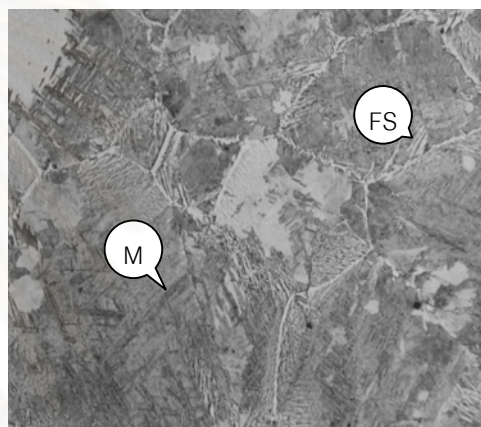
จากรูปที่ 4.3 พบว่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบทั้งในทิศทางขนานการรีด และตั้งฉากการรีด มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน พบว่าช่วง  $\Delta t_{8/5} = 10-20$  s มีปริมาณ M เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการเย็นตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ความแข็งสูงขึ้น และช่วง  $\Delta t_{8/5} = 20-80$  s ความแข็งจะลดลง เพราะเกิดโครงสร้างจุลภาค AF และ GF เพิ่มขึ้นเมื่อ  $\Delta t_{8/5}$  สูงขึ้น

#### 4.2.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคภายหลังจำลองเชื่อมรอบเดียว

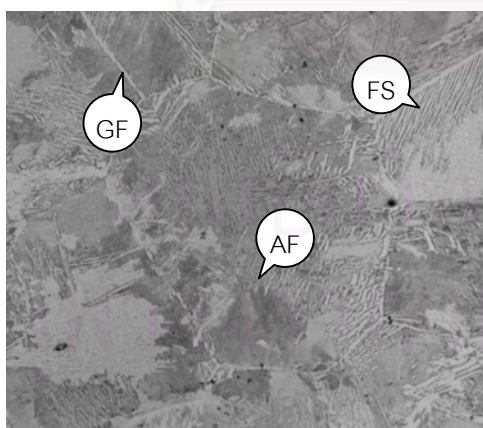
สำหรับการเชื่อมแบบรอบเดียวขอยกตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของรอบการเชื่อมเดียวที่อุณหภูมิสูงสุดที่  $1350^{\circ}\text{C}$  ของชิ้นงานทดสอบที่มีทิศทางขนานการรีด



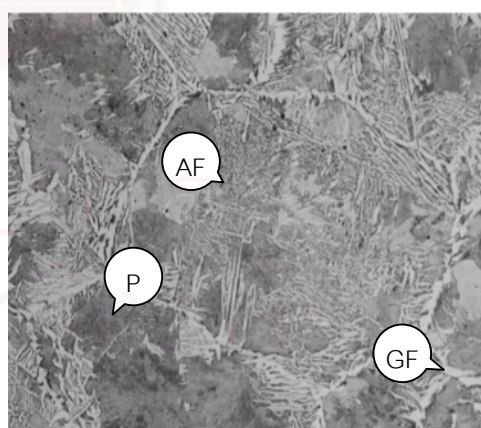
ก)  $\Delta t_{8/5} = 10$  s, x200



ข)  $\Delta t_{8/5} = 20$  s, x200



ค)  $\Delta t_{8/5} = 40$  s, x200



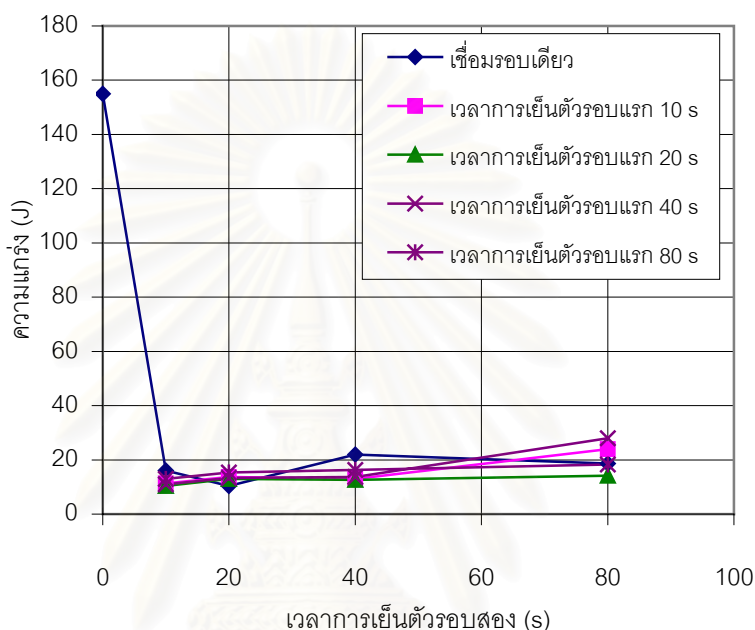
ง)  $\Delta t_{8/5} = 80$  s, x200

รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ที่ผ่านการจำลองการเชื่อมรอบเดียว ที่อุณหภูมิสูงสุด  $1350^{\circ}\text{C}$



### 4.3 ผลการจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนานแนวการรีด แปรผันเวลาการเย็นตัว

#### 4.3.1 ความแกร่งหลังจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนานการรีด แปรผันเวลาการเย็นตัว



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่ 25 °C กับเวลาการเย็นตัวในรอบสอง

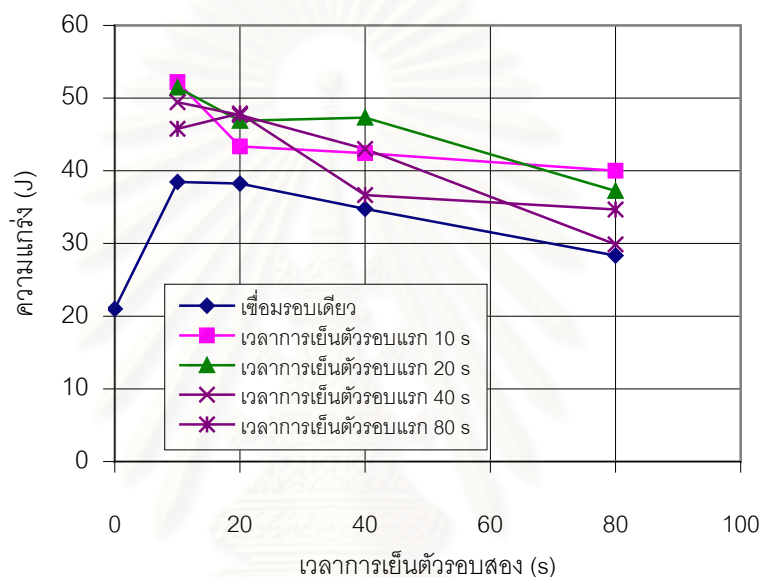
$$\text{โดย } T_{p_1} = T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$$

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่ง กับเวลาการเย็นตัวรอบสองของชิ้นงานทดสอบที่ใช้เวลาการเย็นตัวรอบแรก 10, 20, 40 และ 80 วินาที มีความแกร่งหลังจำลองการเชื่อมหลังจำลองการเชื่อมใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาการเย็นตัวรอบสองสูงขึ้นพบว่าความแกร่งค่อนข้างคงที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด และความแกร่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแกร่งหลังจากการจำลองการเชื่อมรอบเดียว

เนื่องจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความแกร่งในทุก  $\Delta t_{8/5(1)}$  เกิดขึ้นลักษณะเดียวกัน จึงขอเลือกโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นเมื่อ  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  s มาอธิบายสาเหตุที่ความแกร่งไม่เปลี่ยนแปลงจากกรณีที่ทำการจำลองการเชื่อมรอบเดียว จากรูปที่ 4.7 พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่พบมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างจุลภาคหลังจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียวคือ เมื่อ  $\Delta t_{8/5(2)} = 10-40$  s โครงสร้าง

จุลภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วย M โดยมี FS เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการเย็นตัวรอบสองเพิ่มขึ้น และเมื่อ  $\Delta t_{8/5(2)} = 80$  s โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็น AF, GF และ FS โดย GF ที่พบมีลักษณะเป็นเน็ตเวิร์ค

#### 4.3.2 ความแข็งหลังจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขนานการรีด แปรผันเวลาการเย็นตัว

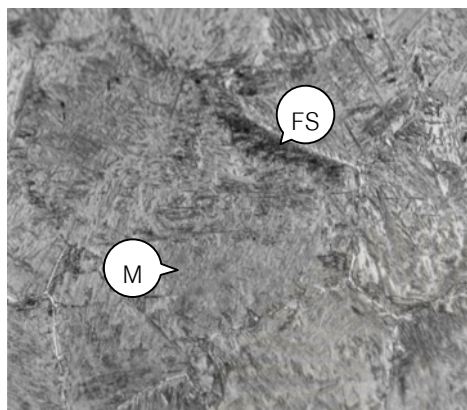


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง กับเวลาการเย็นตัวรอบสอง

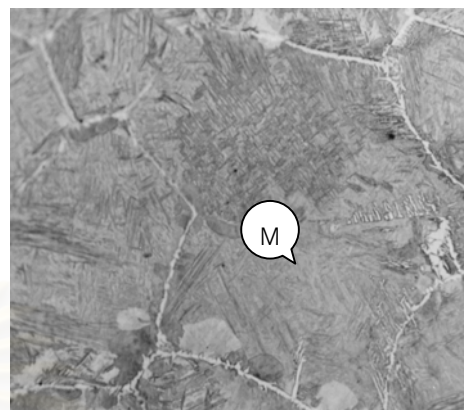
โดย  $T_{p_1} = T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งในทุกเวลาการเย็นตัวรอบแรก มีค่าสูงกว่าความแข็งหลังการจำลองการเชื่อมรอบเดียว และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการเย็นตัวรอบสองเพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจากปริมาณของ M ที่มีความแข็งสูงลดลงในขณะที่เกิดโครงสร้างจุลภาคที่มีความแข็งต่ำอันได้แก่ AF และ GF เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการเย็นตัวรอบสองเพิ่มขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 4.7)

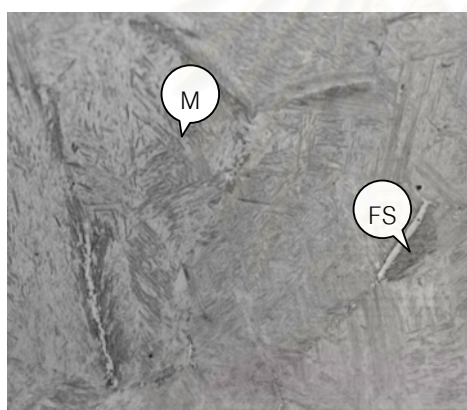
### 4.3.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการเชื่อมรอบคู้ ขึ้นงานขนานแนวการรีด แปรรผันเวลาการเย็นตัว



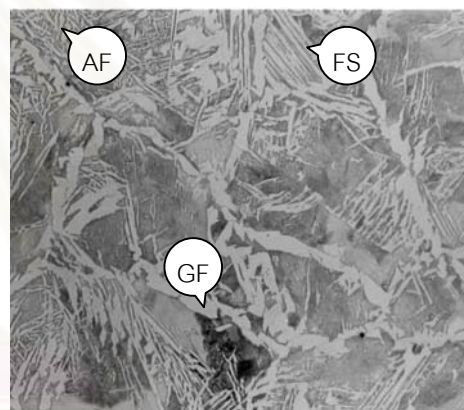
ก)  $\Delta t_{8/5(2)} = 10 \text{ s, x200}$



ข)  $\Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s, x200}$



ค)  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 \text{ s, x200}$



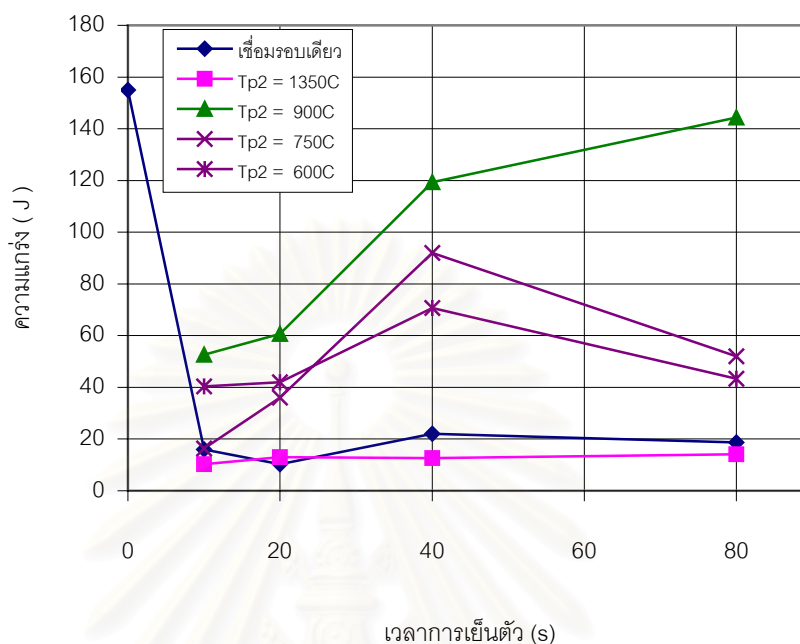
ง)  $\Delta t_{8/5(2)} = 80 \text{ s, x200}$

รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ที่ผ่านการจำลองการเชื่อมรอบคู้ โดย  $T_{p1} = T_{p2} = 1350^{\circ}\text{C}$  และ  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  วินาที

### 4.4 ผลการจำลองการเชื่อมรอบคู้ สำหรับขึ้นงานขนานแนวการรีด แปรรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง

ศึกษาผลการจำลองการเชื่อมของขึ้นงานทดสอบวางตัวในทิศทางขนานแนวการรีด โดยแปรรผัน  $T_{p2}$  ที่ 1350, 900, 750 และ  $600^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{p1} = 1350^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  วินาที

#### 4.4.1 ความแกร่งหลังจำลองการเชื่อมรอบคู้ สำหรับชิ้นงานขนานแนวการรีด แปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่  $25^{\circ}\text{C}$  กับเวลาการเย็นตัวรอบสอง แปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง โดย  $T_{p1} = 1350^{\circ}\text{C}$  และ  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  วินาที

จากรูปที่ 4.8 พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความแกร่งที่เกิดขึ้นในทุกอุณหภูมิสูงสุดรอบสองจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะพบว่า

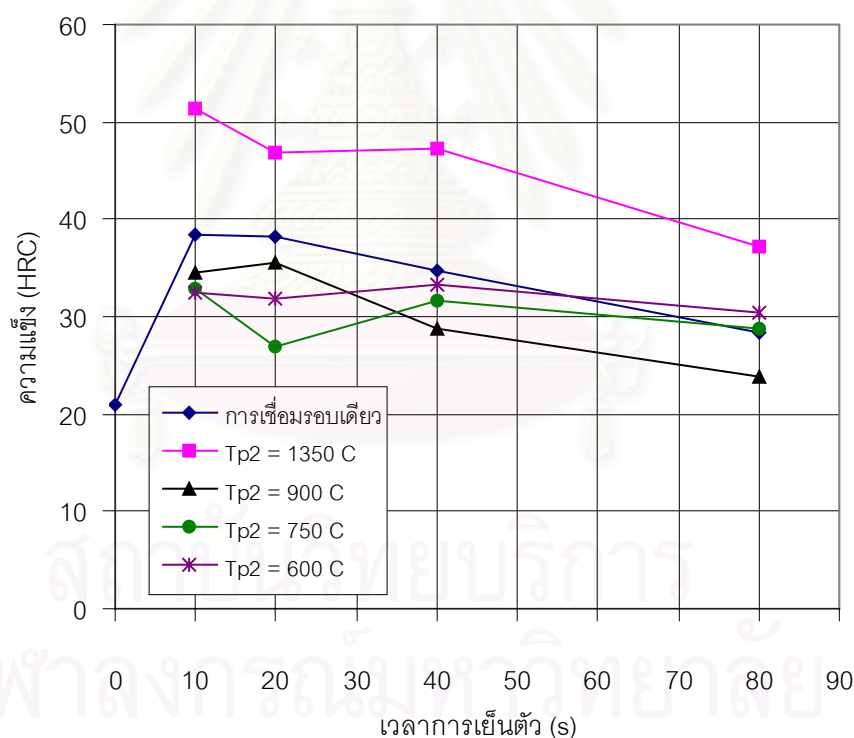
1)  $T_{p2} = 1350^{\circ}\text{C}$  เป็นอุณหภูมิที่เกิดการโตของเกรน ความแกร่งที่อุณหภูมินี้ จะมีค่าต่ำสุด โดยความแกร่งจะอยู่ในช่วง 10-15 J และเมื่อเปรียบเทียบกับความแกร่งหลังการจำลองการเชื่อมรอบเดียวพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคจากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 พบว่าหลังการจำลองการเชื่อมแบบรอบคู้โครงสร้างจุลภาคที่พบมีลักษณะเหมือนกับกรณีที่ผ่านการจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียวคือพบโครงสร้างหลักเป็น M เมื่อ  $\Delta t_{8/5(2)} = 10-40$  s และพบโครงสร้างที่ประกอบด้วย AF และ GF เมื่อ  $\Delta t_{8/5(2)} = 80$  s โดย GF มีลักษณะเป็นเน็ตเวิร์ค

2)  $T_{p2} = 900^{\circ}\text{C}$  ที่อุณหภูมินี้ ความแกร่งจะมีค่าสูงสุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 52-144 J และความแกร่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการเย็นตัวรอบสองเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคจากรูปที่ 4.10 (ข) พบว่าประกอบด้วย B และ AF ที่มีขนาดเกรนละเอียด และ ปริมาณของ B จะลดลง ในขณะที่ AF เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเย็นตัวเพิ่มขึ้น และเกิดเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วย P และ AF (ดูรูปที่ภาคผนวก ค) เมื่อ  $\Delta t_{8/5(2)} \geq 40$  s

3)  $T_{p2} = 750^{\circ}\text{C}$  ความแข็งแรงที่อุณหภูมินี้จะอยู่ในช่วง 16-92 J ซึ่งมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงที่ได้จากการจำลองการเชื่อมรอบเดียว จากรูปที่ 4.10 (ค) โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย P และ AF ภายในเกรนออกสเทนไนท์เดิม

4)  $T_{p2} = 600^{\circ}\text{C}$  ความแข็งแรงอยู่ในช่วง 40-70 J มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงจากการจำลองการเชื่อมรอบเดียว เป็นผลมาจากเกิดการอบคืนตัว จากรูปที่ 4.10 (ง) และจะพบว่าโครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วย P, B และ FS เล็กน้อย ที่  $\Delta t_{8/5(2)} = 40$  วินาที ปริมาณ AF จะเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความแข็งแรงสูงขึ้น ขณะที่เมื่อ  $\Delta t_{8/5(2)} = 80$  วินาที ปริมาณ GF จะเพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งแรงมีค่าลดลง

#### 4.4.2 ความแข็งหลังจำลองการเชื่อมรอบคู่ สำหรับชิ้นงานขานแนวการรีด แปรผันอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาการเย็นตัวรอบสองที่  $T_{p1} = 1350^{\circ}\text{C}$

และ  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  วินาที

จากรูปที่ 4.9 พบว่าความแข็งที่ได้จากการจำลองการเชื่อมรอบคู่ที่  $T_{p2} = 900, 750$  และ  $600^{\circ}\text{C}$  จะต่ำกว่าที่ได้จากการจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียว เป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคที่



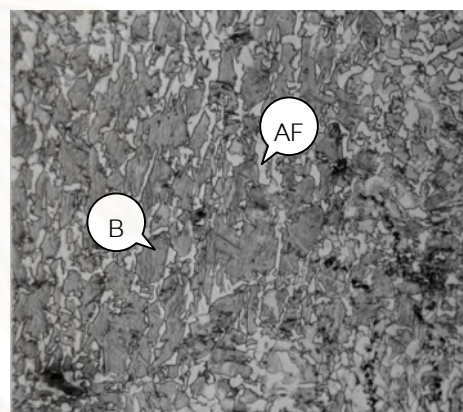
เปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำกว่า เช่น P และ AF ขณะที่การจำลองการเชื่อมแบบรอบคูลที่  $T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$  ความแข็งที่ได้จะมีค่าสูงกว่า เป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคมีปริมาณ M สูงกว่าในกรณีที่ทำกรจำลองการเชื่อมแบบรอบคูลเดียว

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความแข็ง พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามเวลาการเย็นตัวรอบสองที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคที่มีความแข็งต่ำมีปริมาณสูงขึ้น เช่น กรณี  $T_{p_2} = 900^{\circ}\text{C}$  ที่ปริมาณ P ลดลง ขณะที่ AF เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการเย็นตัวรอบสองสูงขึ้น

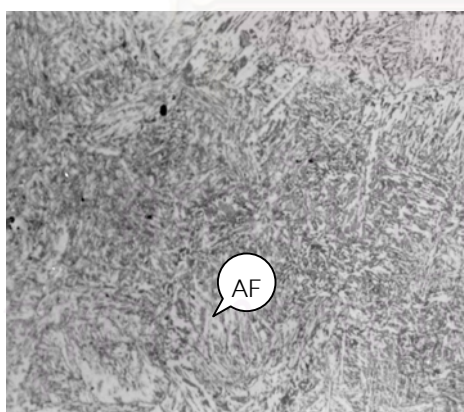
#### 4.4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการจำลองการเชื่อมแบบรอบคูล แปรผันอุณหภูมิสูงสุรอบสอง



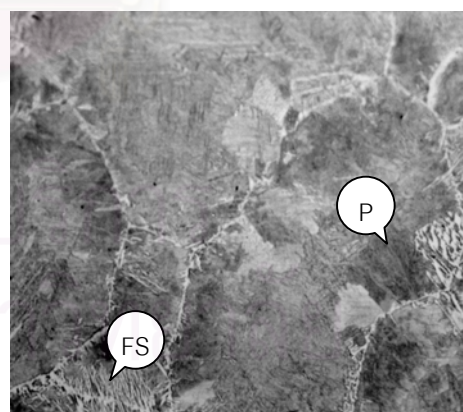
ก)  $T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$ , x200



ข)  $T_{p_2} = 900^{\circ}\text{C}$ , x500



ค)  $T_{p_2} = 750^{\circ}\text{C}$ , x200



ง)  $T_{p_2} = 600^{\circ}\text{C}$ , x200

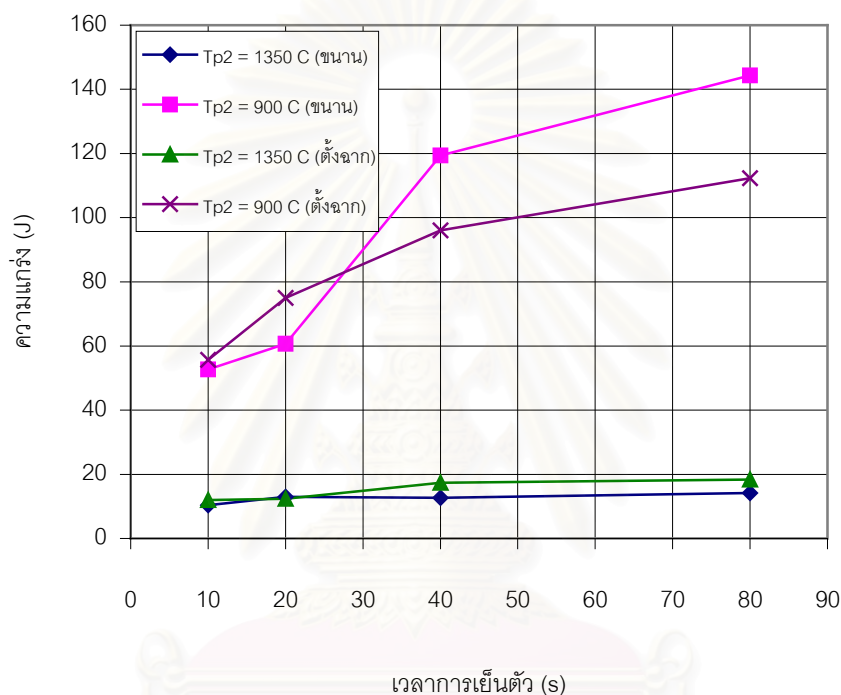
รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ที่ผ่านการจำลองการเชื่อมรอบคูล โดย  $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20$  วินาที  $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$



#### 4.5 ผลการจำลองการเชื่อมรอบคู้ ชี้นงานทดสอบตั้งฉากแนวการรีด

ศึกษาชี้นงานทดสอบทิศทางตั้งฉากการรีด โดยจำลองการเชื่อมแบบรอบคู้  $T_{p1} = 1350^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20$  วินาที และ  $T_{p2} = 1350^{\circ}\text{C}$ ,  $900^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(2)} = 10, 20, 40$  และ  $80$  วินาที

##### 4.5.1 ความแกร่งหลังจำลองการเชื่อมรอบคู้ ชี้นงานทดสอบตั้งฉากแนวการรีด



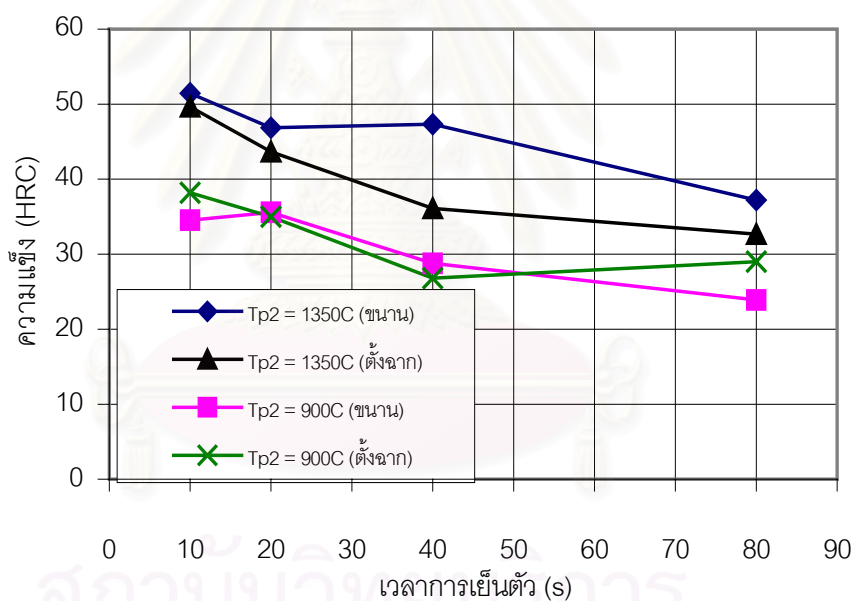
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแกร่งที่  $25^{\circ}\text{C}$  กับเวลาการเย็นตัวรอบสองของชี้นงานทดสอบทิศทางตั้งฉากและขนานแนวการรีด

จากรูปที่ 4.11 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความแกร่งจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเวลาการเย็นตัวเพิ่มขึ้น และถ้าเปรียบเทียบความแกร่งกับชี้นงานทดสอบขนานแนวการรีด พบว่าที่  $T_{p2} = 1350^{\circ}\text{C}$  ความแกร่งของชี้นงานทดสอบในทั้งสองทิศทาง จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีผลต่างน้อยกว่า  $5\text{ J}$  และในกรณีที่  $T_{p2} = 900^{\circ}\text{C}$  ความแกร่งของชี้นงานทดสอบทั้งสองทิศทางมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 - 80$  วินาที โดยความแกร่งในทิศทางตั้งฉากแนวการรีด จะมีค่าต่ำกว่าทิศทางขนานแนวการรีด แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลค่าความแกร่งทั้งหมดของชี้นงานที่ผ่านการจำลองการเชื่อมคู้ โดยมีอุณหภูมิสูงสุดรอบสอง  $900^{\circ}\text{C}$  พบว่าชุดข้อมูลค่าความแกร่งของชี้นงานขนานแนวการรีด มีช่วงกว้างความแตกต่างจากค่าความแกร่งเฉลี่ยประมาณ  $\pm 12$  ถึง  $60\text{ J}$

และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลค่าความแกร่งของชิ้นงานตั้งฉากแนวการรีด พบว่าช่วงกว้างความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยชุดข้อมูลค่าความแกร่งมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ดังนั้นทิศทางของชิ้นงานไม่น่าส่งผลกระทบต่อค่าความแกร่งที่ได้หลังการจำลองการเชื่อม

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบทั้งสองทิศทางที่  $\Delta t_{8/5(2)} = 20$  วินาที ตามรูปที่ 4.13 (ก), (ข), (ค) และ (ง) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบทั้งสองทิศทางจะมีลักษณะใกล้เคียงกันคือ ที่  $T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วย M โดยมี FS เกิดขึ้นเล็กน้อย ขณะที่  $T_{p_2} = 900^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วย B โดยมี AF เกิดขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นสาเหตุที่เกิดความแตกต่างของความแกร่งในกรณีนี้ที่  $T_{p_2} = 900^{\circ}\text{C}$  น่าจะเป็นผลมาจากทิศทางการรีดร้อนของชิ้นงานทดสอบ

#### 4.5.2 ความแข็งหลังจำลองการเชื่อมคู่ ชิ้นงานทดสอบตั้งฉากแนวการรีด



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาการเย็นตัวรอบสอง ของชิ้นงานทดสอบ ทิศทางตั้งฉากและขนานแนวการรีด

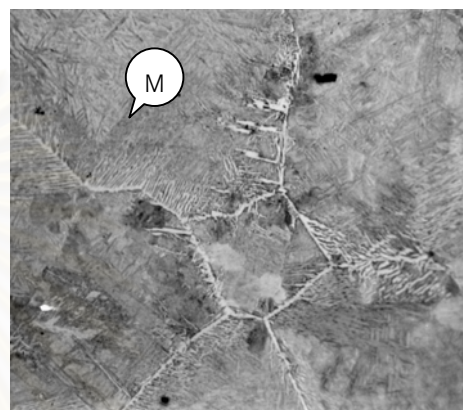
จากรูปที่ 4.12 พบว่าความแข็งของชิ้นงานตั้งฉากแนวการรีดและขนานแนวการรีด มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการเย็นตัวรอบที่สองเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาค (จากรูปที่ 4.13) พบว่าที่  $T_{p_2} = 1350^{\circ}\text{C}$  ชิ้นงานทั้งขนานและตั้งฉากแนวการรีดจะประกอบด้วย

M เป็นส่วนใหญ่ ขณะที่เมื่อ  $T_{p_2} = 900^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งสองทิศทางส่วนใหญ่ประกอบด้วย B มี AF เกิดขึ้นเล็กน้อย

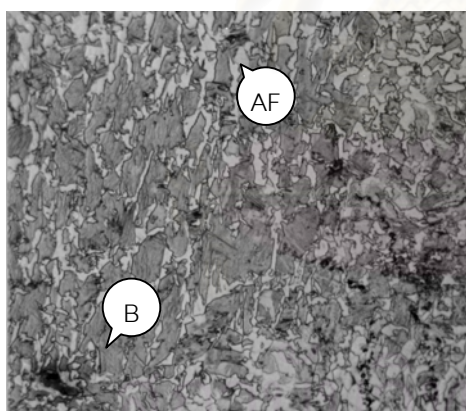
#### 4.5.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังจำลองการเชื่อมรอบคูลู่ ชิ้นงานทดสอบตั้งฉากแนวการรีด



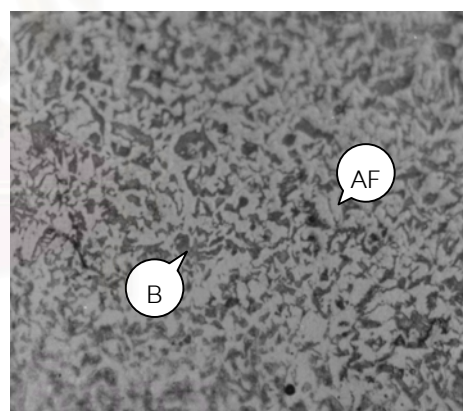
ก)  $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$  (ขนาน), x200



ข)  $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$  (ตั้งฉาก), x200



ค)  $T_{p_1} = 900^{\circ}\text{C}$  (ขนาน), x500



ง)  $T_{p_1} = 900^{\circ}\text{C}$  (ตั้งฉาก), x500

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ในแนวขนาน และตั้งฉากการรีด ที่ผ่านการจำลองการเชื่อมรอบคูลู่ โดย  $\Delta t_{8/5(1)} = \Delta t_{8/5(2)} = 20$  วินาที  $T_{p_1} = 1350^{\circ}\text{C}$

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาถึงผลของวัฏจักรความร้อนการเชื่อมรอบเดียว และการเชื่อมรอบเชื่อมคู่ ต่อความแกร่งและความแข็งที่บริเวณกระทบบร้อนของเหล็กกล้าทนแรงดัน ASTM A 516 เกรด 70 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำหรับวัฏจักรความร้อนการเชื่อมรอบเดียว ค่าความแกร่งภายหลังจำลองการเชื่อมที่อุณหภูมิสูงสุด ( $T_p$ )  $1350^{\circ}\text{C}$  ที่ทุกเวลาการเย็นตัวทั้งของชิ้นงานขนานแนวการรีดและตั้งฉากแนวการรีดจะต่ำกว่าความแกร่งของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ที่ผ่านการรีดร้อน

2. ความแข็งหลังจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียวของชิ้นงานทดสอบทั้งสองทิศทาง มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเวลาการเย็นตัวเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความแข็งที่ได้ยังคงมีค่าสูงกว่าความแข็งของเหล็กกล้า ASTM A516 เกรด 70 ที่ผ่านการรีดร้อน

3. โครงสร้างจุลภาคที่พบหลังจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียวที่อุณหภูมิสูงสุด  $1350^{\circ}\text{C}$  มีลักษณะเกิดการโตขึ้นของเกรน ที่  $\Delta t_{8/5} = 10-20$  s โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็น M เมื่อเวลาการเย็นตัวสูงขึ้น ( $\Delta t_{8/5} = 40$  s) เริ่มเกิด AF ขึ้นภายในเกรนออกสเทนไนท์เดิม และถ้าเวลาการเย็นตัวสูงกว่า 40 s ปริมาณของ AF จะเพิ่มขึ้น และพบ GF ขนาดใหญ่ในลักษณะเน็ตเวิร์คที่บริเวณขอบเกรนออกสเทนไนท์เดิม

4. สำหรับวัฏจักรความร้อนแบบรอบคู่ เวลาการเย็นตัวไม่ส่งผลกระทบต่อความแกร่งหลังจำลองการเชื่อม เมื่ออุณหภูมิสูงสุดของทั้งสองรอบการเชื่อม ( $T_{p1}$  และ  $T_{p2}$ ) เท่ากับ  $1350^{\circ}\text{C}$

5. สำหรับการจำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ ที่อุณหภูมิสูงสุดรอบสอง  $900^{\circ}\text{C}$  ความแกร่งที่ได้จะมีค่าสูงสุด โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย B และ AF เกรนละเอียด เมื่อเวลาการเย็นตัวรอบสองต่ำ ( $\Delta t_{8/5(2)} \leq 20$  s) และโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย P และ AF เกรนละเอียด เมื่อเวลาการเย็นตัวรอบสองสูงขึ้น ( $\Delta t_{8/5(2)} \geq 40$  s)

6. ทิศทางการรีดไม่ส่งผลกระทบต่อความแกร่ง ทั้งชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการจำลองการเชื่อมรอบคู่ที่อุณหภูมิสูงสุดรอบสอง  $1350$  และ  $900^{\circ}\text{C}$

## รายการอ้างอิง

1. Annual Book of ASTM Standard Section 1. Easton, MD, USA. Volume 01.04.1996 : 251-253.
2. Kenneth Easterling. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. Butterworths, 1985 : 29 - 30, 99,104,141 -144,150 –151.
3. J.F. Lancaster. Metallurgy of Welding. Fifth Edition .Chapman & Hall, 1993: 86 – 87, 182 –190.
4. Kenji Ikeuchi, Jinsun Liao, Hiroki Tanabe and Fukuhisa Matsuda . Effect of Temper – bead Thermal Cycle on Toughness of Welding ICCGHAZ of Low Alloy Steel SQV-2A. ISIJ International.Vol 35 No10 ,1995 : 1203 – 1212.
5. G.Spanos, R.W.Fonda, R.A.Vandermeer and A.Matuszeskil. Microstructural Changes in HSLA -100 Steel Thermally Cycled to Simulate the Heat – Affected Zone during Welding. Metallurgical and Materials Transactions A . volume 26 A December 1995 : 3277- 3293
6. Nazmul Alam, Druce Dunne and Stuart Edeny.Characterisation of the Microstructure and Toughness of the Weld HAZ of High Strength Microalloyed Steels. An International Conference on Materials in Welding & Joining. Conference Proceedings 23& 24 August 1995. Adelaide, South Australia :13 –18.
7. Welding Handbook. American Welding Society. Volume 2 : 192 – 199.
8. Annual Book of ASTM Standards Section 3 . Metals Test Methods and Analytical Procedures volume 03.01 Metals - Mechanical Testing ; Elevated and Low Temperature Test. Metallography :136 -154, 206 –214
9. American Society for Metals . Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams . Metal Park, Ohio 44073,1977: 536, 581.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ความแข็งและความแกร่งของเหล็กกล้า ASTM A516-70 หลังการจำลองการเชื่อม



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ผลของการจำลองการเชื่อมแบบรอบเดียวต่อความแกร่งและความแข็งที่บริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70

ชั้นงาน	Tp (°C)	Δt <sub>0/5</sub> (s)	ความแกร่งที่ 25°C (J)			ความแกร่งเฉลี่ยที่ 25°C (J)	ความแข็ง (HRC)																		ความแข็งเฉลี่ย
			ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		ชั้นที่ 1						ชั้นที่ 2						ชั้นที่ 3						
			วัดครั้งที่						วัดครั้งที่						วัดครั้งที่										
			1	2	3		4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย				
ขนานการรีด	1350	10	8	21	28	16.00	48	46	46	44	43	45.33	32	38	36	37	38	37.00	34	33	35	32	32	33.00	38.44
		20	10	11	10	10.33	37	36	35	35	37	36.00	39	36	36	34	32	35.33	37	42	44	44	48	43.33	38.22
		40	15	16	35	22.00	35	34	34	33	33	33.67	26	33	34	35	34	33.37	37	36	38	36	38	37.00	34.78
		80	13	10	33	18.67	17	22	27	27	25	24.67	29	29	30	29	31	29.33	30	31	32	32	29	31.00	28.33
ตั้งฉากการรีด	1350	10	15	10	12	12.33	34	37	35	35	34	34.67	32	36	39	40	41	38.33	32	33	33	35	30	32.67	35.22
		20	7	7	8	7.33	43	41	40	44	43	42.33	46	47	50	47	44	46.67	48	51	50	50	52	50.33	46.44
		40	14	12	12	12.67	33	34	35	37	32	34.00	32	33	33	34	31	32.67	34	35	37	36	37	36.00	34.22
		80	20	22	28	23.33	31	33	33	31	28	31.67	32	33	32	30	33	32.33	28	29	30	26	30	29.00	31.00

ตารางที่ ก.2 ผลของการจำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ต่อความแกร่งและความแข็งที่บริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70 ในแนวนานการรีด

Tp <sub>1</sub> (°C)	Tp <sub>2</sub> (°C)	Δt <sub>8/5(1)</sub> (s)	Δt <sub>8/5(2)</sub> (s)	ความแกร่งที่ 25°C (J)			ความแกร่ง เฉลี่ยที่ 25°C (J)	ความแข็ง (HRC)																								ความ แข็ง เฉลี่ย
				ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		ชั้นที่ 1								ชั้นที่ 2								ชั้นที่ 3								
								วัดครั้งที่								วัดครั้งที่								วัดครั้งที่								
				1	2	3		4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย										
1350	1350	10	10	12	10	12	11.33	51	51	50	49	53	50.67	52	53	53	54	51	52.67	53	53	54	55	50	53.33	52.22						
			20	12	17	12	13.67	42	44	45	47	48	45.33	31	36	39	40	40	38.33	53	52	46	41	40	46.33	43.33						
			40	11	16	12	13.00	51	52	54	52	50	51.67	35	35	35	34	36	35.00	41	41	40	39	42	40.67	42.44						
			80	10	28	34	24.00	53	54	53	50	53	53.33	35	35	32	33	33	33.67	34	32	33	30	35	33.00	40.00						
1350	1350	20	10	9	10	12	10.33	47	54	52	52	53	52.33	51	50	50	50	51	50.33	41	49	52	54	56	51.67	51.44						
			20	16	14	9	13.00	42	42	42	42	46	42.00	45	45	48	47	47	46.67	51	52	53	52	52	52.00	46.89						
			40	18	10	10	12.67	14	36	38	38	39	37.33	52	51	50	50	46	50.33	53	55	55	54	54	54.33	47.33						
			80	9	17	14	14.17	41	44	46	48	47	45.67	32	33	33	33	33	33.00	10	28	30	31	28	28.67	37.22						
1350	1350	40	10	10	13	10	11.00	51	53	51	52	51	51.33	28	40	45	50	52	45.00	52	52	54	51	52	52.00	49.44						
			20	11	20	9	13.33	50	51	52	52	53	51.67	33	37	38	36	39	37.00	53	53	55	56	55	54.33	47.67						
			40	18	12	11	13.67	37	39	39	40	38	38.67	44	45	44	43	43	43.67	48	48	39	47	45	46.67	43.00						
			80	21	40	23	28.00	24	30	29	29	26	28.00	32	35	32	33	32	32.33	26	29	30	29	30	29.33	29.89						
1350	1350	80	10	18	9	12	13.00	41	42	39	42	39	40.67	48	51	52	52	52	51.67	44	45	46	43	46	45.00	45.78						
			20	24	10	12	15.33	35	41	42	43	45	42.00	46	50	52	54	53	51.67	51	50	50	50	47	50.00	47.89						
			40	12	16	21	16.33	42	43	40	38	37	40.00	35	36	36	37	35	35.67	34	35	34	31	35	34.33	36.67						
			80	24	16	15	18.33	32	31	31	32	18	31.33	40	41	41	42	38	40.67	30	33	33	31	32	32.00	34.67						

ตารางที่ ก.2 ผลของการจำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ต่อความแกร่งและความแข็งที่บริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70 ในแนวนานการรีด (ต่อ)

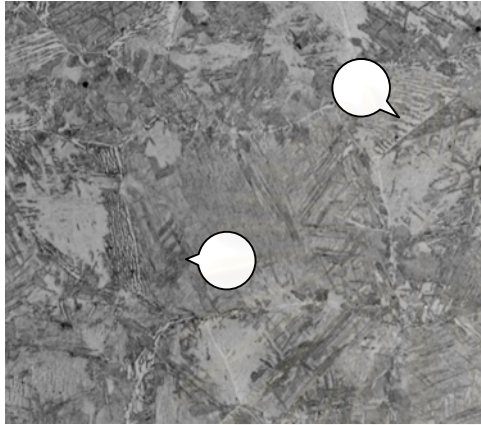
Tp <sub>1</sub> (°C)	Tp <sub>2</sub> (°C)	Δt <sub>8/5(1)</sub> (s)	Δt <sub>8/5(2)</sub> (s)	ความแกร่งที่ 25°C (J)			ความแกร่ง เฉลี่ยที่ 25°C (J)	ความแข็ง (HRC)																		ความ แข็ง เฉลี่ย
				ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		ชั้นที่ 1						ชั้นที่ 2						ชั้นที่ 3						
								วัดครั้งที่						วัดครั้งที่						วัดครั้งที่						
				1	2	3		4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย				
1350	900	20	10	55	78	25	52.67	23	26	28	28	29	27.33	44	36	34	35	37	36.00	46	40	37	40	41	40.33	34.55
			20	30	31	121	60.67	43	42	42	42	44	42.33	36	35	35	32	33	34.33	33	31	25	28	31	30.00	35.55
			40	107	109	142	119.33	34	37	36	36	37	36.33	27	28	25	26	28	27.00	15	25	25	21	23	23.00	28.77
			80	165	106	162	144.33	23	29	27	25	25	25.67	22	24	21	23	24	23.00	22	22	23	30	24	23.00	23.89
1350	750	20	10	14	13	22	16.33	30	29	30	29	23	29.33	35	36	36	39	42	37.00	27	31	32	34	34	32.33	32.88
			20	36	44	28	36.00	27	28	24	18	23	34.67	29	30	32	29	31	30.00	27	26	14	25	29	26.00	26.89
			40	40	97	139	92.00	32	30	33	34	33	32.67	30	32	33	32	32	32.00	26	30	30	31	32	30.33	31.67
			80	60	22	74	52.00	32	31	33	32	31	31.67	21	28	31	31	32	30.00	20	25	26	28	22	24.33	28.67
1350	600	20	10	39	41	41	40.33	26	30	32	32	30	30.67	31	30	30	33	30	30.33	36	35	36	37	37	36.33	32.44
			20	34	42	50	42.00	38	39	38	38	38	38.00	29	32	34	35	34	33.33	29	25	22	20	25	24.00	31.78
			40	59	56	97	70.67	35	38	35	36	33	35.33	35	34	35	35	35	35.00	25	30	32	30	29	29.67	33.33
			80	35	41	54	43.33	26	28	29	32	27	28.00	29	32	31	33	29	30.67	18	33	34	31	34	32.67	30.44

ตารางที่ ก.3 ผลของการจำลองการเชื่อมแบบรอบคู่ต่อความแกร่งและความแข็งที่บริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70 ในแนวตั้งฉากการรีด

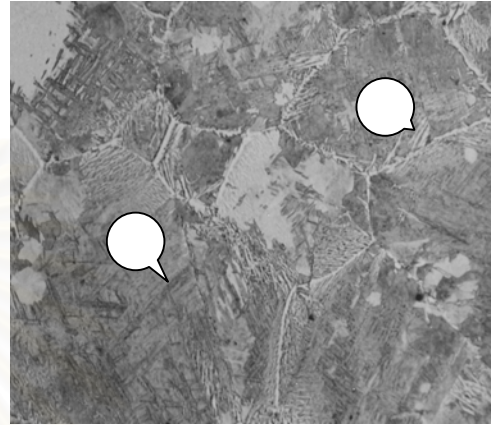
Tp (°C)	Tp (°C)	$\Delta t_{8/5(1)}$ (s)	$\Delta t_{8/5(2)}$ (s)	ความแกร่งที่ 25°C (J)			ความ แกร่ง เฉลี่ยที่ 25°C (J)	ความแข็ง (HRC)															ความ แข็ง เฉลี่ย			
				ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		ชั้นที่ 1					ชั้นที่ 2					ชั้นที่ 3								
				1	2	3		วัดครั้งที่					วัดครั้งที่					วัดครั้งที่								
				1	2	3		1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	1	2	3		4	5	เฉลี่ย
1350	1350	20	10	12	12	12	12.00	48	51	51	50	51	50.67	46	49	48	49	49	48.67	48	49	50	50	50	49.67	49.67
			20	12	13	12	12.33	45	47	45	44	44	44.67	45	46	44	45	45	45.00	42	43	42	40	40	41.33	43.67
			40	17	11	24	17.33	34	34	33	35	34	34.00	38	41	40	44	45	41.67	32	33	33	32	33	32.67	36.11
			80	12	28	15	18.33	32	35	33	35	35	34.33	32	34	33	34	35	33.67	21	28	31	33	31	30.00	32.67
1350	900	20	10	32	106	29	55.67	40	39	39	39	39	39.00	32	34	33	33	34	33.33	42	43	41	43	42	42.33	38.22
			20	44	61	120	75.00	42	40	34	35	33	36.33	36	36	36	35	33	35.67	33	33	34	33	31	33.00	35.00
			40	103	67	118	96.00	23	28	22	22	24	23.00	28	28	29	30	28	28.33	28	29	31	30	27	29.00	26.78
			80	115	109	113	112.33	26	29	29	27	30	28.33	30	30	29	28	25	29.00	32	29	31	29	27	29.67	29.00

## ภาคผนวก ข

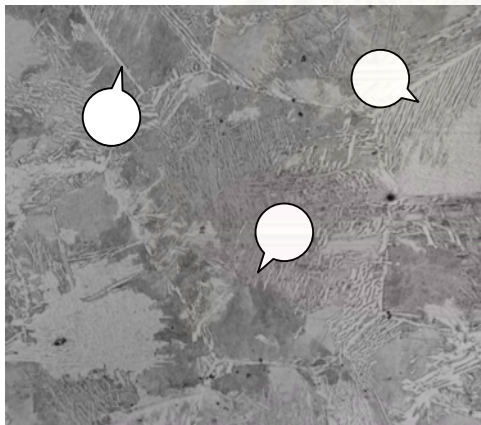
โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันร้อนของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70 ที่ผ่านรอบการเชื่อมเดียว



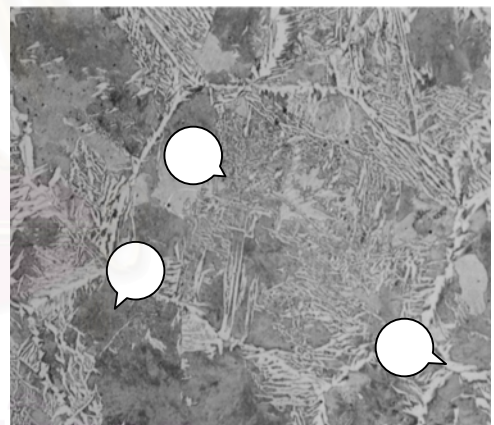
(ก)  $\Delta t_{8/5} = 10 \text{ s}$ , x200



(ข)  $\Delta t_{8/5} = 20 \text{ s}$ , x200



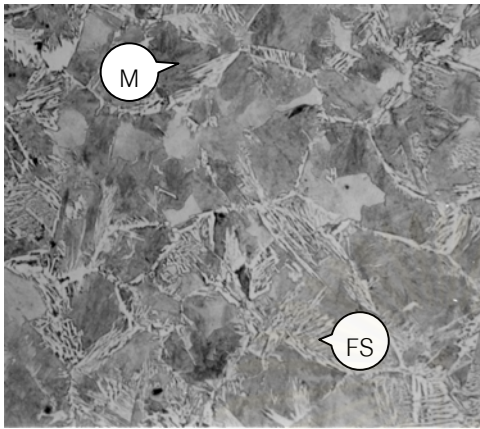
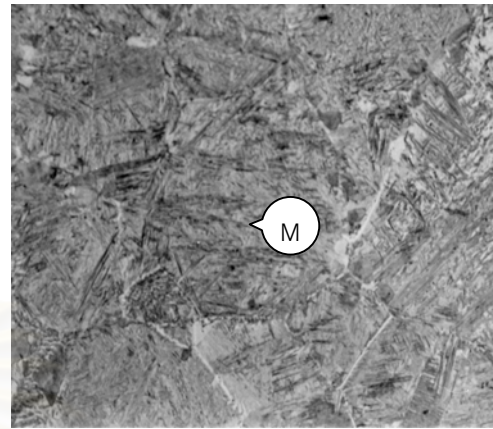
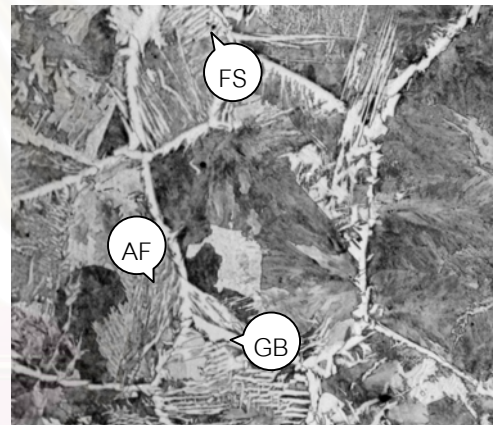
(ค)  $\Delta t_{8/5} = 40 \text{ s}$ , x200



(ง)  $\Delta t_{8/5} = 80 \text{ s}$ , x200

รูปที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทันร้อนของชิ้นงานขนานแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อนการเชื่อมแบบรอบเดียว  $T_p = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$

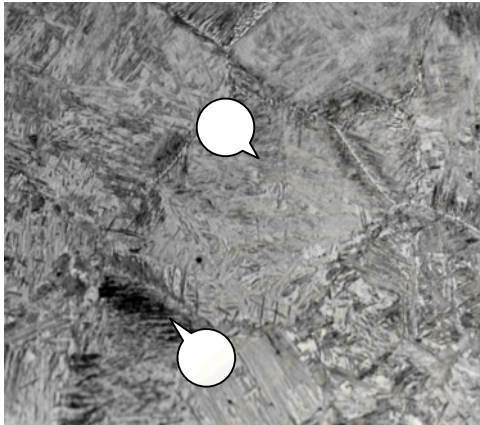


(ก)  $\Delta t_{8/5} = 10$  s, x200(ข)  $\Delta t_{8/5} = 20$  s, x200(ค)  $\Delta t_{8/5} = 40$  s, x200(ง)  $\Delta t_{8/5} = 80$  s, x200

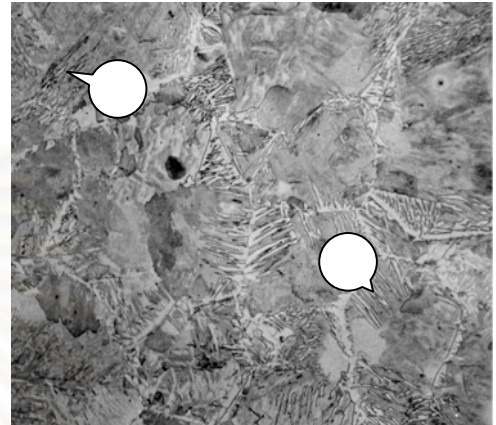
รูปที่ ๑.๒ โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานตั้งฉากแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อนการเชื่อมแบบรอบเดียว  $T_p = 1350$  °C

ภาคผนวก ค

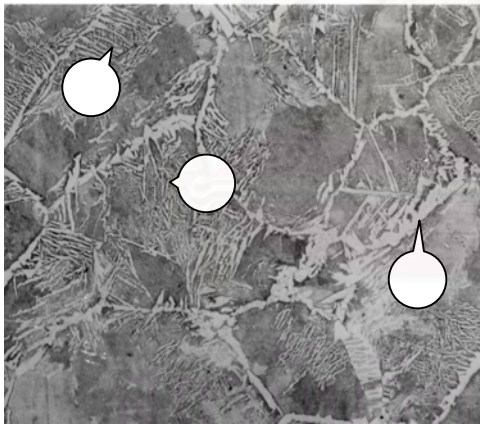
โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนของเหล็กกล้า ASTM A 516 เกรด 70 ที่ผ่านวัฏจักรความร้อน  
ร้อนการเชื่อมรอบคู้



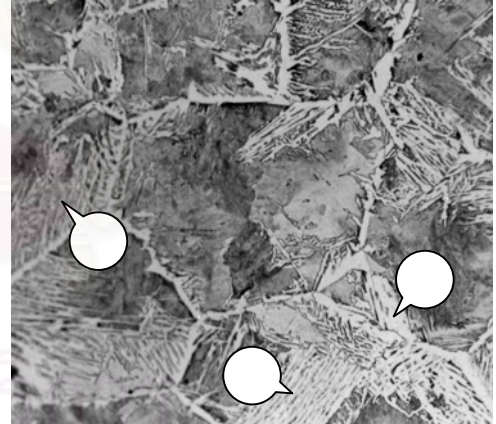
(ก)  $\Delta t_{8/5(2)} = 10 \text{ s}$ , x200



(ข)  $\Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$ , x200s

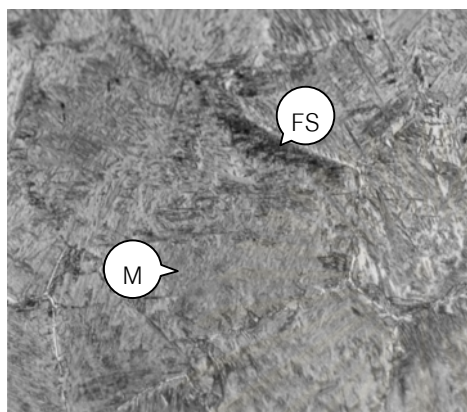


(ค)  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 \text{ s}$ , x200



(ง)  $\Delta t_{8/5(2)} = 80 \text{ s}$ , x200

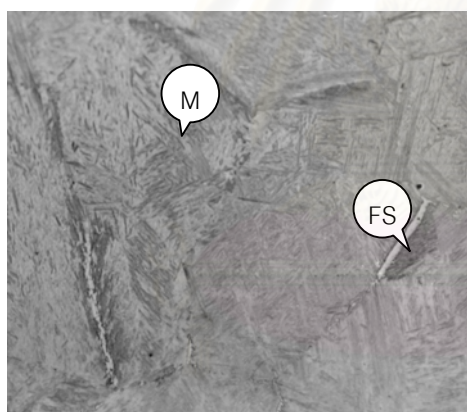
รูปที่ ค.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานขนานแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อน  
การเชื่อมรอบคู้  $T_{p1} = T_{p2} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 10 \text{ s}$ , 200 เท่า



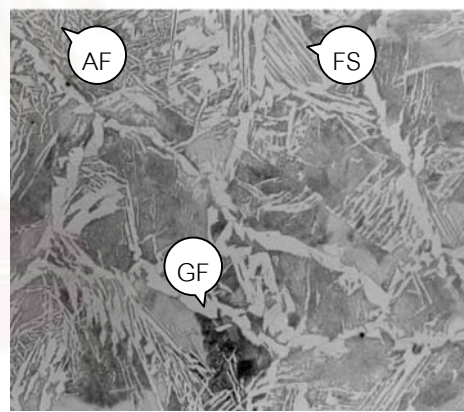
(ก)  $\Delta t_{8/5(2)} = 10 \text{ s}$ , x200



(ข)  $\Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$ , x200



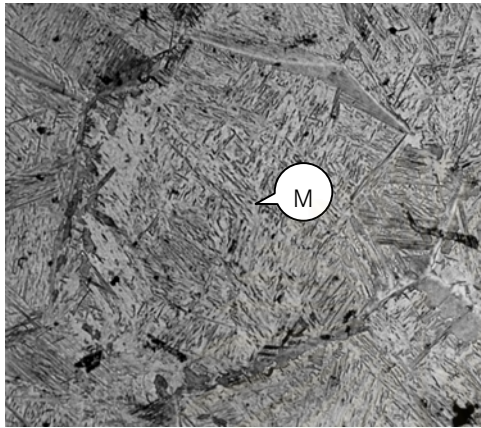
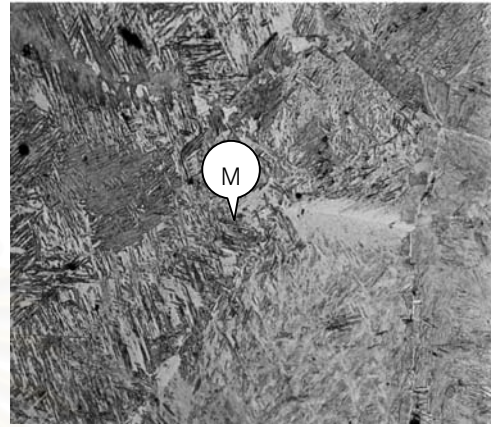
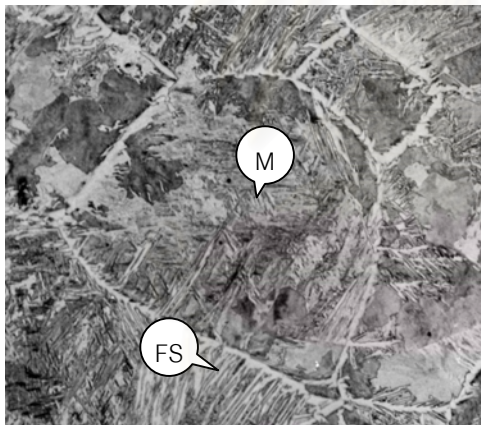
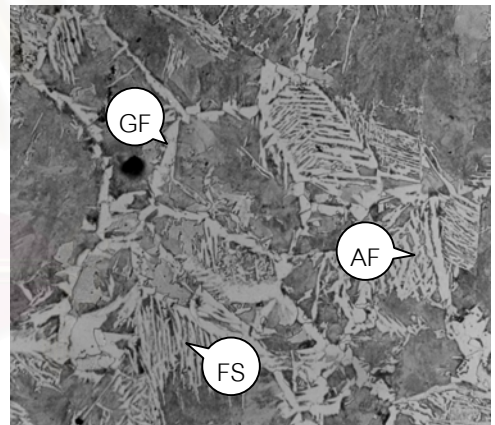
(ค)  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 \text{ s}$ , x200



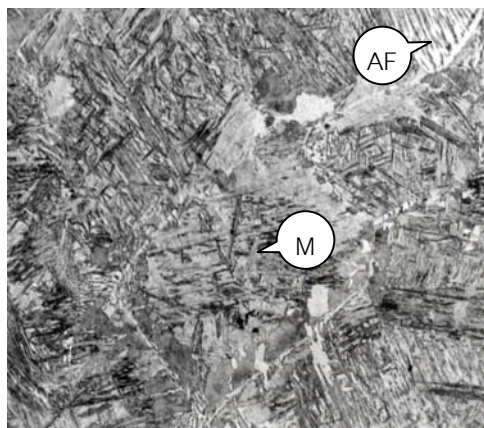
(ง)  $\Delta t_{8/5(2)} = 80 \text{ s}$ , x200

รูปที่ ค.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบร้อนของชิ้นงานขนานแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อน  
การเชื่อมรอบคู่  $T_{p_1} = T_{p_2} = 1350 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20 \text{ s}$

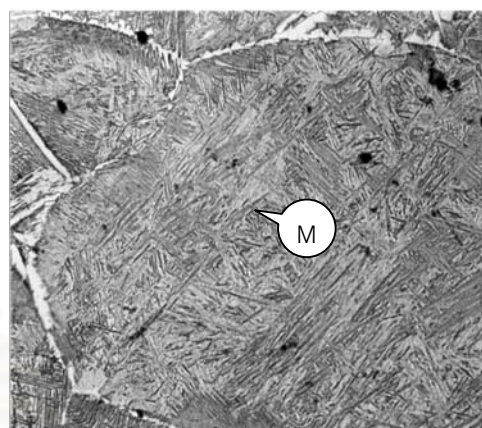


(ก)  $\Delta t_{8/5(2)} = 10 \text{ s}$ , x200(ข)  $\Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$ , x200(ค)  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 \text{ s}$ , x200(ง)  $\Delta t_{8/5(2)} = 80 \text{ s}$ , x200

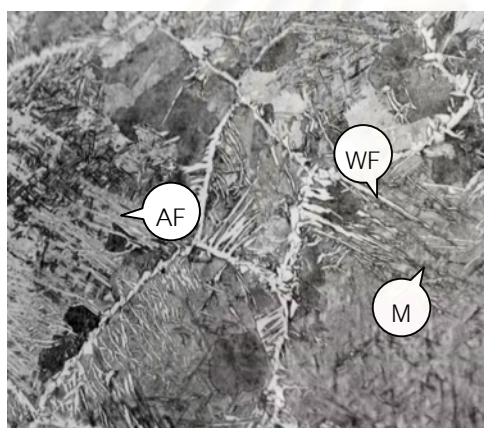
รูปที่ ค.3 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานขนานแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อน  
การเชื่อมรอบคู่  $T_{p_1} = T_{p_2} = 1350 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 40 \text{ s}$



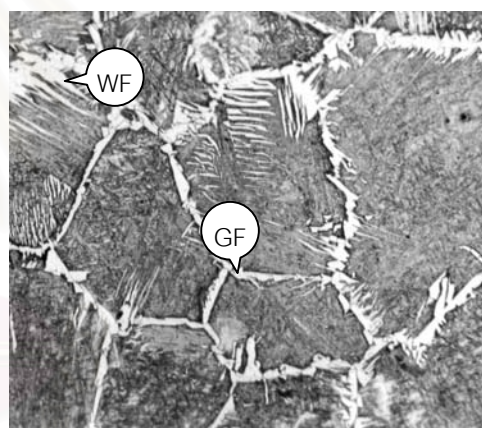
(ก)  $\Delta t_{8/5(2)} = 10 \text{ s}$ , x200



(ข)  $\Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$ , x200



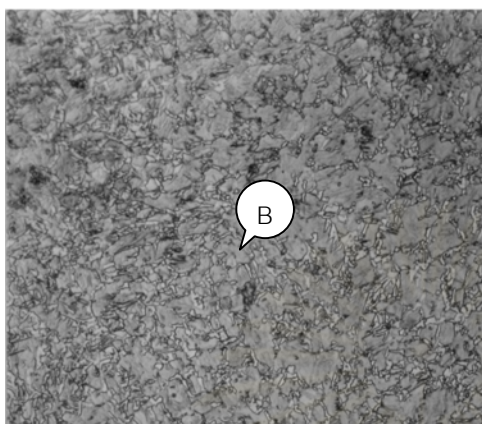
(ค)  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 \text{ s}$ , x200



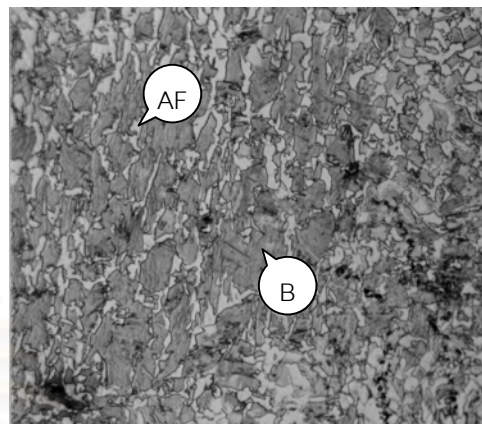
(ง)  $\Delta t_{8/5(2)} = 80 \text{ s}$ , x200

รูปที่ ค.4 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานขนานแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อน  
การเชื่อมรอบคู่  $T_{p_1} = T_{p_2} = 1350 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 80 \text{ s}$

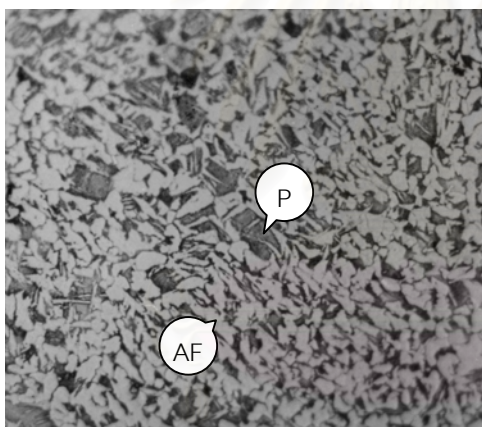




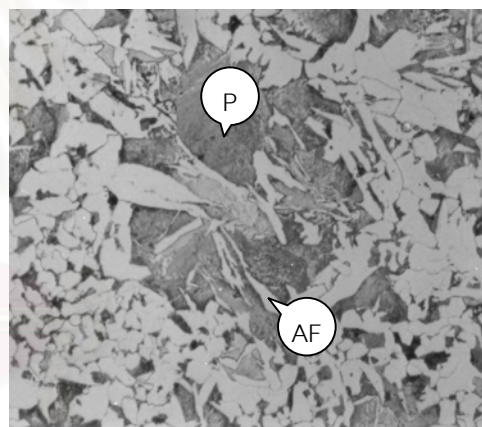
(ก)  $\Delta t_{8/5(2)} = 10 \text{ s}$ , x500



(ข)  $\Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$ , x500



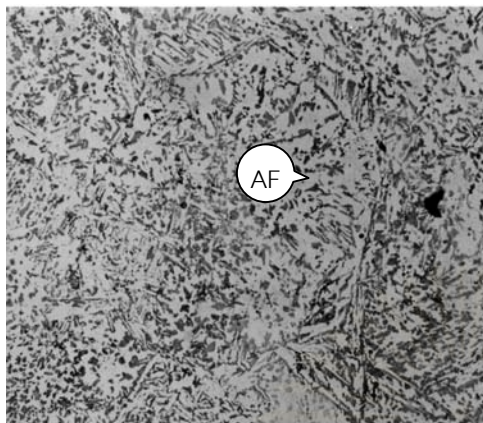
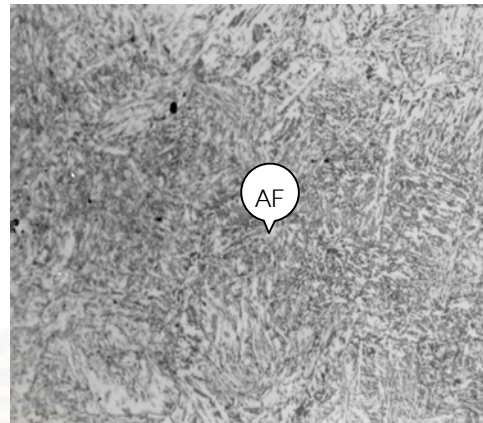
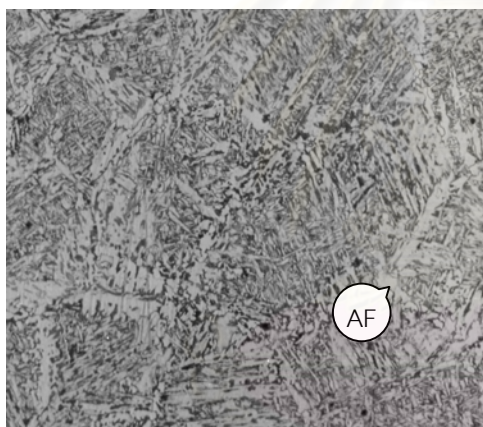
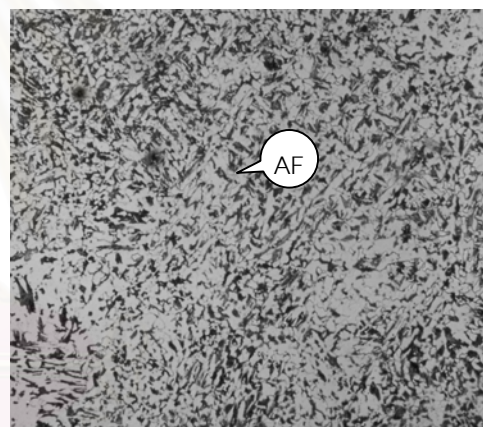
(ค)  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 \text{ s}$ , x500



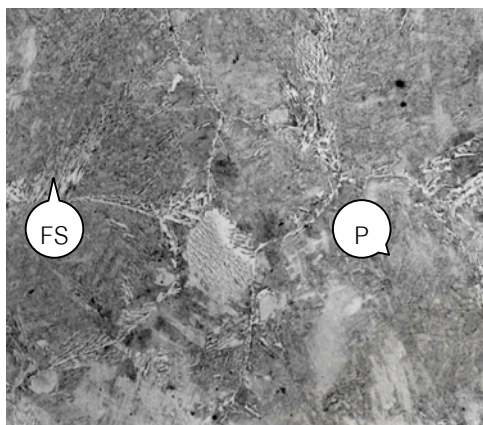
(ง)  $\Delta t_{8/5(2)} = 80 \text{ s}$ , x500

รูปที่ ค.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานขนานแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อน  
การเชื่อมรอบคู่  $T_{p1} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{p2} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20 \text{ s}$

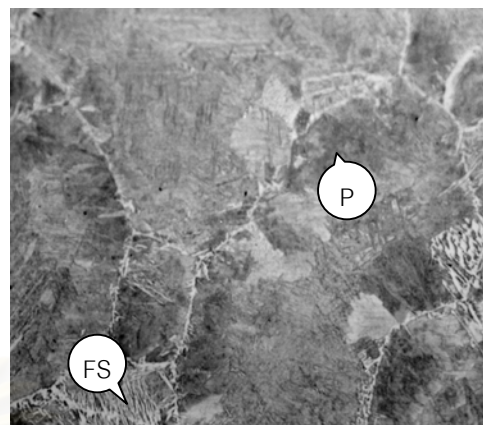


(ก)  $\Delta t_{8/5(2)} = 10 \text{ s}$ , x200(ข)  $\Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$ , x200(ค)  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 \text{ s}$ , x200(ง)  $\Delta t_{8/5(2)} = 80 \text{ s}$ , x200

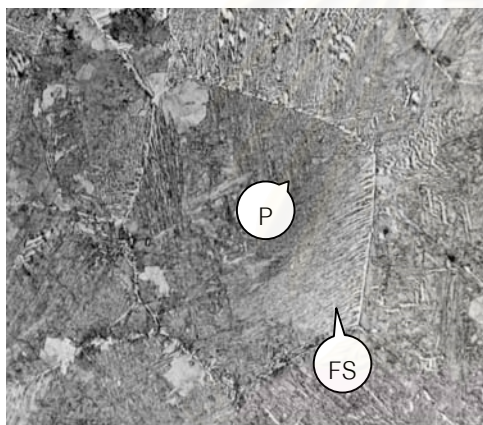
รูปที่ ค.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานขนานแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อน  
การเชื่อมรอบคู้  $T_{p1} = 1350^\circ \text{C}$ ,  $T_{p2} = 750^\circ \text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20 \text{ s}$



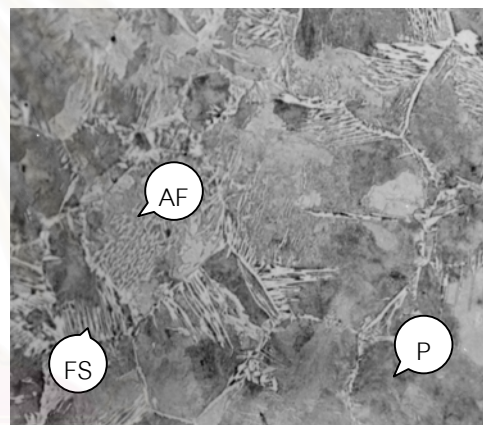
(ก)  $\Delta t_{8/5(2)} = 10 \text{ s}$ , x200



(ข)  $\Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$ , x200



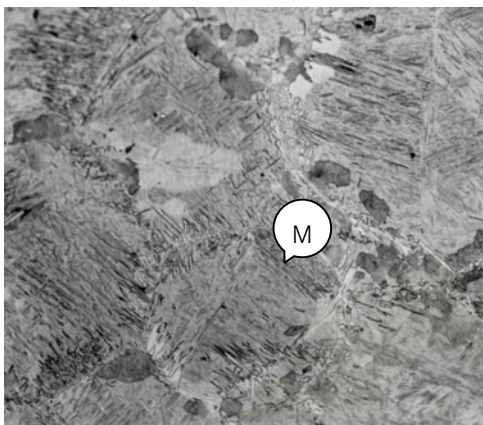
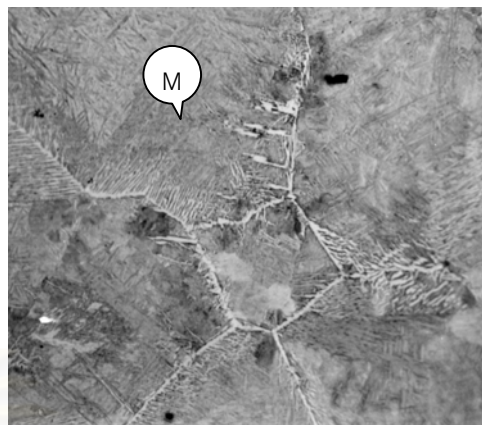
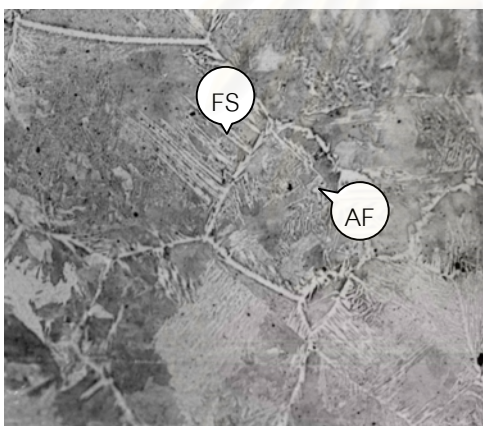
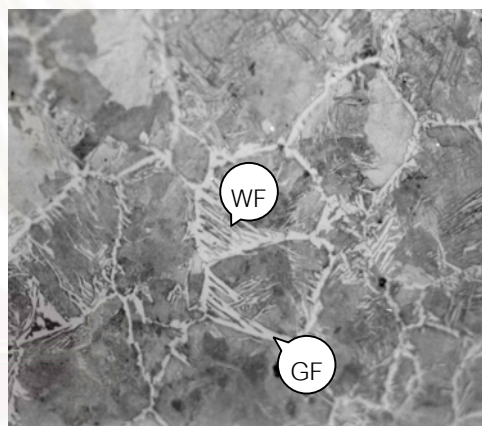
(ค)  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 \text{ s}$ , x200



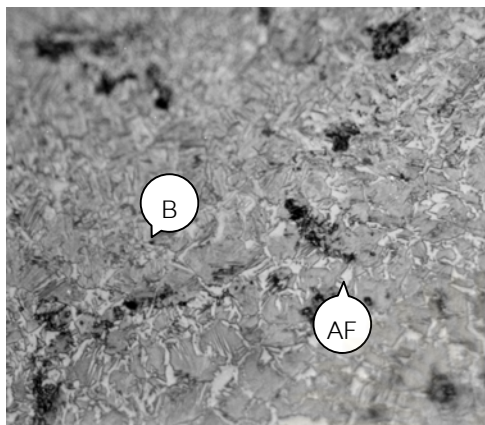
(ง)  $\Delta t_{8/5(2)} = 80 \text{ s}$ , x200

รูปที่ ค.7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทะร้อนของชิ้นงานขนานแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อน  
การเชื่อมรอบคูลู่  $T_{p_1} = 1350 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{p_2} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20 \text{ s}$

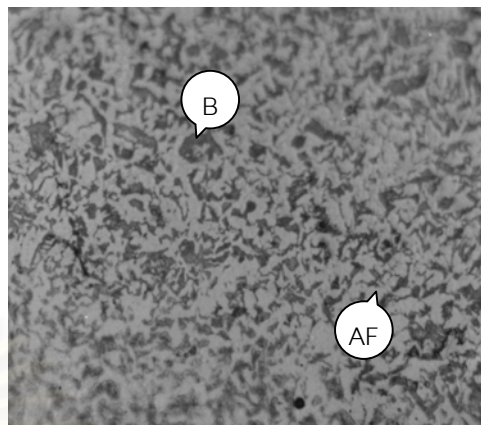


(ก)  $\Delta t_{8/5(2)} = 10 \text{ s}$ , x200(ข)  $\Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$ , x200(ค)  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 \text{ s}$ , x200(ง)  $\Delta t_{8/5(2)} = 80 \text{ s}$ , x200

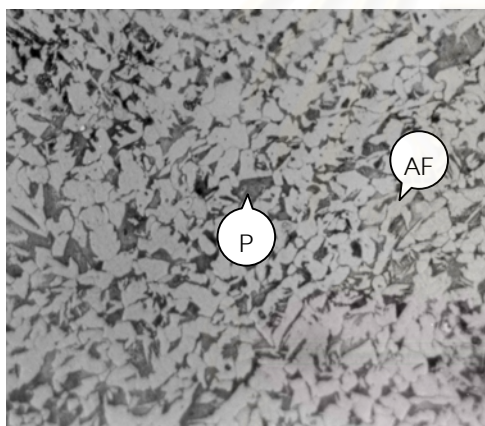
รูปที่ ค.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานตั้งฉากแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อนการเชื่อมรอบคู่  $T_{p1} = 1350^\circ \text{C}$ ,  $T_{p2} = 1350^\circ \text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20 \text{ s}$



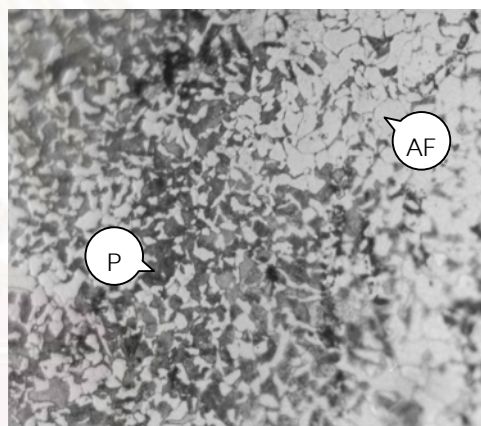
(ก)  $\Delta t_{8/5(2)} = 10 \text{ s}$ , x200



(ข)  $\Delta t_{8/5(2)} = 20 \text{ s}$ , x200



(ค)  $\Delta t_{8/5(2)} = 40 \text{ s}$ , x500



(ง)  $\Delta t_{8/5(2)} = 80 \text{ s}$ , x500

รูปที่ ค.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานตั้งฉากแนวการรีด ที่ผ่านวัฏจักรความร้อนการเชื่อมรอบคู่  $T_{p1} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{p2} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5(1)} = 20 \text{ s}$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ	นายสยาม ทิพย์สุนทรศักดิ์
วัน/เดือน/ปี เกิด	1 พฤศจิกายน 2520
ที่อยู่	317 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
การศึกษา	ปีการศึกษา 2531 ประถมศึกษา โรงเรียนเมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา ปีการศึกษา 2537 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จ.นครราชสีมา ปีการศึกษา 2541 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบัน กำลังศึกษาในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทรศัพท์	044-241184
e-mail address	chang_mt79@hotmail.com

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย