

# ผลของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมต่อความเหนียวบากของบริเวณกระทบร้อน ในวัสดุเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม

สลิตา เพชรสังข์<sup>1\*</sup> และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี<sup>2</sup>

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาผลการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่มีต่อความเหนียวบากที่อุณหภูมิต่างๆ ในบริเวณกระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมที่ใช้กระบวนการเชื่อมทิกและทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-นิกเกิลชนิด AWS ER90S-B3 โดยแบ่งออกเป็นชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 690°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมประกอบด้วยโครงสร้างเบนไนท์และมาเทนไซต์ตามลำดับ และเมื่อทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมพบว่า บริเวณดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นเฟอร์ไรท์และเทมเปอร์มาเทนไซต์ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความแข็งแรงลดลง โดยเมื่อทำการทดสอบแรงกระแทกในบริเวณกระทบร้อนพบว่า เมื่ออุณหภูมิการทดสอบแรงกระแทกลดลง (จากอุณหภูมิห้อง (25°C) ถึง -80°C) ชิ้นงานเชื่อมมีค่าการดูดซับพลังงานลดลง (เช่น จาก 104 จูลล์ เหลือ 6 จูลล์ ในกรณีของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม) แสดงถึงการที่ชิ้นงานเชื่อมมีสมบัติความเหนียวบากลดลง โดยบริเวณกระทบร้อนที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าความแข็งแรงลดลงและมีค่าความเหนียวบากที่ดีขึ้น เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม เนื่องจากเกิดโครงสร้างเทมเปอร์มาเทนไซต์แทนที่โครงสร้างมาเทนไซต์อันเป็นผลมาจากการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

คำสำคัญ : การให้ความร้อนหลังการเชื่อม, ความเหนียวบาก, บริเวณกระทบร้อน, เหล็กกล้า 3.5% โครเมียม

<sup>1</sup> สถานวิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, จังหวัดสงขลา

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, จังหวัดสงขลา

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: Salita\_Raul@hotmail.com รับเมื่อ 7 กันยายน 2560 ตอบรับเมื่อ 8 มีนาคม 2561

## Effect of Postweld Heat Treatment on Impact Toughness at Heat Affected Zone of 3.5% Chromium Steel

Salita Petchsang<sup>1\*</sup> and Prapas Muangjunburee<sup>2</sup>

### Abstract

The purpose of this investigation is to study the effect of postweld heat treatment (PWHT) on impact toughness with various temperatures at heat affected zone (HAZ) of 3.5%Cr steel by gas tungsten arc welding (GTAW) process with AWS ER90S-B3 Cr-Mo steel filler metal. The tested samples are divided into two conditions; No PWHT and PWHT at 690°C for 1 hour. The results indicated that the microstructure of the weld metal and HAZ of No PWHT samples contained bainite and martensite, respectively. However, those of PWHT specimens transformed to ferrite and tempered martensite with lower hardness. From charpy impact test at HAZ regions, the lower the tested temperature (from 25°C to -80°C), the lower the impact energy of the HAZ (such as from 104 joules to 6 joules in case of the PWHT samples), which meant the impact toughness of HAZ decreased. The HAZ of the PWHT specimen exhibited lower hardness and better impact toughness compared to the No PWHT sample. This is due to this region contained tempered martensite instead of martensite structure resulting from the improvement of metallurgical and mechanical properties of the weldment from postweld heat treatment.

Keywords : Postweld Heat Treatment, Impact Toughness, Heat Affected Zone, 3.5%Cr Steel

---

<sup>1</sup> Center of Excellence in Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla.

<sup>2</sup> Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla.

\* Corresponding author, E-mail: Salita\_Raul@hotmail.com Received 7 September 2017, Accepted 8 March 2018

## 1. บทนำ

วัสดุเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel) ได้ถูกนำมาผลิตเป็นเครื่องโม่ถ่านหิน (Coal Crusher) ในเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เนื่องจากมีสมบัติต้านทานการสึกหรอที่ดีและมีความแข็งที่สูง [1] โดยเครื่องโม่ถ่านหินประกอบด้วยฟันโม่ (Crush Roll) ซึ่งทำหน้าที่กระแทกถ่านหินให้แตกจนมีขนาดตามที่ต้องการ ปัญหาที่มักพบในเครื่องโม่ถ่านหินคือ การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) ของฟันโม่จากการกระทบกับถ่านหิน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยถ่านหิน ลดลง ดังนั้น จึงต้องทำการเชื่อม พอกแข็ง (Hardfacing) เพื่อซ่อมแซมชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย

บริเวณที่มักเป็นปัญหามากที่สุดในชิ้นงานเชื่อมคือ บริเวณ กระทบ ร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) เนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลแตกต่างจากบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) และบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal; WM) จากการได้รับผลกระทบจากความร้อนในระหว่างเชื่อม ซึ่งบริเวณดังกล่าวอาจมีความเหนียว (Ductility) และความเหนียวบาก (Toughness) ลดลง ทำให้มีโอกาสในการเกิดการแตกร้าวได้ง่ายขึ้น (Crack Susceptibility) [2-3]

การให้ความร้อนหลังการเชื่อม (Postweld Heat Treatment; PWHT) ถือเป็นปัจจัยหนึ่งในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในบริเวณดังกล่าว ซึ่งการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเค้นตกค้าง (Stress Relief) ลดความแข็งและเพิ่มความเหนียวในบริเวณกระทบ ร้อน อีกทั้งยังช่วยกำจัดไฮโดรเจนอีกด้วย ดังนั้นการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

จึงอาจช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายในชิ้นงานเชื่อม [4-6]

เนื่องจากวัสดุเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมเป็นวัสดุชนิดพิเศษ ไม่ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติต่างๆ ในรอยเชื่อมของวัสดุชนิดนี้ ไม่มากนัก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลการให้ความร้อนหลังการเชื่อมต่อค่าความเหนียวบากในบริเวณกระทบ ร้อนของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก (TIG หรือ Gas Tungsten Arc Welding) โดยทำการทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) ที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ พร้อมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และวัดความแข็งของในแต่ละบริเวณของชิ้นงานเชื่อม ซึ่งการทดสอบแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่างๆ ทำให้ทราบและเข้าใจถึงความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุชนิดนี้ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นองค์ความรู้หรือแนวทางสำหรับวัสดุชนิดอื่นๆ ในกลุ่มเดียวกันได้

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัสดุและกระบวนการเชื่อมที่ใช้

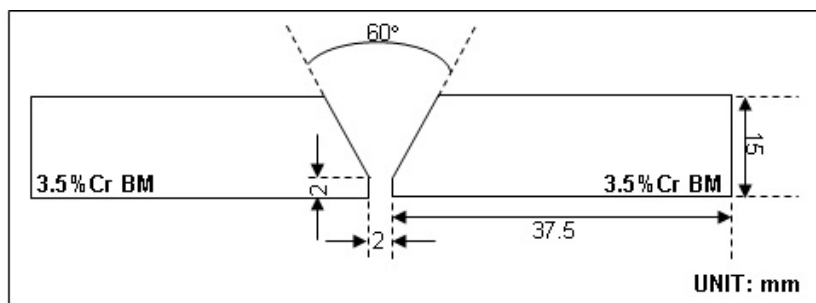
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เหล็กกล้า 3.5% โครเมียมที่ได้จากการหล่อ (Casting) และผ่านการอบอ่อน (Annealing) มาแล้ว โดยมีขนาด 250 x 37.5 x 15 มิลลิเมตร ทำการเตรียมรอยบากแบบต่อชนร่องวี (Single V Groove for Butt Joint) ที่มีมุมรอยบากด้านละ 30 องศา ความกว้างของหน้าราก (Root Face) เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และระยะห่างของราก (Root Gap) เท่ากับ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการคานยัดด้านหลังของชิ้นงานเพื่อป้องกันการบิดงอจากการเชื่อม จากนั้นทำการเชื่อมชิ้นงานจำนวน 2 ชิ้นด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้า

โครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด AWS ER90S-B3 (2.25Cr-1Mo Steel) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร โดยกระบวนการเชื่อมทิก ซึ่งใช้เทคนิคการเชื่อมหลายชั้น (Multipass Welding) จำนวน 8 ชั้น ทั้งหมด 36 แนว (รูปที่ 2) โดยตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อมที่ใช้ในการวิจัยจากผู้ผลิต

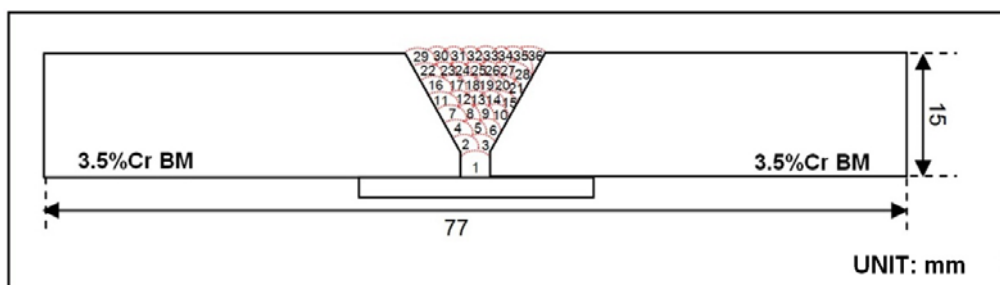
การเลือกใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด ER90S-B3 สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เนื่องจากเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมเป็นวัสดุชนิดพิเศษ ซึ่งผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะทางเท่านั้น จึงไม่มีชื่อตามมาตรฐาน โดยปัจจุบันยังไม่มีลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีเหมือนกับวัสดุชนิดนี้ (Matching) ดังนั้นจึงเลือกใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัมเกรด 2.25Cr-1Mo (AWS ER90S-B3) ซึ่งเป็นลวดเชื่อมที่มี

ส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับวัสดุชนิดนี้มากที่สุด เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของคาร์บอน (Carbon Migration) ในบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อม (Weld Interface; IW) จากการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน หลังการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลในชิ้นงานเชื่อม อีกทั้งยังเพื่อให้ง่ายต่อการเตรียมชิ้นงานทดสอบแทนการเชื่อมพอกแข็ง

ทำการให้ความร้อนก่อนเชื่อม (Preheat) ที่อุณหภูมิ 250°C [7] และควบคุมอุณหภูมิระหว่างเชื่อม (Interpass Temperature) ไม่ให้เกิน 300°C จากนั้นนำชิ้นงานเชื่อมจำนวน 1 ชิ้นเข้าเตาอบเพื่อทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 690°C [7] เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในเตา ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมแสดงอยู่ในตารางที่ 2



รูปที่ 1 ขนาดของชิ้นงานสำหรับการเชื่อม



รูปที่ 2 การเติมลวดเชื่อม

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อมที่ใช้ (ข้อมูลจากผู้ผลิต)

Material	Chemical Composition (wt-%)							
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
3.5%Cr Steel	0.38	0.52	0.40	0.17	3.42	0.30	0.04	Bal.
Base Metal								
ER90S-B3	0.09	0.60	0.64	0.06	2.39	1.08	0.15	Bal.
Filler Metal								

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม

Sample	Layer no.	Welding Process	Filler Metal		Polarity	Current (A)	Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/cm)
			AWS Class.	Dia. (mm)					
			No PWHT	All					
PWHT	All	GTAW	ER90S-B3	2.0	DCEN	148-150	16-18	10.5-13.5	15.43

- ก๊าซปกคลุมแนวเชื่อม: ก๊าซอาร์กอน
- อัตราการไหลก๊าซปกคลุม: 15 ลิตร/นาที [5]
- อุณหภูมิการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อม: 250°C [7]
- อุณหภูมิระหว่างที่เชื่อม: ไม่เกิน 300°C [5]

2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

2.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานเชื่อมทั้งที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (No PWHT and PWHT) มาตัดออกเป็น 13 ชิ้นเท่าๆ กัน จากนั้นนำชิ้นงานจำนวน 1 ชิ้น ในแต่ละสภาวะการเชื่อม มาทำการเตรียมผิวสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยทำการขึ้นเรือนแบบเย็น (Cold Mount) แล้วขัดหยาบ (Grinding) ด้วยกระดาษทรายและทำการขัดเงา (Polishing) ด้วยผงขัดอะลูมินา ขนาด 5 ไมครอน จากนั้นทำการกัดผิวหน้า (Etching) ด้วยกรดไนตริก 5% (5% Nital) เป็นเวลา 30 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM E407 [8] และทำการตรวจสอบและ

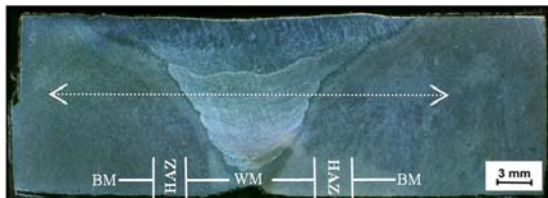
วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Optical Microscopy: OM)

จากนั้นทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์สในบริเวณตรงกลางชิ้นงาน โดยใช้น้ำหนักกดเท่ากับ 200 gf เป็นเวลา 10 วินาที และระยะห่างแต่ละตำแหน่งของการทดสอบเท่ากับ 250 ไมครอน (0.25 มิลลิเมตร) ซึ่งกำหนดให้กึ่งกลางของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเป็นตำแหน่งที่เริ่มต้นการทดสอบ จากนั้นทำการวัดไปทางด้านซ้ายและด้านขวาของชิ้นงานเชื่อมเข้าไปในบริเวณกระทบร้อนและบริเวณเนื้อโลหะเดิมตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3

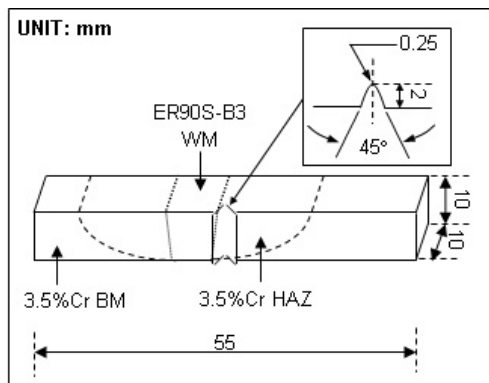
2.2.2 การทดสอบแรงกระแทก

นำชิ้นงานเชื่อมที่ตัดแล้วมาทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบมาตรฐานขนาด 10 x 10 x 55 มิลลิเมตร สำหรับ

การทดสอบแรงกระแทกแบบชาปี (Charpy Impact Test) ตามมาตรฐาน ASTM E23 [9] โดยทำการเตรียมรอยบาก (Notch) ในบริเวณกระทะร้อนที่ติดกับเส้นหลอมละลาย (Fusion Line) ทางด้านขวาของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาปี โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 25 -40 และ -80°C จำนวน 2 ชั้นในแต่ละสภาวะการทดสอบ และทำการตรวจสอบผิวหน้าแตกหัก (Fracture Surface) ในบริเวณกระทะร้อนของชิ้นงานเชื่อมด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคป (Stereo Microscope)



รูปที่ 3 ตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมแสดงตำแหน่งการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องมือโครวิกเกอร์ส



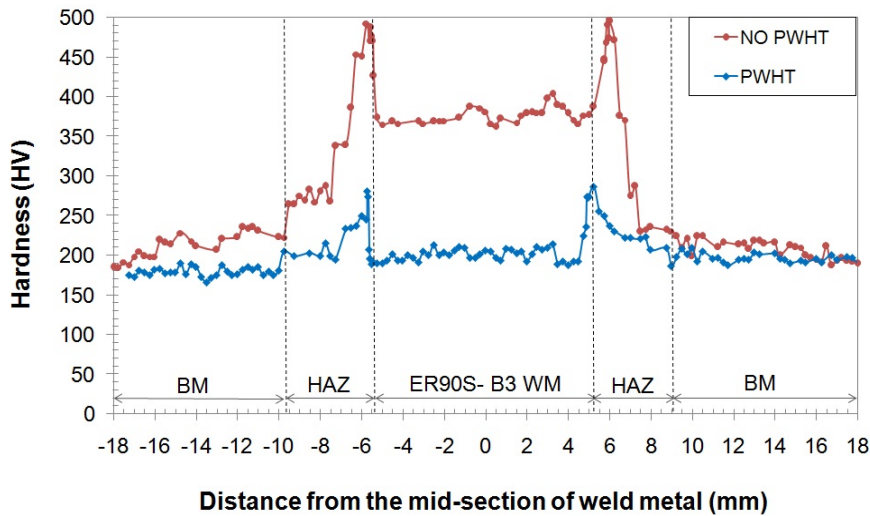
รูปที่ 4 ขนาดชิ้นงานและบริเวณที่ทำการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23

### 3. ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

#### 3.1 ผลการทดสอบความแข็งและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

เมื่อทำการทดสอบความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER90S-B3 ทั้งนี้ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมพบว่า ประกอบด้วย 3 บริเวณหลักๆ ได้แก่ บริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณกระทะร้อน และบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยบริเวณเนื้อโลหะเดิมซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างเบนไนท์ (Bainite; B) และเฟอไรท์ (Ferrite; F) บางส่วนพร้อมด้วยผลึกคาร์ไบด์ (Carbide; C) ทั้งภายในเกรนและตามขอบเกรน [10-11] ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) มีค่าความแข็งเท่ากับ 200 HV

สำหรับบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อม ER90S-B3 พบว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีความแข็งค่อนข้างสูง (380 HV) (รูปที่ 6(ข1)) เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างเบนไนท์ [12] อันเป็นผลมาจากลวดเชื่อมชนิดนี้มีปริมาณธาตุผสมอยู่สูง จึงส่งผลให้มีความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) สูง แม้ว่าจะมีอัตราการเย็นตัวหลังการเชื่อมไม่สูงมากนัก ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าความแข็งลดลงเท่ากับ 200 HV เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างเฟอไรท์พร้อมด้วยผลึกคาร์ไบด์ [13] ดังแสดงในรูปที่ 6(ข2) อันเป็นผลมาจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมถือว่าการอบอ่อนชิ้นงานเพื่อลดความเค้นตกค้างในชิ้นงานเชื่อม และเพื่อปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติทางกลในบริเวณดังกล่าวอีกด้วย [4-6]



รูปที่ 5 ค่าความแข็งในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม

และสำหรับบริเวณกระทบร้อนพบว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างมาเทนไซต์ (Martensite; M) และออสเทนไนท์ตกค้าง (Retained Austenite; RA) บางส่วน [9] มีความแข็งสูงมาก (500 HV) การเกิดโครงสร้างมาเทนไซต์เนื่องจากในระหว่างการเชื่อม บริเวณนี้ได้รับความร้อนสูงจนเกิดเป็นเฟสออสเทนไนท์ (Austenite) และบริเวณดังกล่าวมีอัตราการเย็นตัวที่สูง ส่งผลให้เฟสออสเทนไนท์เหล่านี้เปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาเทนไซต์ [2, 14] ดังแสดงในรูปที่ 6(ค1) ในขณะที่เมื่อผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมพบว่า มีความแข็งลดลงเท่ากับ 285 HV เนื่องจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมทำให้บริเวณนี้ได้รับความร้อนซ้ำ ทำให้โครงสร้างบริเวณดังกล่าวเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) จึงเกิดการปรับปรุงโครงสร้างจากโครงสร้างมาเทนไซต์ไปเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งน้อยกว่าคือ เทมเปอร์มาเทนไซต์ (Tempered Martensite; TM) ดังแสดงในรูปที่ 6(ค2) [4-6]

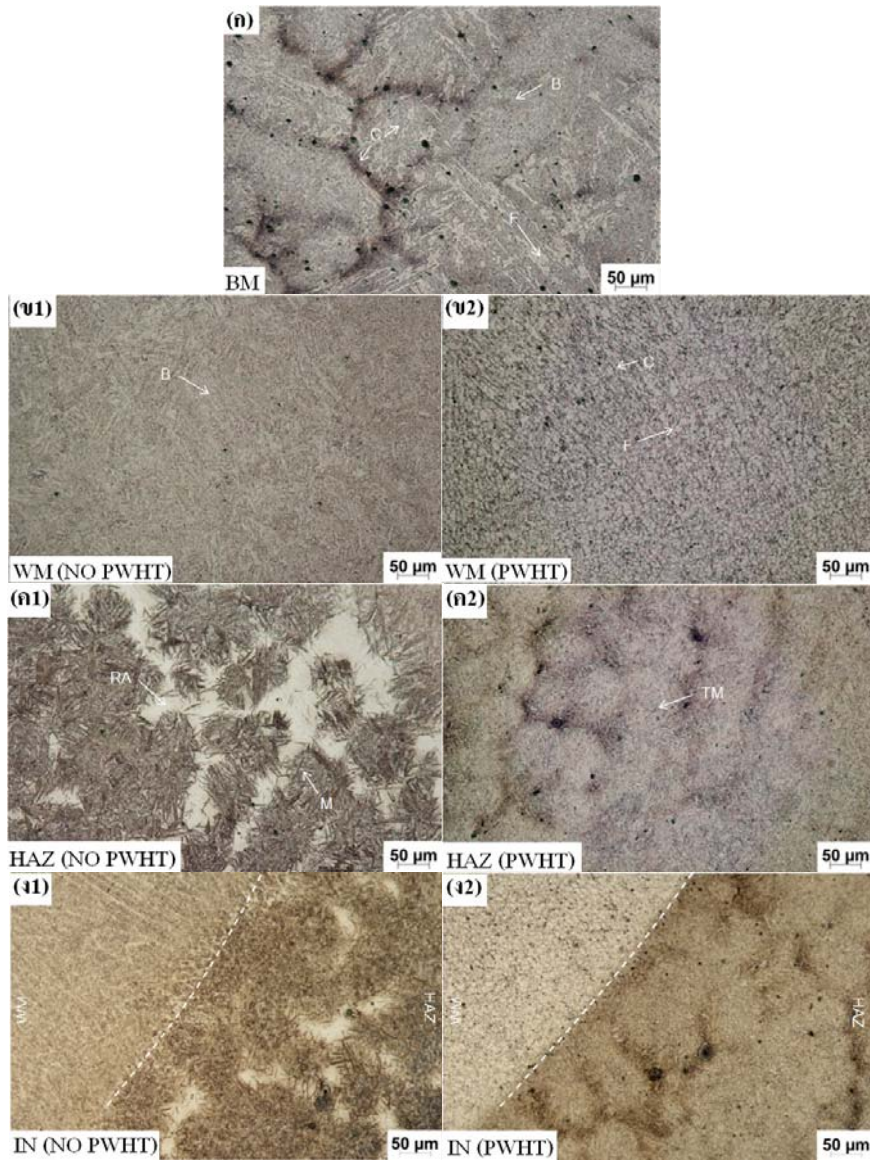
นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจสอบบริเวณรอยต่อของรอยเชื่อมในชิ้นงานเชื่อม ไม่พบทั้งบริเวณ Soft Zone และ Hard Zone เกิดขึ้น แม้ชิ้นงานจะผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมก็ตาม เนื่องจากลวดเชื่อมกับวัสดุที่นำมาเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกัน จึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ของคาร์บอนในบริเวณดังกล่าว [5] ดังแสดงในรูปที่ 6(ง1) และ 6(ง2)

### 3.2 ผลการทดสอบแรงกระแทก

ผลการทดสอบแรงกระแทกในบริเวณกระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 7 พบว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าการดูดซับพลังงานเท่ากับ 35, 12.5 และ 8 จูลล์ เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25, -40 และ -80°C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการทดสอบลดต่ำลงจาก 25°C จนถึง -80°C ชิ้นงานเชื่อมมีความสามารถในการดูดซับพลังงานหรือความสามารถในการรับแรงกระแทกน้อยลง ซึ่งแสดงว่า

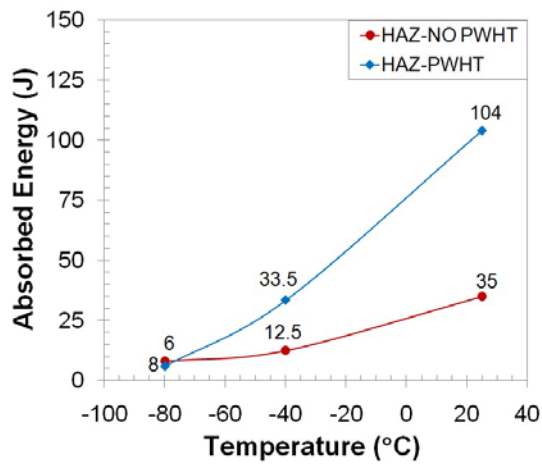
ชิ้นงานมีสมบัติความเหนียวบากลดลง มีความเปราะมากขึ้น และเมื่อทำการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก (รูปที่ 8(ก1) ถึง 8(ค1)) พบว่า พื้นผิวการแตกหักมีความวาว ผิวค่อนข้างเรียบ และแทบไม่มีการเปลี่ยนรูป

อย่างถาวรหรือยืดตัวออก (รูปที่ 9) แสดงว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบเปราะที่ทุกอุณหภูมิทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้

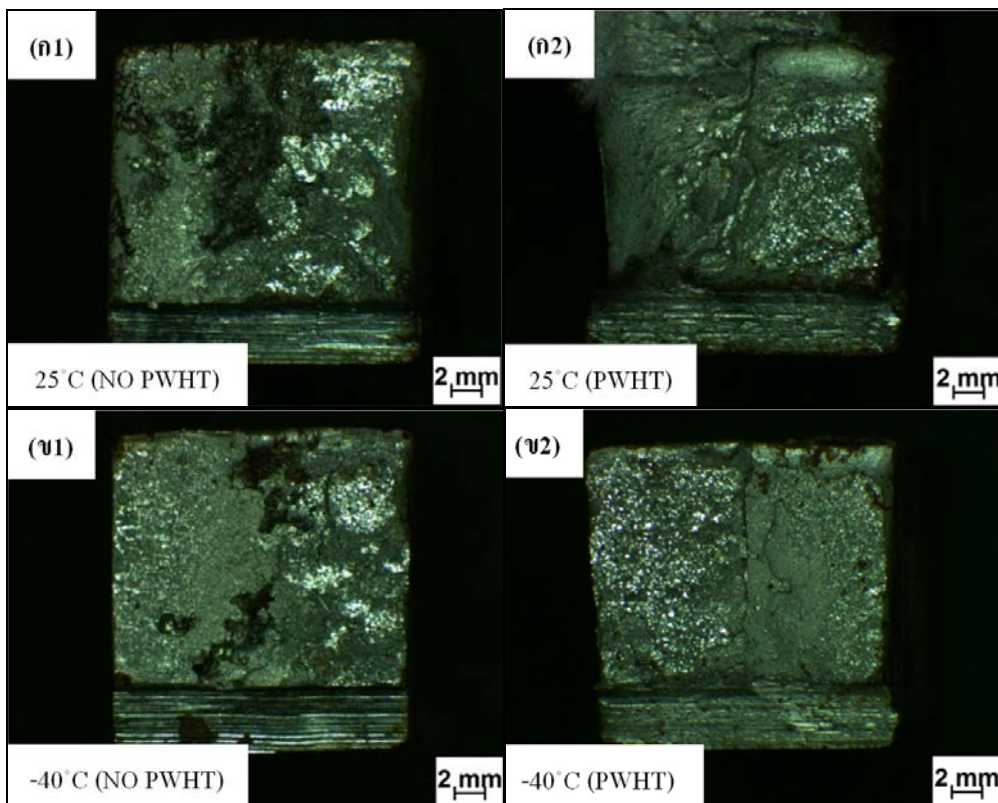


รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม: (ก) บริเวณเนื้อโลหะเดิม; (ข) บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม; (ค) บริเวณกระตบร้อน และ (ง) บริเวณรอยต่อของรอยเชื่อม

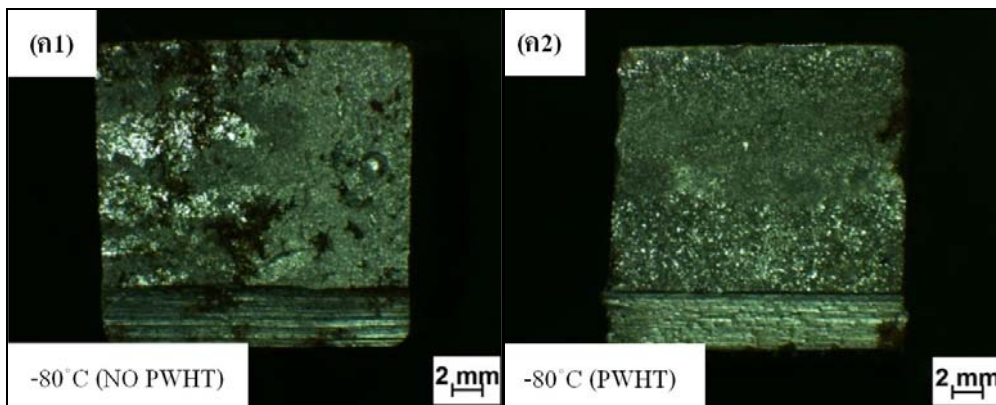




รูปที่ 7 ค่าการดูดซับพลังงานในบริเวณกระทบร้อนที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ



รูปที่ 8 ผิวหน้าการแตกหักในบริเวณกระทบร้อนของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม จากการทดสอบแรงกระแทกที่อุณหภูมิ: (ก) 25°C; (ข) -40°C และ (ค) -80°C



รูปที่ 8 ผิวหน้าการแตกหักในบริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม จากการทดสอบแรงกระแทกที่อุณหภูมิ: (ก) 25°C; (ข) -40°C และ (ค) -80°C (ต่อ)

สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมพบว่า มีค่าการดูดซับพลังงานเท่ากับ 104, 33.5 และ 6 จูลล์ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิทดสอบเดียวกัน จากผลการทดสอบแสดงว่า บริเวณกระทบบร้อนของชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีความเหนียวมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม อันเป็นผลมาจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมได้มีการปรับปรุงสมบัติความเหนียวมากในชิ้นงานเชื่อมให้ดีขึ้น [4-6] ยกเว้นที่อุณหภูมิทดสอบ -80°C ซึ่งทั้งชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าการดูดซับพลังงานใกล้เคียงกัน แสดงว่าที่อุณหภูมิดังกล่าว ชิ้นงานมีพฤติกรรมการแตกหักเหมือนกัน แม้ว่าชิ้นงานได้ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมาแล้วก็ตาม และเมื่อทำการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก (รูปที่ 8(ก2)) พบว่า ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ผิวหน้าการแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีความหยาบ ผิวค่อนข้างเรียบ และมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างฉับพลันหรือมีการยืดตัวก่อนเกิดการแตกหัก (รูปที่ 9) แสดงว่าชิ้นงานเกิดการแตกหัก

แบบเหนียว ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิทดสอบลดลงไปที่ -40 และ -80°C (รูปที่ 8(ข2) และ 8(ค2)) พบว่าผิวหน้าการแตกหักมีความวาว ผิวค่อนข้างเรียบ และแทบไม่พบการเปลี่ยนรูปร่างอย่างฉับพลันหรือมีการยืดตัว (รูปที่ 9) แสดงว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบเปราะ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้เช่นกัน

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบบร้อนที่ส่งผลต่อความเหนียวมากพบว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมส่วนใหญ่ประกอบด้วยโครงสร้างมาเทนไซต์ อันเป็นโครงสร้างที่เปราะมาก ขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมประกอบด้วยโครงสร้างเทมเปอร์มาเทนไซต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความเหนียวมากขึ้น [15] โดยสอดคล้องกับค่าการดูดซับพลังงานที่ได้ จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีความเหนียวมากกว่า ซึ่งทำให้ยากต่อการเกิดรอยแตกเร็วหรือการขยายตัวของรอยแตกเร็วได้มากกว่า



รูปที่ 9 ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม หลังการทดสอบแรงกระแทกที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ

#### 4. สรุปผล

จากการวิจัยพบว่า เมื่อทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ค่าความแข็งทั้งบริเวณกระทันและบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมใน ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม มีค่าลดลง เนื่องจากการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อม นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่ออุณหภูมิการทดสอบแรงกระแทกลดต่ำลง ชิ้นงานเชื่อมทั้งสองสถานะมีค่าการดูดซับพลังงานลดลง อันแสดงถึงการที่วัสดุมีความสามารถในการรับแรงกระแทกหรือความเหนียวบวกลดลง โดยบริเวณกระทันของชิ้นงานที่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าความเหนียวบวกลดต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม เนื่องจากบริเวณดังกล่าวประกอบด้วยโครงสร้างเทมเปอร์มาเทนไซต์ อันเป็นผลจากการที่โครงสร้างมาเทนไซต์ซึ่งแข็ง และเปราะ ได้รับความร้อนซ้ำจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุ (Center of excellence in materials engineering; CEME) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Hanvirotkul, "Low-alloy Steels for Machinery", Journal of Materials Technology 62, 2011, pp. 8-12. (in Thai)
- [2] J.C. Lippold, "Welding Metallurgy Principles", In "Welding Metallurgy and Weldability", John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, 2015.
- [3] S. Tenghongcharoen, "Effect of Heat on the Weldment", In "Welding Engineering", Academic Promotion Centre Publishing House, Bangkok, 2006. (in Thai)
- [4] R.S. Funderburk, "Key Concepts in Welding Engineering: Postweld Heat Treatment", Welding Innovation XV, 1998.
- [5] S. Yamamoto, "Arc Welding of Heat-Resistant Low-alloy Steel", In "Arc Welding of Specific Steels and Cast Irons (4<sup>th</sup> Eds.)", Shinko Welding Service Co., Ltd, Japan, 2011.

- [6] K. Ahmed and J. Krishnan, “Post-Weld Heat Treatment–Case Studies”, BARC Newsletter, Founder's Day Special Issue, 2002, pp. 111-115.
- [7] ASME Standards, “B31.1: Power Piping”, ASME, 2016.
- [8] ASTM Standards, “E407: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys”, ASTM, 1999.
- [9] ASTM Standards, “E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”, ASTM, 1998.
- [10] B. Srikarun and P. Muangjunburee, “Wear Behavior of Hardfacing Deposits on 3.5% Chromium Cast Steel, Key Engineering Materials 658, 2015, pp. 167-171.
- [11] D. Gandy, “Grade 22 Low Alloy Steel Handbook”, Technical Report, No. 1012840, EPRI, California, 2005, pp. 1-79.
- [12] K. Ichikawa, Y. Horii, A. Sueda and J. Kobayashi, “Toughness and Creep Strength of Modified 2.25Cr-1Mo Steel Weld Metal”, Welding Journal, 1995, pp. 230-s – 238-s.
- [13] M.S. Kaiser, “Effect of Heat Input on the Weld Metal Toughness of Chromium-Molybdenum Steel”, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials Metallurgical Engineering 7, 2013, pp. 33-35.
- [14] E.S. Mosa, H.M. Abdelaziz, M.A. Morsy, A.E. Abdelmaoula and A. Atlam, “Investigation on the Influence of Post Weld Heat Treatments on Weldments between P91 and P11”, International Research Journal of Engineering and Technology 3, 2016, pp. 833-841.
- [15] W.D. Callister and D.G. Rethwisch, “Phase Transformations: Development of Microstructure and Alteration of Mechanical Properties”, In “Materials Science and Engineering: An Introduction (8<sup>th</sup> Eds.)”, John Wiley and Sons, Inc., USA, 2009.