

การประยุกต์ใช้ DMAIC ในการเชื่อมซ่อมโครงสร้างเตาเผาสุญญากาศ ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม SS310S

Application of DMAIC to Repair Welding of Vacuum Furnace Structures Made of SS310S Stainless Steel

พิชา พันธุ์มงคล^{1*}, เวทรินทร์ อธิจิระสิงห์¹, ธนิต แต่งศรี¹, วิษณุ พึ่งขุนทด²,
นพกร ภูระยา³, ศศิรัศม์ ไชยดีสูงเนิน^{4,5}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

²วิศวกรโครงการ บริษัท เออีซี อินดัสเตรียล เซอร์วิส จำกัด

³ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

⁵ศูนย์วิจัยเพื่อความยั่งยืนและวัสดุขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Picha Panmongkol^{1*}, Wetarin Atijirasing¹, Tanit Tangsri¹, Wissanu Pongkuntod²,

Noppakorn Phuraya³, Sasirat Chaideesungnoen^{4,5}

¹Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University

²Project Engineer, AEC INDUSTRIAL SERVICES CO., LTD.

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University

⁴Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

⁵Research Center for Sustainable and Advanced Materials (CSAM),

Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

*Corresponding author Email: picha.p@thonburi-u.ac.th

(Received: November 05, 2025 / Revised: June 11, 2026 / Accepted: June 23, 2026)

บทคัดย่อ

กรณีศึกษาการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมซ่อมผนังเตาเผาสุญญากาศเกรด SS310S ที่ผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งประสบปัญหาการแตกร้าวขณะร้อนหลังการเชื่อมซ่อม โดยได้ประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด Lean Six Sigma (DMAIC) เพื่อวิเคราะห์และแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบ ระยะวิเคราะห์ (Analyze) พบว่าการใช้โลหะเติม ER310 ซึ่งเป็นโลหะเติมที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับกลุ่มวัสดุ SS310S ยังทำให้เกิดการแตกร้าว เนื่องจากแนวเชื่อมมีแนวโน้มประกอบด้วยโครงสร้างแบบอสเทนไนต์ทั้งหมด ซึ่งไวต่อการแตกร้าว โดยเฉพาะเมื่อเชื่อมบนวัสดุฐานที่เสื่อมสภาพ (Aged Material) ระยะปรับปรุง (Improve) จึงได้นำเสนอการใช้โลหะเติมแบบผสม โดยใช้ ER309L เป็นชั้นบัพเฟอร์ในแนวเชื่อมชั้นที่ 1-3 เพื่อสร้างโครงสร้างอสเทนไนต์กับเฟอไรต์ (AF Mode) ที่ต้านทานการแตกร้าว จากนั้นจึงเชื่อมปิดผิวหน้าในชั้นที่ 4 ด้วยโลหะเติม ER310 เพื่อให้ได้สมบัติทนอุณหภูมิสูงที่ผิวหน้า ซึ่งการเชื่อมด้วย ER310 ในชั้นนี้ไม่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากผลของชั้นบัพเฟอร์ ER309L ที่อยู่ข้างใต้ ในระยะควบคุม (Control) ผลการใช้งานจริงต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 ปี สนับสนุนว่าแนวทางการเชื่อมซ่อมดังกล่าวสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่พบการแตกร้าวหรือการหยุดเสียของเตาเผา (Breakdown) ใดๆ แนวทางที่ได้รับการสนับสนุนจากผลการใช้งานจริงนี้จึงถูกจัดทำเป็นมาตรฐานขั้นตอนปฏิบัติงาน (SOP) สำหรับการซ่อมบำรุงเตาเผาอื่นภายในโรงงานต่อไป จากการคาดการณ์ด้วยแผนภาพชีพจรพบว่าสภาวะ ER310 + SS310S ที่การเจือจางเท่ากับ 30% มีแนวโน้มให้โครงสร้างอสเทนไนต์ทั้งหมด หรือมีเดลต้าเฟอร์ไรต์ต่ำมาก (<3%) ขณะที่สภาวะ ER309L + SS310S ให้โครงสร้างอสเทนไนต์กับเฟอไรต์ ที่มีเดลต้าเฟอร์ไรต์ประมาณ 8% และหลังการปรับปรุงโดยควบคุม อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อมไม่เกิน 150°C ไม่พบรอยแตกร้าวจากการทดสอบด้วยสารแทรกซึมและไม่พบ Breakdown ตลอดการติดตามผล 1 ปี

คำสำคัญ: การเชื่อมซ่อม, เหล็กกล้าไร้สนิม SS310S, การแตกร้าวขณะร้อน, ชั้นบัพเฟอร์, ER309L, ER310, DMAIC, แผนภาพชีพจร

Abstract

This research presents a case study on improving the repair welding process for a heat-exposed SS310S stainless steel vacuum furnace, which suffered from persistent hot cracking post-repair. The study applied the Lean Six Sigma (DMAIC) framework to systematically analyze and resolve the issue. The "Analyze" phase confirmed that using the standard ER310 matching filler metal failed due to the formation of a fully austenitic microstructure. This structure is highly susceptible to cracking, especially when welding on the aged (sensitized) base material. The "Improve" phase, therefore, implemented a Composite Filler Metal. This involved using ER309L as buffer layers (Passes 1-3) to establish a crack-resistant Austenite with Ferrite (AF Mode) microstructure. Subsequently, the cover pass (Pass 4) was completed using the ER310 filler metal to restore the original high-temperature properties at the surface. This final ER310 pass did not crack due to the positive metallurgical influence of the underlying ER309L buffer layers. In the "Control" phase, the repair's integrity was supported by one full year of continuous furnace operation with no subsequent cracking or breakdown observed. The field-supported methodology has been established as a Standard Operating Procedure (SOP) for all future SS310S furnace maintenance within the facility. Schaeffler Diagram prediction indicated that ER310 + SS310S at 30% dilution was located in the fully austenitic region or contained very low delta ferrite (<3%), whereas ER309L + SS310S produced an Austenite with Ferrite structure with approximately 8% δ -ferrite. After the improved procedure with an interpass temperature not exceeding 150°C, PT inspection showed no cracking and no breakdown was observed during one year of service monitoring.

Keywords: Repair welding, SS310S stainless steel, Hot cracking, Buffer layer, ER309L, ER310, DMAIC, Schaeffler diagram

1. บทนำ

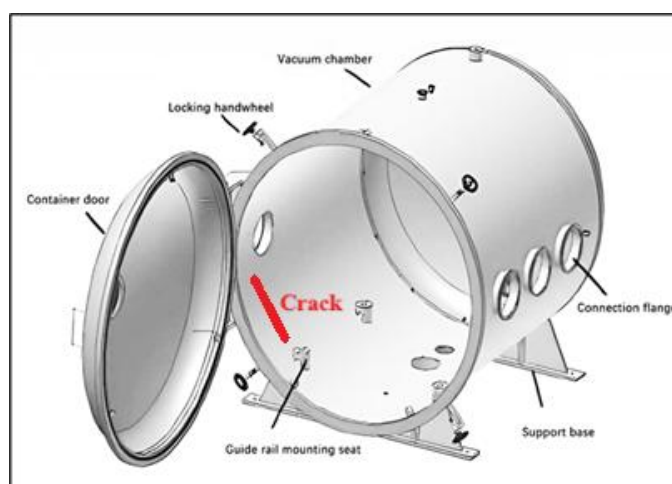
ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการให้ความร้อน เตาเผาสุญญากาศ (Vacuum Furnace) ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการให้ความร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำหรือสุญญากาศ เพื่อลดปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์ เช่น การเกิดออกซิเดชันและการเกิดคราบสกปรกบนพื้นผิวชิ้นงาน เตาเผาสุญญากาศมักถูกใช้ในกระบวนการทางโลหวิทยา เช่น การชุบแข็ง (Heat Treatment) การเผาผนึก (Sintering) และการเผาไล่สารระเหย (Brazing & Degassing) เตาเผาสุญญากาศถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมโลหวิทยาขั้นสูง เช่น การผลิตใบพัดกังหัน (Turbine Blades), การผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน (Aerospace Components), อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive Industry) และอุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ (Medical Instruments) อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้งานเป็นเวลานาน วัสดุโครงสร้างของเตาเผามีโอกาสเสื่อมสภาพจากการสัมผัสอุณหภูมิสูงซ้ำๆ ทำให้เกิดรอยแตกร้าว ซึ่งต้องได้รับการซ่อมแซมด้วยกระบวนการเชื่อม

ในกรณีศึกษา เตาเผาสุญญากาศถูกใช้ในการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิประมาณ 1000-1200°C เตาเผาผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลานานถึง 7 ปี อาจส่งผลให้เสื่อมสภาพวัสดุโครงสร้างของเตาเผาได้ ในกรณีที่มีการใช้งานที่ผิดปกติหรือมีปัญหาในการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา จากกรณีศึกษานี้ตรวจสอบพบว่าบริเวณผนังด้านในใกล้ปากทางเข้าเตา เกิดการเสื่อมสภาพจนเกิดรอยแตกร้าวที่ถูกตรวจพบด้วยการทดสอบด้วยสารแทรกซึม (Penetrant Testing - PT) ดังแสดงในรูปที่ 2 การเสื่อมสภาพนี้อาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากความร้อน การสะสมของออกไซด์และความเค้นตกค้างที่สะสมในวัสดุ เมื่อพบรอยแตกร้าว การซ่อมแซมด้วยกระบวนการเชื่อมเป็นแนวทางที่ถูกเลือกใช้ การเลือกพารามิเตอร์การเชื่อมเป็นปัจจัยที่สำคัญ ตัวแปรในการเชื่อม (Welding Parameters) ที่ส่งผลต่อความสำเร็จของการเชื่อมซ่อม การเลือกกระบวนการเชื่อม โลหะเติม (Filler Material) กระแสไฟฟ้า (Welding Current) ความเร็วในการเชื่อม (Welding Speed) และอัตราการนำความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat Input) ล้วนมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) หากมีการเลือกค่าพารามิเตอร์และโลหะเติมที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดการแตกร้าวหลังการเชื่อม (Hot Crack หรือ Solidification Crack) ได้ [1-4]

การเลือกใช้ตัวแปรการเชื่อมและโลหะเติมที่เหมาะสมมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของแนวเชื่อม เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S มีแนวโน้มเกิดการแตกร้าร้อน (Hot Crack หรือ Solidification Crack) สูงเมื่อทำการเชื่อม เนื่องจากเป็นวัสดุที่แข็งตัวในโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) ซึ่งไม่มีเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) ช่วยลดการแตกร้า [5] เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมโครเมียม-นิกเกิลที่มีปริมาณโครเมียมและนิกเกิลสูง โดยองค์ประกอบทางเคมีที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A240 TP310S [6] ในการศึกษาเชิงทดลองนี้ใช้โลหะเติมเกรด ER309L และ ER310 เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อการสร้างแนวเชื่อมและความต้านทานการแตกร้า โดยองค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมดังกล่าวอ้างอิงตามมาตรฐาน AWS A5.9/A5.9M สำหรับลวดเชื่อมและแท่งเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [7]

นอกจากนี้ การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม 310S ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค เช่น การเสื่อมสภาพจากการคืบ การเกิดคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน หรือการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการกัดกร่อนหลังสัมผัสสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจทำให้วัสดุฐานมีความไวต่อการแตกร้ามากกว่าวัสดุในสภาพใหม่ [8–9] ดังนั้น บทความนี้จะนำเสนอกรณีศึกษาเกี่ยวกับปัญหาที่พบบ่อยระหว่างการเชื่อมซ่อมโครงสร้างเตาเผาสุญญากาศ ซึ่งผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S รวมถึงแนวทางการแก้ไขโดยอาศัยหลักการทางโลหวิทยาและการปรับตัวแปรการเชื่อมให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการแตกร้าและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างเตาเผาสุญญากาศซึ่งผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมาแล้ว

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมในสภาวะวัสดุใหม่ การเปรียบเทียบพารามิเตอร์การเชื่อม หรือการประเมินสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคเป็นหลัก ขณะที่งานศึกษาการเชื่อมซ่อม SS310S ที่ผ่านการใช้งานอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานในสภาพอุตสาหกรรมจริงยังมีจำกัด งานวิจัยล่าสุดที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าขณะร้อนของ AISI 310S แสดงให้เห็นว่าปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์และธาตุบางชนิด เช่น S, P และ Si มีผลต่อความไวต่อการแตกร้าระหว่างการแข็งตัวของแนวเชื่อม ขณะที่งานด้านเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนติก การเสื่อมสภาพของ 310S จากความร้อน และการใช้ชั้นเชื่อมทับหรือชั้นบัพเฟอร์ ช่วยสนับสนุนว่าการควบคุมโครงสร้างจุลภาคและการเลือกโลหะเติมมีความสำคัญต่อความต้านทานการแตกร้า [10–13] ในขณะเดียวกัน งานด้าน Lean Six Sigma และ DMAIC ในกระบวนการอุตสาหกรรมสะท้อนให้เห็นว่ากรอบ DMAIC สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ วิเคราะห์สาเหตุ ปรับปรุง และควบคุมผลลัพธ์ของกระบวนการได้อย่างเป็นระบบ [14–15] ดังนั้น ช่องว่างของงานวิจัยนี้คือการบูรณาการการออกแบบโลหะเติมเชิงโลหวิทยาร่วมกับ DMAIC เพื่อควบคุมและยกระดับกระบวนการเชื่อมซ่อม SS310S ที่ผ่านการใช้งานอุณหภูมิสูงในสภาพอุตสาหกรรมจริงอย่างเป็นระบบ



รูปที่ 1 เตาเผาสุญญากาศ (Vacuum Furnace)



รูปที่ 2 บริเวณผนังด้านในใกล้ปากทางเข้าที่ตรวจพบรอยแตกร้าวก่อนทำการเชื่อมซ่อม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อวิเคราะห์สาเหตุเชิงโลหะการของการเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) ในการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าไร้สนิม SS310S ที่ผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Aged Material)
- 2) เพื่อประเมินแนวทางการใช้ ER309L เป็นชั้นบัฟเฟอร์ร่วมกับ ER310 เป็นชั้นปิดผิวหน้า ในการลดการแตกร้าวของแนวเชื่อมซ่อม SS310S ที่ผ่านการใช้งานอุณหภูมิสูง
- 3) เพื่อประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด DMAIC ในการกำหนดปัญหา วัดผล วิเคราะห์สาเหตุ ปรับปรุง และควบคุม กระบวนการเชื่อมซ่อม จนนำไปสู่แนวทางมาตรฐานสำหรับการใช้งานจริงในโรงงาน

1.3 ขอบเขต

เพื่อให้การศึกษามีความชัดเจนและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง โครงการนี้ถูกกำหนดขอบเขตดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษานี้มุ่งเน้นกรณีศึกษาการเชื่อมซ่อมเตาเผาสุญญากาศที่ผลิตจาก SS310S ซึ่งผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000-1200°C มานานกว่า 7 ปี (Aged Material)
- 2) การวิเคราะห์เชิงโลหะการจะประยุกต์ใช้ Schaeffler Diagram เพื่อคาดการณ์โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมในกรณีหลัก ได้แก่ ER310 + SS310S, ER309L + SS310S และ ER310 Cover Pass บนชั้นบัฟเฟอร์ ER309L
- 3) แนวทางการปรับปรุงกระบวนการอยู่ภายใต้กรอบแนวคิด DMAIC และมุ่งเน้นการใช้เทคนิคโลหะเติมแบบผสม (Filler Metal Technique) ร่วมกับการควบคุมตัวแปรสำคัญ เช่น อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม (Interpass Temperature)
- 4) การประเมินความสำเร็จของแนวเชื่อมซ่อม จะใช้การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Penetrant Testing - PT) และการติดตามผลการใช้งานจริง (In-service Monitoring) เป็นระยะเวลา 1 ปี
- 5) ข้อจำกัดการศึกษา: การศึกษานี้มุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาหน้างานจริง จึงไม่รวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเชิงลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscopy) หรือการทดสอบเชิงกลแบบทำลาย (Destructive Testing) การตีความผลจึงอยู่บนหลักฐานจากข้อมูลหน้างาน การตรวจ VT/PT การคาดการณ์ด้วยแผนภาพแชฟเฟลอร์ (Schaeffler Diagram) และการติดตามผลการใช้งานจริง

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดของงานเชื่อมซ่อมของผนังเตาทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S หนา 6 มม. ที่ผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000-1200°C ที่ผ่านการใช้งานเตาเป็นเวลานาน แล้วตรวจพบรอยแตกร้าว (ดังแสดงในรูปที่ 2) ด้วยข้อจำกัดหน้างานไม่สามารถดำเนินการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีที่หน้างานได้ โดยองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A240 TP310S [6] แสดงในตารางที่ 1

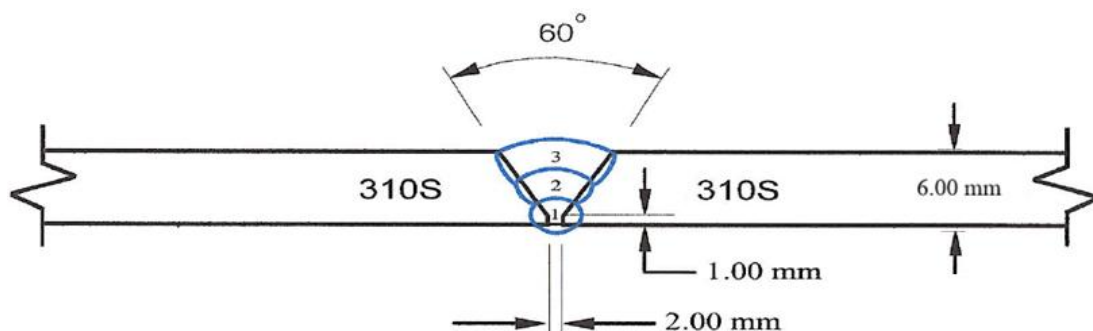
การกำหนดตัวแปรในการศึกษา (เสนอเพิ่มตามข้อเสนอแนะผู้ทรงคุณวุฒิ): การศึกษานี้เป็นกรณีศึกษาเชิงอุตสาหกรรม ไม่ใช้การออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นตัวแปรต้นหลักคือชนิดโลหะเติมและลำดับชั้นแนวเชื่อม ได้แก่ ER310 โดยตรง และ ER309L เป็น Buffer Layers ร่วมกับ ER310 เป็น Cover Pass ตัวแปรควบคุม ได้แก่ การเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีล (GTAW) ขนาดลวดเชื่อม กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม และ อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม ตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ การพบหรือไม่พบรอยแตกร้าวจาก VT/PT และผลการติดตามการใช้งานจริง 1 ปี ส่วนตัวแปรวิเคราะห์ ได้แก่ Cr_{eq} , Ni_{eq} , การเจือจาง (Dilution) และโซนโครงสร้างที่คาดการณ์จาก แผนภาพแชฟเฟลอร์ (Schaeffler Diagram)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S [6]

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%)
คาร์บอน (C)	สูงสุด 0.08
แมงกานีส (Mn)	สูงสุด 2.00
ซิลิกอน (Si)	สูงสุด 1.50
โครเมียม (Cr)	24.00–26.00
นิกเกิล (Ni)	19.00–22.00
ฟอสฟอรัส (P)	สูงสุด 0.045
กำมะถัน (S)	สูงสุด 0.030
เหล็ก (Fe)	ส่วนที่เหลือ (Balance)

2.2 การเตรียมรอยต่อการเชื่อมซ่อม

รอยต่อที่ใช้ในงานเชื่อมซ่อมผนังเตาจุดที่พบรอยแตกร้าวถูกเตรียมในรูปแบบ Single V Groove ซึ่งมีการบากขอบของชิ้นงานให้เป็นรูปตัว V ด้านเดียว โดยกำหนด มุมรอยบากที่ 60° พร้อมทั้งกำหนดรากของรอยต่อ (Root Gap) ขนาด 2.00 mm และกำหนดระยะขอบราก (Root Face) ที่ 1.00 mm ก่อนทำการเชื่อม ทำความสะอาดขอบรอยบากด้วยการเจียรหรือขัดผิว เพื่อขจัดสิ่งสกปรกและออกไซด์ ป้องกันการปนเปื้อนที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รอยต่อที่ใช้ในงานเชื่อมเป็นแบบ Single V Groove

2.3 พารามิเตอร์การเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อม

พารามิเตอร์การเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมถูกควบคุมตัวแปรต่างๆที่สำคัญตามเอกสารข้อกำหนดขั้นตอนการเชื่อม (Welding Procedure Specification; WPS) และเอกสารรวบรวมรายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนและข้อกำหนดงานเชื่อม (Procedure Qualification Record; PQR) ของชิ้นงานทดสอบ โดยมีรายละเอียดที่สำคัญแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดขั้นตอนการเชื่อมและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อม

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการเชื่อม
กระบวนการเชื่อม (Welding Process)	GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)
โลหะเติม (Filler Metal)	ER310 ER309L
ขนาด (Filler Metal Size)	Ø 2.4 mm
กระแสเชื่อม (Welding Current)	50-150 A
แรงดันเชื่อม (Welding Voltage)	8-14 V
ขั้วไฟฟ้า (Polarity)	DCEN (Direct Current Electrode Negative)
ความเร็วในการเชื่อม (Travel Speed)	3-12 cm/min
อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม (Shielding Gas Flow Rate)	Argon 5-15 l/min
อัตราการไหลของแก๊สป้องกันด้านหลัง (Backing Gas Flow Rate)	Argon 5-15 l/min
อุณหภูมิก่อนการเชื่อมต่ำสุด (Preheat Temp. Min.)	10°C
อุณหภูมิสูงสุดระหว่างชั้นแนวเชื่อม (Interpass Temp. Max.)	150°C
การบำรุงรักษาอุณหภูมิ (Preheat Maintenance)	Cool in still air
อุณหภูมิหลังการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment; PWHT)	ไม่มี (NO PWHT)

2.4 โลหะเติม (Filler Metal) ที่ใช้ในการเชื่อม

ในการดำเนินการเชื่อมผอมนิ่งเตาเผาสุญญากาศที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S การวางแผนและการปรับพารามิเตอร์การเชื่อมตามเอกสาร WPS เป็นสิ่งสำคัญ โดยในการศึกษานี้แผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) [5] ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยคาดการณ์โครงสร้างจุลภาค ได้เลือกใช้โลหะเติมทั้งหมด 2 ประเภท คือ ER310 และ ER309L เพื่อเปรียบเทียบผลของโลหะเติมที่แตกต่างกันต่อแนวโน้มการเกิดรอยแตกร้าวในแนวเชื่อม (Weld Metal) ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมเกรด ER310 และ ER309L ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมครั้งนี้ ซึ่งข้อมูลนี้อ้างอิงจากมาตรฐาน AWS A5.9/A5.9M:2017 [7]

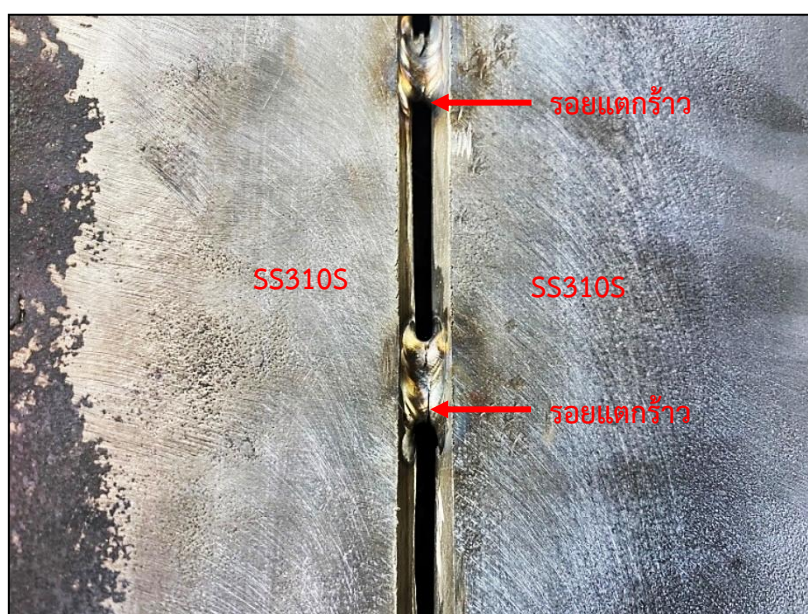
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมเกรด ER309L และ ER310

ธาตุ	ER310 (% โดยน้ำหนัก)	ER309L (% โดยน้ำหนัก)
คาร์บอน (C)	สูงสุด 0.08	สูงสุด 0.03
ซิลิกอน (Si)	สูงสุด 1.00	สูงสุด 1.00
แมงกานีส (Mn)	สูงสุด 2.00	1.00–2.50
ฟอสฟอรัส (P)	สูงสุด 0.03	สูงสุด 0.03
กำมะถัน (S)	สูงสุด 0.03	สูงสุด 0.03
โครเมียม (Cr)	25.0–28.0	22.0–25.0
นิกเกิล (Ni)	19.0–22.0	12.0–14.0
โมลิบดีนัม (Mo)	ไม่ระบุ	สูงสุด 0.75
เหล็ก (Fe)	ส่วนที่เหลือ (Balance)	ส่วนที่เหลือ (Balance)

3. ผลการดำเนินงาน

3.1 ผลการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER310

โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุม (Gas Tungsten Arc Welding; GTAW) และควบคุมตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ กระแสเชื่อมในช่วง 116–118 แอมป์ แรงดันเชื่อมในช่วง 10–11 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 6.8 เซนติเมตร ต่อนาที โดยใช้โลหะเติม ER310 ขนาด $\varnothing$ 2.4 มิลลิเมตร ในระหว่างการเชื่อมได้ควบคุมก๊าซอาร์กอนเป็น 2 ส่วน ได้แก่ แก๊สปกคลุมด้านหน้าแนวเชื่อมที่อัตราการไหล 12 L/min เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากบรรยากาศบริเวณบ่อหลอม และแก๊สป้องกันด้านหลังแนวเชื่อมที่อัตราการไหล 10 L/min เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันบริเวณรากแนวเชื่อมและผิวด้านในของชิ้นงาน



รูปที่ 4 รอยเชื่อมที่ใช้โลหะเติมเกรด ER310 พบรอยแตกร้าว (Crack)

หลังการเชื่อมแนวเชื่อมราก (Root Pass) ดำเนินการตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ (Visual Inspection; VT) พบว่าเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking หรือ Solidification Cracking) ทันทีหลังจากหยุดเชื่อม ซึ่งเป็นรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในช่วงที่แนวเชื่อมแข็งตัว ยังไม่เย็นตัวเต็มที่ โดยรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นในเฟสกึ่งของแข็ง (Mushy Zone) ซึ่งเป็นช่วงที่โลหะยังไม่แข็งตัวสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม สมมติฐานการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา จากการใช้โลหะเติมเกรด ER310 จะให้โครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) ในแนวเชื่อม ซึ่งมีแนวโน้มต่อการแตกร้าวร้อน เนื่องจากไม่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ช่วยดูดซับมลทินในขณะแข็งตัวและลดความเค้นตกค้าง นอกจากนี้ ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัวของโลหะเชื่อม รวมถึงการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม อาจเป็นปัจจัยที่กระตุ้นให้เกิดการแตกร้าวได้ง่ายขึ้น และ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) ที่มีนิกเกิล (20–22%) และโครเมียม (24–26%) สูง ทำให้แข็งตัวเป็นออสเทนไนต์เป็นหลัก แต่การใช้งานในเตาอบความร้อนที่อุณหภูมิเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อการสร้างจุลภาค เนื่องจากวัสดุที่ผ่านการใช้งาน (Aged Material) มีแนวโน้มสูงที่จะเกิดอาจมีการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium Carbide Precipitation; Cr_{23}C_6) ที่ขอบเกรน ส่งผลให้ขอบเกรนเปราะและมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวได้ง่ายขึ้น [8-9] เพราะสิ่งที่กำลังเชื่อมซ่อมไม่ใช่ SS310S ในสภาพปกติ (As-delivered) แต่เป็น Aged/Sensitized SS310S ซึ่งมีความเปราะและไวต่อการแตกร้าวสูงกว่าปกติ การที่ขอบเกรนเปราะ (จากการตกตะกอนคาร์ไบด์) อาจเป็นปัจจัยร่วมที่สำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้เกิดการแตกร้าว ไม่ใช่แค่เพียงโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) ของโลหะเติมเกรด ER310 เพียงเท่านั้น

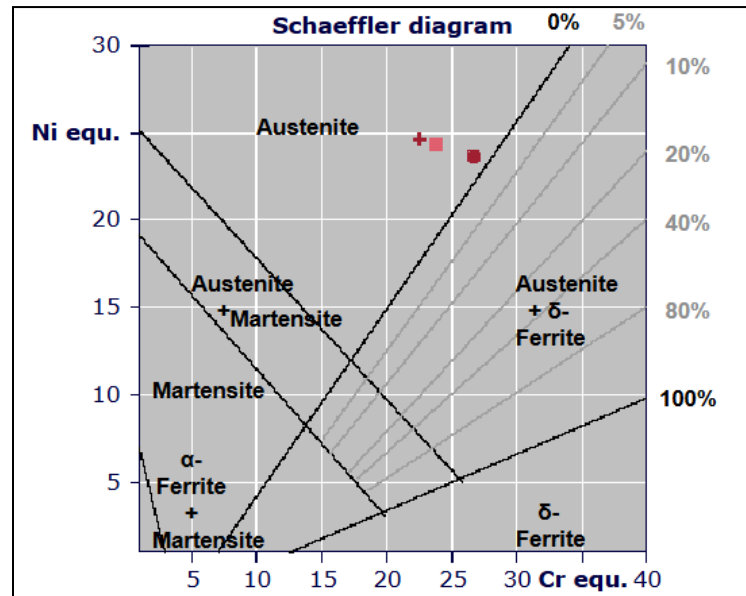
จากการวิเคราะห์โครงสร้างของแนวเชื่อมด้วยแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) สามารถบอกองค์ประกอบทางเคมี จะทำให้ทราบถึงการเกิดโครงสร้างจุลภาค ผ่านค่านิกเกิลเทียบเท่า (Nickel Equivalent; Ni_{eq}) หรือค่าโครเมียมเทียบเท่า (Chromium Equivalent; Cr_{eq}) ใช้ในการคาดการณ์โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมที่เกิดจากการผสมของโลหะฐาน (Base Metal) และโลหะเติม (Filler Metal) โดยใช้ค่าศักยภาพเฟอร์ไรต์ (Ferrite Number, FN) และสมดุลเฟสของธาตุหลัก ด้วยการคำนวณ Equivalent Factors Chromium Equivalent (Cr_{eq}) และ Nickel Equivalent (Ni_{eq}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบทางเคมีของโลหะฐาน และโลหะเติม

โดยใช้แผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) มีสมการดังนี้:

$$\text{Chromium Equivalent (Cr}_{\text{eq}}) = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1.5 \times \% \text{Si} + 0.5 \times \% \text{Nb} \quad (1)$$

$$\text{Nickel Equivalent (Ni}_{\text{eq}}) = \% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0.5 \times \% \text{Mn} \quad (2)$$

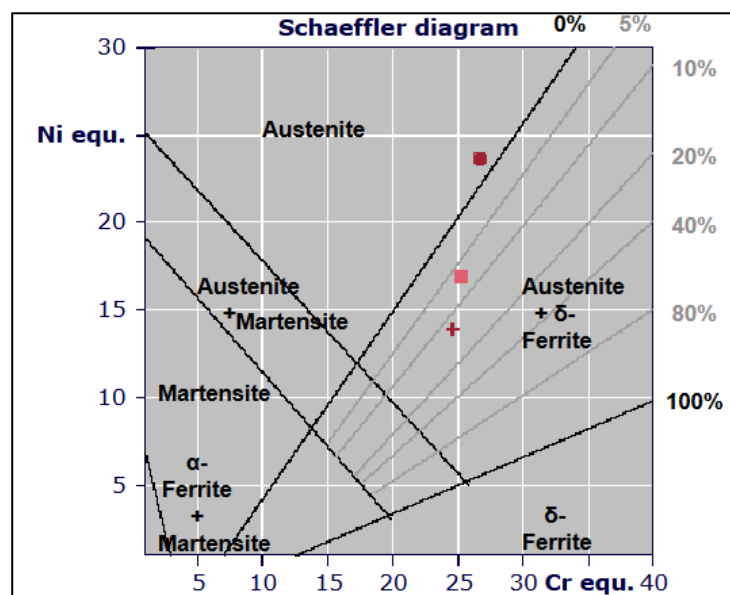
จากการคำนวณพบว่า เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S มีค่า $\text{Cr}_{\text{eq}} = 26.80$ และ $\text{Ni}_{\text{eq}} = 23.60$ ในขณะที่โลหะเติมเกรด ER310 มีค่า $\text{Cr}_{\text{eq}} = 22.55$ และ $\text{Ni}_{\text{eq}} = 24.60$ เมื่อพิจารณาการเจือจางของโลหะฐานที่ (Dilution) ที่ 30% (โลหะฐาน (SS310S) มีสัดส่วน 30% และ (ER310) มีสัดส่วน 70%) และนำค่าที่คำนวณได้ไปพล็อตลงในแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) พบว่าจุดที่ได้จาก $\text{Cr}_{\text{eq}} = 23.83$ และ $\text{Ni}_{\text{eq}} = 24.30$ จะอยู่ในโซนบริเวณออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) (ดังแสดงในรูปที่ 5) หรืออาจมีเดลต้าเฟอร์ไรต์ในปริมาณเล็กน้อย (<3% Delta Ferrite) ซึ่งบ่งชี้ว่าแนวเชื่อมมีแนวโน้มพบปริมาณเฟอร์ไรต์ต่ำมาก ทำให้มีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวขณะร้อน ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับการทดลองเชื่อมจริง ซึ่งพบ รอยแตกร้าวในแนวเชื่อม (ดังแสดงในรูปที่ 4) โดยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่เป็นออสเทนไนต์ 100% หรือมีเฟอร์ไรต์ต่ำมาก ไม่สามารถป้องกันการแตกร้าวขณะร้อนในระหว่างการแข็งตัวของโลหะเชื่อมได้ โดยโครงสร้างที่เหมาะสมในการป้องกันปัญหาดังกล่าวควรมีปริมาณเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมอยู่ในช่วง 3-10% เพื่อให้แนวเชื่อมแข็งตัวเป็นออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์จำนวนเล็กน้อย (Austenitic with Small Ferrite; AF Mode) ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการแตกร้าวในระหว่างการแข็งตัวของแนวเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4-5] ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกใช้โลหะเติม ER309L ในการทดลองขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 5 แผนภาพแชฟเฟอร์ (Schaeffler Diagram) กรณีใช้โลหะเติม ER310

3.2 ผลการเชื่อมด้วยโลหะเติม ER309L

เพื่อแก้ไขปัญหาการเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) ซึ่งเกิดขึ้นทันทีหลังจากหยุดเชื่อมจากการใช้โลหะเติมเกรด ER310 ได้ทำการใช้แผนภาพแชฟเฟอร์ (Schaeffler Diagram) เป็นเครื่องมือในการคาดการณ์โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมใหม่ โดยพิจารณาโลหะเติมเกรด ER309L ที่มีค่า $Cr_{eq} = 24.40$ และ $Ni_{eq} = 14.85$ และคำนวณการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีจากการเจือจางของโลหะฐาน SS310S ที่อัตราส่วน Dilution 30% (โดยโลหะฐานมีสัดส่วน 30% และ ER309L มีสัดส่วน 70%) จากการคำนวณพบว่าค่าที่ได้หลังการผสมในแนวเชื่อมคือ $Cr_{eq} = 25.12$ และ $Ni_{eq} = 17.47$ เมื่อพล็อตลงในแผนภาพแชฟเฟอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 6) พบว่าจุดที่ได้อยู่ในโซนออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์ (~8% δ -Ferrite) ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างของแนวเชื่อมจะประกอบไปด้วย ออสเทนไนต์ + เฟอร์ไรต์ (AF Mode)



รูปที่ 6 แผนภาพแชฟเฟอร์ (Schaeffler Diagram) กรณีใช้โลหะเติม ER309L

ในการทดลองเชื่อมซ่อมโครงสร้าง เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ได้ดำเนินการตาม WPS ที่กำหนด โดยควบคุมตัวแปรที่สำคัญ แสดงในตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบแนวเชื่อมหลังการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 7 (ซ้าย) แสดงให้เห็นแนวเชื่อมราก (Root Pass) ซึ่งหลังจากการเชื่อมและเย็นตัว ไม่พบรอยแตกร้าว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแนวเชื่อมชั้นแรกสามารถต้านทานการแตกร้าวได้ดี และ จากรูปที่ 7 (ขวา) แสดงให้เห็นแนวเชื่อมทับหน้า (Cover Pass) หลังจากทำการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Penetrant Testing; PT) ซึ่งยืนยันว่า ไม่มีรอยแตกร้าวปรากฏในแนวเชื่อม แสดงให้เห็นว่าการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมและการเลือกใช้โลหะเติมที่เหมาะสมช่วยลดปัญหาการแตกร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกใช้โลหะเติมเกรด ER309L ในชั้น 1-3 เป็น "ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer)" ทางโลหการ เพื่อปรับโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม ก่อนที่จะเชื่อมแนวทับหน้า (Cover Pass) ด้วยโลหะเติมเกรด ER310 (ชั้น 4) เพื่อให้ได้สมบัติที่ผิวหน้าตรงตามวัสดุเดิม (SS310S) ซึ่งต้องทนอุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมซ่อมที่ปรับปรุงแล้ว

ลำดับ ชั้น	กระบวนการ	โลหะ เติม	ขนาดโลหะ เติม (มม.)	กระแสเชื่อม (แอมป์)/ ขั้วไฟฟ้า	แรงดัน เชื่อม (โวลต์)	ความเร็วใน การเชื่อม (ชม./นาท)	อัตราการไหลของ ก๊าซปกคลุม
1- Root Pass	GTAW	ER309L	Ø 2.4 mm	116-118/DCEN	9-10	6.1	Ar: 12 L/min
2-Hot Pass	GTAW	ER309L	Ø 2.4 mm	116-118/DCEN	10-11	6.9	Ar: 12 L/min
3-Hot Pass	GTAW	ER309L	Ø 2.4 mm	116-118/DCEN	10-11	6.8	Ar: 12 L/min
4- Cover Pass	GTAW	ER310	Ø 2.4 mm	116-118/DCEN	10-11	7.4	Ar: 12 L/min



รูปที่ 7 แนวเชื่อมราก (Root Pass) ไม่พบรอยแตกร้าว (A) และ แนวเชื่อมทับหน้า (Cover Pass) ไม่พบรอยแตกร้าว (B)

ประเด็นสำคัญของการศึกษานี้คือการวิเคราะห์ว่าเหตุใดโลหะเติมเกรด ER310 ในชั้นที่ 4 (Cover Pass) จึงไม่เกิดการแตกร้าว ทั้งๆ ที่การใช้โลหะเติมเกรด ER310 เชื่อมกับโลหะฐาน SS310S โดยตรงนั้นล้มเหลวอย่างสิ้นเชิง การเปลี่ยนแปลงของ "โลหะฐาน" สำหรับการเชื่อมในชั้นที่ 4 ซึ่งในที่นี้ไม่ใช่ SS310S อีกต่อไป แต่เป็น "เนื้อเชื่อมของชั้นที่ 3" (ER309L) ที่ได้แข็งตัวและมีโครงสร้าง AF Mode ไปแล้ว (ซึ่งมีค่าคำนวณ $Cr_{eq} = 25.12$ และ $Ni_{eq} = 17.47$) เมื่อทำการวิเคราะห์การเจือจาง (Dilution 30%) ระหว่าง โลหะเติม ER310 (ชั้น 4) กับ เนื้อเชื่อมบัฟเฟอร์ ER309L (ชั้น 3) จะได้ค่าเทียบเท่าใหม่ ดังนี้:

- Cr_{eq} (Cover Pass) = 23.32
- Ni_{eq} (Cover Pass) = 22.46

เมื่อนำจุดพิกัดใหม่ (Cr_{eq} 23.32, Ni_{eq} 22.46) ไปพล็อตลงในแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (รูปที่ 5 และ 6) จะพบว่า จุดนี้ได้ "ถูกดึง" (Pulled) ออกมาจากโซนออสเทรไรต์ (Fully Austenite) (ซึ่งอยู่ที่ Cr_{eq} 23.8, Ni_{eq} 24.3) มาอยู่ในบริเวณเส้นแบ่งเขตแดนของโซน Austenite + Ferrite (A+F) คือหลักฐานเชิงประจักษ์ที่พิสูจน์ว่า ชั้นบัฟเฟอร์ ER309L ได้ทำหน้าที่ "ปรับองค์ประกอบทางเคมี" ของเนื้อโลหะเชื่อมในชั้นสุดท้ายได้ ทำให้เนื้อเชื่อม ER310 ในชั้นที่ 4 มีปริมาณเฟอร์ไรต์แฝง (Residual Ferrite) เพียงพอที่จะป้องกันการแตกร้าวขณะร้อนได้

ผลการเกิดรอยแตกร้าวเมื่อใช้โลหะเติมเกรด ER310 โดยตรงสอดคล้องกับหลักการ Weld Solidification Cracking ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก โดยงานของ Almomani et al. รายงานว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 310S มีความไวต่อการแตกร้าวขณะร้อน (Solidification Cracking) เมื่อได้รับอิทธิพลร่วมจากธาตุ S, P, Si และปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) ต่ำ [10] ขณะที่งานของ Kadoi et al. ระบุว่าปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) ในระดับที่เหมาะสมมักช่วยลดความไวต่อการแตกร้าวขณะร้อน แต่ปริมาณที่สูงเกินไปก็อาจเพิ่มความเสี่ยงได้ จึงต้องควบคุมองค์ประกอบและโครงสร้างให้เหมาะสม [11]

สำหรับกรณีศึกษาครั้งนี้ ค่าเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) ที่คาดการณ์ได้จากสภาวะ ER309L + SS310S ประมาณ 8% จึงสนับสนุนเหตุผลเชิงโลหะวิทยาว่าการใช้โลหะเติมเกรด ER309L ทำหน้าที่เป็นชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer) เพื่อลดแนวโน้ม Fully Austenitic solidification ก่อนเชื่อมปิดผิวด้วยโลหะเติมเกรด ER310 ทั้งนี้ ควรตีความผลภายใต้ข้อจำกัดว่าค่าเฟอร์ไรต์เป็นค่าที่คาดการณ์จากแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) ไม่ใช่ค่าที่วัดโดยตรงจาก Ferrite Scope หรือการวิเคราะห์จุลภาค อีกประเด็นสำคัญคือวัสดุฐานเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด SS310S ที่ผ่านการใช้งานอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน งานของ Ma et al. แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S นี้ สามารถเกิด ความไวต่อการกัดกร่อน (Sensitization) หลังผ่านการใช้งาน (Aging) ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยสัมพันธ์กับการตกผลึกของคาร์ไบด์ (Carbide Precipitation) และการสูญเสียโครเมียม (Cr-Depletion) บริเวณขอบเกรน [12] ดังนั้น การแตกร้าวในกรณีนี้จึงควรอธิบายเป็นผลร่วมระหว่างโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) ของแนวเชื่อม ER310 ความเปราะของวัสดุฐานที่ผ่านการใช้งาน และความเค้นระหว่างการแข็งตัวของแนวเชื่อม

3.3 การประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด DMAIC

การประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด DMAIC (Define–Measure–Analyze–Improve–Control) ภายใต้ Lean Six Sigma เป็นหัวใจสำคัญของการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ที่ผ่านการใช้งานในเตาเผาสุญญากาศ โดยกรอบแนวคิดนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาอย่างเป็นระบบ ลดความสูญเสียเชิงกระบวนการ และสร้างผลลัพธ์ที่คงทนในระยะยาว

จากการดำเนินงานจริงในโรงงาน พบว่าการนำ DMAIC มาประยุกต์ใช้ไม่เพียงช่วยแก้ปัญหาเชิงเทคนิค เช่น การแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) แต่ยังช่วยยกระดับการจัดการคุณภาพในภาพรวม ตั้งแต่การระบุปัญหา การเก็บข้อมูล วิเคราะห์สาเหตุ ไปจนถึงการควบคุมผลลัพธ์ให้ยั่งยืน ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายเชิงอุตสาหกรรมที่ต้องการให้งานซ่อมบำรุงมีความเสถียร ลดความไม่แน่นอน และลดความเสี่ยงของการหยุดเสียของเตาเผา (Breakdown) การประยุกต์ใช้ DMAIC ในมิติการปรับปรุงกระบวนการมีความสอดคล้องกับงานวิจัยอุตสาหกรรมล่าสุดที่รายงานว่า Lean Six Sigma และ DMAIC ช่วยลดความสูญเสีย ปรับปรุงประสิทธิภาพ และควบคุมผลลัพธ์ของกระบวนการผลิตได้อย่างเป็นระบบ [14–15]

3.3.1 Define – การกำหนดปัญหา

ขั้นตอนแรกคือการนิยามปัญหาอย่างชัดเจน พบว่าการเชื่อมซ่อมโครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ของเตาเผาสุญญากาศเกิดรอยแตกร้าวก่อนการเชื่อมและหลังเชื่อม ส่งผลให้ต้องซ่อมซ้ำและสูญเสียเวลาการผลิต การกำหนดขอบเขตและเป้าหมายการปรับปรุง ลดอัตราการแตกร้าวเพิ่มเติมและไม่ให้เกิด Breakdown ของเครื่องจักร กำหนดทิศทางในการแก้ปัญหาที่มีความชัดเจนและวัดผลได้

3.3.2 Measure – การวัดและเก็บข้อมูล

มีการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณของแนวเชื่อมผ่านค่าพารามิเตอร์สำคัญ เช่น กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม อุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม รวมถึงข้อมูลด้านความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบด้วยการทดสอบด้วยสารแทรกซึม (PT) เพื่อเก็บข้อมูลก่อนและหลังการซ่อม ซึ่งช่วยสร้างฐานข้อมูลที่น่าเชื่อถือสำหรับการวิเคราะห์

3.3.3 Analyze – การวิเคราะห์หาสาเหตุ

จากการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ข้อมูลเชิงโลหะวิทยาและเทคนิค Lean พบว่าสาเหตุหลักของการแตกร้าวมาจากการใช้โลหะเติมเกรด ER310 ซึ่งทำให้แนวเชื่อมมีโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Fully Austenite) ที่มีปริมาณเฟอร์ไรต์ต่ำ ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) การวิเคราะห์ด้วยแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) ช่วยยืนยันผลการคาดการณ์โครงสร้างของโลหะเชื่อมและสนับสนุนข้อสรุปได้อย่างเป็นเหตุเป็นผล

3.3.4 Improve – การปรับปรุงกระบวนการ

การปรับปรุงกระบวนการ จากผลการวิเคราะห์ ได้นำมาออกแบบการปรับปรุงกระบวนการเชิงเทคนิค โดยเปลี่ยนจากการเชื่อมแบบเกรดเดียว (Single Filler) มาเป็น เทคนิคการเชื่อมแบบผสม (Composite Filler Technique) ดังนี้

1. ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layers) ใช้โลหะเติมเกรด ER309L สำหรับแนวเชื่อมราก (Root) และแนวเชื่อมเติม (Hot Pass) เพื่อสร้างโครงสร้าง AF ที่มีเฟอร์ไรต์สูง (7-8%) ซึ่งมีความต้านทานการแตกร้าวขณะร้อนสูง
2. ชั้นผิวหน้า (Cover Pass) กลับมาใช้โลหะเติมเกรด ER310 เพื่อให้ผิวหน้าของแนวเชื่อมมีสมบัติการทนอุณหภูมิสูงและมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับวัสดุเดิม (SS310S) มากที่สุด

3.3.5 Control – การควบคุมและรักษามาตรฐาน

หลังจากดำเนินการปรับปรุงแล้ว มีการติดตามผลการใช้งานจริงเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่าไม่มีการเกิดรอยแตกร้าวหรือ Breakdown เพิ่มเติม แสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์และแข็งแรงของแนวเชื่อมซ่อม การทดสอบด้วยสารแทรกซึม (PT) เป็นระยะพร้อมบันทึกข้อมูลการเชื่อมเข้าสู่ระบบช่วยทำให้สามารถติดตามคุณภาพของงานได้ในเชิงสถิติ จากผลสำเร็จดังกล่าว จึงได้จัดทำเป็นขั้นตอนปฏิบัติงานมาตรฐาน (Standard Operating Procedure; SOP) สำหรับการซ่อมเตาเผาที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ในโรงงาน เพื่อให้สามารถควบคุมคุณภาพและผลลัพธ์ได้อย่างยั่งยืน ครอบคลุมประเด็นสำคัญ เช่น การเลือกโลหะเติม การควบคุมอุณหภูมิ การตรวจสอบแนวเชื่อม และการบันทึกข้อมูล จัดทำเอกสารขั้นตอนการเชื่อม WPS สำหรับงานเชื่อมซ่อม ผลจากการปรับปรุงช่วย ป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวซ้ำ ลดโอกาสการซ่อมซ้ำในกรณีศึกษา และสนับสนุนการจัดทำฐานข้อมูลเพื่อประเมินผลเชิงสถิติในอนาคต สะท้อนถึงประสิทธิภาพของแนวทางปรับปรุงที่ชัดเจน

- กำหนดโลหะเติมเกรด ER309L เป็นชั้นบัฟเฟอร์ (FN ~7-8%)
- ควบคุมอุณหภูมิระหว่างชั้นแนวเชื่อม (Interpass Temperature) $\leq 150^{\circ}\text{C}$ ทุกชั้น
- ทดสอบด้วยสารแทรกซึม (PT) ทุกแนว (Root/Hot/Cover) และบันทึกผล
- บันทึกพารามิเตอร์เชื่อม (กระแสเชื่อม/แรงดันเชื่อม/ความเร็วเชื่อม/อัตราการไหลของแก๊ส) ลงฐานข้อมูล
- ทบทวนประจำปี (Annual review)

4. อภิปรายผล

บทบาทของโลหะเติมเกรด ER309L ในงานนี้ไม่ได้จำกัดเพียงการเป็นโลหะเติมทางเลือก แต่ทำหน้าที่เป็นชั้นบัฟเฟอร์เชิงโลหะวิทยาเพื่อปรับสมดุล Cr/Ni equivalent ลดผลของการเจือจาง (Dilution) จากวัสดุฐานที่ผ่านการใช้งาน และสร้างแนวโน้มโครงสร้างออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์ (Austenite + Ferrite) ก่อนเชื่อมปิดผิวด้วยโลหะเติมเกรด ER310 แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับงานการเชื่อมพอกผิว (Overlay Welding) ล่าสุดที่พบว่า การใช้โลหะเติมเกรด ER309L เป็นชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer) สามารถช่วยลดผลของ การเจือจาง (Dilution) และเพิ่มความต่อเนื่องทางโลหะวิทยาของชั้นเชื่อมทับได้ [13]

เมื่อเชื่อมโยงกับ DMAIC ผลของงานนี้แสดงให้เห็นว่าการแก้ปัญหาทางเชื่อมซ่อมไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนโลหะเติมเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากกระบวนการระบุปัญหา วัดข้อมูล วิเคราะห์ด้วยหลักโลหะวิทยา ทดลองปรับปรุง และควบคุมผลลัพธ์ด้วยการทดสอบด้วยสารแทรกซึม (PT) และการติดตามการใช้งานจริง ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้งานซ่อมบำรุงสามารถพัฒนาเป็นมาตรฐานปฏิบัติงาน (SOP) ได้

ข้อจำกัดของการศึกษา งานนี้ยังไม่ได้มีการยืนยันด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเชิงลึก การวัด Ferrite Number จริง การทดสอบความแข็ง หรือการทดสอบเชิงกลแบบทำลาย ดังนั้นข้อสรุปด้านโครงสร้างจุลภาคควรถือเป็นการคาดการณ์

เชิงวิศวกรรมจากแผนภาพแชฟเฟลเลอร์ (Schaeffler Diagram) และผลการใช้งานจริง มากกว่าการพิสูจน์เชิงวิทยาศาสตร์แบบสมบูรณ์

5. สรุปผล

จากการศึกษาวิธีการเชื่อมซ่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ซึ่งถูกใช้งานในเตาเผาสุญญากาศเป็นระยะเวลา 7 ปี ภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 1000–1200°C พบว่าประเด็นหลักที่ส่งผลให้การซ่อมแซมล้มเหลวคือ “การแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking)” ที่เกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อมหลังการซ่อม ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า สาเหตุของปัญหาไม่ได้เกิดจากโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมดของแนวเชื่อมจากโลหะเติมเกรด ER310 เพียงอย่างเดียว แต่เป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะเชื่อมและวัสดุฐานที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานเมื่อวัสดุเกรด SS310S ถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงต่อเนื่องยาวนาน โครงสร้างภายในจะเกิดการเสื่อมสภาพ (Aging/Sensitization) ทำให้วัสดุมีความเปราะและไวต่อการแตกร้าวมากขึ้น การใช้โลหะเติมเกรด ER310 ซึ่งเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด จึงไม่สามารถต้านทานความเปราะของวัสดุฐานที่เสื่อมสภาพได้ ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวขณะร้อนในการซ่อมครั้งแรก เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิธีการเชื่อมแบบ “ใช้โลหะเติมผสม” จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยแบ่งการเชื่อมเป็นสองช่วงสำคัญ ได้แก่

1) การเชื่อมชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer)

ใช้โลหะเติมเกรด ER309L ประมาณ 1–3 ชั้น เพื่อสร้างแนวเชื่อมที่มีโครงสร้างออสเทนไนต์กับเฟอร์ไรต์ (Austenite + Ferrite) (AF Mode) ซึ่งทำให้แนวเชื่อมมีความเหนียวและต้านทานการแตกร้าวได้ดีขึ้น

2) การเชื่อมปิดผิวหน้า (Cover Pass)

เชื่อมทับด้วยโลหะเติมเกรด ER310 เป็นชั้นสุดท้าย ทำให้โลหะเติมเกรด ER310 หลอมรวมบนบัฟเฟอร์ที่มีเสถียรภาพ ไม่สัมผัสโดยตรงกับวัสดุฐานที่เสื่อมสภาพ จึงไม่เกิดการแตกร้าวซ้ำ

ขั้นตอนทั้งหมดถูกควบคุม ตรวจสอบ และประเมินผลตามกรอบ DMAIC โดยเฉพาะใน Control Phase มีการติดตามผลการใช้งานจริงเป็นเวลา 1 ปีเต็ม ไม่พบการแตกร้าวหรือความเสียหายซ้ำ จึงสนับสนุนว่าวิธีนี้มีประสิทธิภาพในเงื่อนไขของกรณีศึกษา และสามารถนำไปจัดทำเป็นมาตรฐานปฏิบัติงาน (SOP) สำหรับงานซ่อมบำรุงในโรงงานได้อย่างยั่งยืน กล่าวโดยสรุป แนวทางการเชื่อมแบบใช้โลหะเติมผสม ER309L + ER310 ช่วยแก้ปัญหาการแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) ในการซ่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SS310S ที่เสื่อมสภาพได้สำเร็จ ทั้งในเชิงโลหวิทยา และเชิงปฏิบัติการในภาคอุตสาหกรรม องค์ความรู้ใหม่ของงานนี้คือการแสดงบทบาทของโลหะเติมเกรด ER309L ในฐานะชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer) สำหรับ Aged SS310S ในสภาพซ่อมจริง และการบูรณาการ DMAIC เพื่อแปลงแนวทางเชิงโลหวิทยาให้เป็นขั้นตอนควบคุมงานซ่อมบำรุงในโรงงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณ บริษัท เออีซี อินดัสเตรียล เซอร์วิส จำกัด ผู้บริหาร ทีมวิศวกร และ ทีมช่างเชื่อม ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และทรัพยากรที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนการอำนวยความสะดวกด้านเทคนิคที่ช่วยให้นักศึกษาสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น นอกจากนี้ ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการ Welding Evaluation and Learning Laboratory (WELLab) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งทางวิศวกรรม การเชื่อม สุดท้ายนี้ และขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้ความสนใจและการสนับสนุนตลอดระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ตรีนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ, & นครินทร์ ศรีสุวรรณ. (2012). อิทธิพลของกระแสไฟเชื่อมในกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนที่มีผลต่องานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 201. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 22(1), 39–41.
- [2] Rao, V. A., & Deivanathan, R. (2014). Experimental investigation for welding aspects of stainless steel 310 for the process of TIG welding. Procedia Engineering, 97, 902–908. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.365>
- [3] Subhani, S. M., Kumar, D. S., Haq, A. U., & Satyanarayana, K. (2019). Evaluation of mechanical properties for TIG welding aspects of SS 310 and MS materials. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.121>

- [4] บรรเลง ศรีนิล, กอบบุญ หล่อทองคำ, & Hartung, F. (2016). การเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าผสมสูง (Black-White Welding). The Journal of Welding Institute of Thailand, 2(1), 7–13.
- [5] Kobe Steel, Ltd. (2015). Arc welding of specific steels and cast irons. Kobe Steel, Ltd., Chapter 3.
- [6] ASTM International. (2023). ASTM A240/A240M-23a: Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and general applications. ASTM International. https://doi.org/10.1520/A0240_A0240M-23a
- [7] American Welding Society. (2017). AWS A5.9/A5.9M: Specification for bare stainless steel welding electrodes and rods. American Welding Society.
- [8] Shalchi Amirkhiz, B., Xu, S., & Scott, C. (2019). Microstructural assessment of 310S stainless steel during creep at 800 °C. Materialia, 6, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100330>
- [9] Tavares, S. S. M., Moura, V., da Costa, V. C., Ferreira, M. L. R., & Pardal, J. M. (2009). Microstructural changes and corrosion resistance of AISI 310S steel exposed to 600–800 °C. Materials Characterization, 60, 573–578. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.12.005>
- [10] Almomani, A., Mourad, A.-H. I., & Barsoum, I. (2022). Effect of sulfur, phosphorus, silicon, and delta ferrite on weld solidification cracking of AISI 310S austenitic stainless steel. Engineering Failure Analysis, 139, Article 106488. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106488>
- [11] Kadoi, K., Ueno, S., & Inoue, H. (2023). Effects of ferrite content and concentrations of carbon and silicon on weld solidification cracking susceptibility of stainless steels. Journal of Materials Research and Technology, 25, 1314–1321. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.018>
- [12] Ma, G., Xian, W., Bi, H., & Li, M. (2022). Effect of short-time aging on the sensitization characteristics of 310S stainless steel. International Journal of Electrochemical Science, 17(9), Article 22097. <https://doi.org/10.20964/2022.09.34>
- [13] Ma, Y., Zhang, J., Yu, Z., Li, M., Cai, Z., Feng, D., Ren, S., Zheng, W., & Yang, J. (2025). Influence of overlay welding process on the morphology, microstructure, and performance of the overlay layer. Metals, 15(9), 987. <https://doi.org/10.3390/met15090987>
- [14] Daniyan, I., Adeodu, A., Mpofu, K., Maladzhi, R., & Kana-Kana Katumba, M. G. (2022). Application of lean Six Sigma methodology using DMAIC approach for the improvement of bogie assembly process in the railcar industry. Heliyon, 8(3), e09043. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09043>
- [15] กาญจนา ลายวิเชียร, & ศุภรัชชัยวรรธน์. (2565). การลดของเสียในกระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยวิธีซิก ซิกม่า. ใน เอกสารการประชุมวิชาการ/วารสารบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 166–177.