

Received: Nov 26, 2025

Revised: Jun 27, 2026

Accepted: Jun 29, 2026

การวิเคราะห์ความเสียหายของถังต้มน้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าวที่ระบุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 จากระบบเผาไหม้โดยตรง: กรณีศึกษาโรงงาน SME

FAILURE ANALYSIS OF A REPORTED GRADE 304 STAINLESS STEEL COCONUT FLOWER VINEGAR BOILER USING A DIRECT FLAME HEATING SYSTEM: AN SME CASE STUDY

พิชา พันธุ์มงคล^{1*}, เวทรินทร์ อธิจิระสิงห์¹, วิบูลย์ ประทุมรัตน์¹, กฤษณะ ภัลลยวรรณ์¹,

เกริกขจร ถนอดรบ¹, เขต บุราคร², วิษณุ พึ่งขุนทด²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

²วิศวกรโครงการ บริษัท เออีซี อินดัสเตรียล เซอร์วิส จำกัด

Picha Panmongkol^{1*}, Wetarin Atijirasing¹, Wiboon Pratumrat¹, Kritsana Philaiwan¹

Krirkkajon Tanadrob¹, Khet Burakorn, Wissanu Pongkuntod²

¹Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University

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

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะความเสียหายและกลไกที่เป็นไปได้ของการกัดกร่อนแบบรูเข็มบริเวณก้นถังต้มน้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าวในโรงงานอาหารขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ซึ่งเกิดการรั่วซึมภายในระยะเวลาการใช้งานประมาณ 4 เดือน ถึงดังกล่าวใช้ระบบให้ความร้อนแบบเผาไหม้โดยตรงจากแก๊ส LPG การตรวจสอบดำเนินการตามแนวทางการวิเคราะห์ความเสียหาย โดยใช้การตรวจพินิจด้วยสายตา การประเมินการกระจายตัวของหลุมกัดกร่อนตามแนวทาง ASTM G46 การตรวจลักษณะพื้นฐานของหลุม และการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย SEM-EDS ผลการศึกษาพบหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็มกระจายตัวหนาแน่นบริเวณก้นถัง โดยพบหลุมขนาดใหญ่กว่า 3.0 มม. จำนวนมากในพื้นที่ที่สัมผัสกับตำแหน่งเผาไหม้ ผล SEM-EDS บ่งชี้ว่าปริมาณนิกเกิล (Ni) ในบริเวณที่ตรวจวัดอยู่ที่ประมาณ 6.49–6.84 wt.% ซึ่งต่ำกว่าช่วงองค์ประกอบที่กำหนดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตาม ASTM A240/A240M โดยภาพรวมหลักฐานที่ตรวจพบสนับสนุนสมมติฐานว่าความเสียหายเกิดจากกลไกความเสียหายร่วมระหว่างการให้ความร้อนด้วยเผาไหม้โดยตรง การไม่มีท่อระบายน้ำซึ่งทำให้เกิดของเหลวตกค้าง และสภาพแวดล้อมกรดอินทรีย์ที่อาจเกิดความเข้มข้นเฉพาะจุดจากการระเหยซ้ำ ภายหลังการวิเคราะห์และการปรับปรุงเชิงวิศวกรรม โรงงานได้เปลี่ยนวัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ขณะที่ยังคงใช้ระบบให้ความร้อนแบบเผาไหม้โดยตรงตามข้อจำกัดของโรงงาน SME จากการติดตามผลภาคสนามประมาณ 1 ปี ยังไม่พบการรั่วซึมหรือความเสียหายซ้ำในลักษณะเดิม งานวิจัยจึงเสนอแนวทางปรับปรุงโดยพิจารณาเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับสภาวะกรดอินทรีย์ เพิ่มระบบระบายน้ำซึ่งลดการตกค้างของของเหลว และกำหนดมาตรการตรวจสอบวัสดุก่อนใช้งาน ทั้งนี้ ข้อเสนอแนะ Root Cause ในงานนี้เป็นการวิเคราะห์จากหลักฐานที่มีอยู่และข้อมูลติดตามภาคสนาม ยังไม่ใช่วิธีการยืนยันเชิงทดลองโดยสมบูรณ์

คำสำคัญ : การกัดกร่อนแบบรูเข็ม, เหล็กกล้าไร้สนิม 304, การวิเคราะห์ความเสียหาย, ระบบให้ความร้อนแบบเผาไหม้โดยตรง, อุสาหกรรมการอาหาร SMEs

Abstract

This study investigates premature pitting failure at the bottom of a coconut flower vinegar boiling/pasteurization tank used in an SME food processing facility. The tank was heated by a direct flame heating system using LPG and developed leakage after approximately four months of operation. Failure analysis was conducted through visual inspection, pit distribution evaluation according to ASTM G46,

morphological examination, and SEM-EDS analysis. The results revealed a dense distribution of pitting corrosion at the tank bottom, particularly in the area associated with direct flame exposure. Large pits greater than 3.0 mm were observed, indicating severe localized corrosion. SEM-EDS results showed that the measured nickel (Ni) content in the analyzed area was approximately 6.49–6.84 wt.%, which is lower than the compositional range specified for Type 304 stainless steel in ASTM A240/A240M. Overall, the available evidence supports the hypothesis that the failure resulted from a synergistic mechanism involving direct flame heating, residual fluid hold-up due to the absence of a bottom drain, localized concentration of acidic solution, and possible lower-than-expected corrosion resistance of the material. After the failure analysis and engineering improvement, the factory replaced the material with Type 316L stainless steel while continuing to use the direct flame heating system due to practical constraints in the SME production environment. Field follow-up for approximately one year showed no recurrence of leakage or similar damage. The findings suggest that material upgrading, improved bottom drainage, reduction of residual hold-up, and material verification before fabrication or service are practical corrective measures for reducing the risk of repeated pitting failure. The proposed root cause is based on available evidence and field follow-up information and still requires further experimental validation.

Keywords : Pitting corrosion, stainless steel, failure analysis, direct-fired heating, root cause analysis, SME food industry

บทนำ

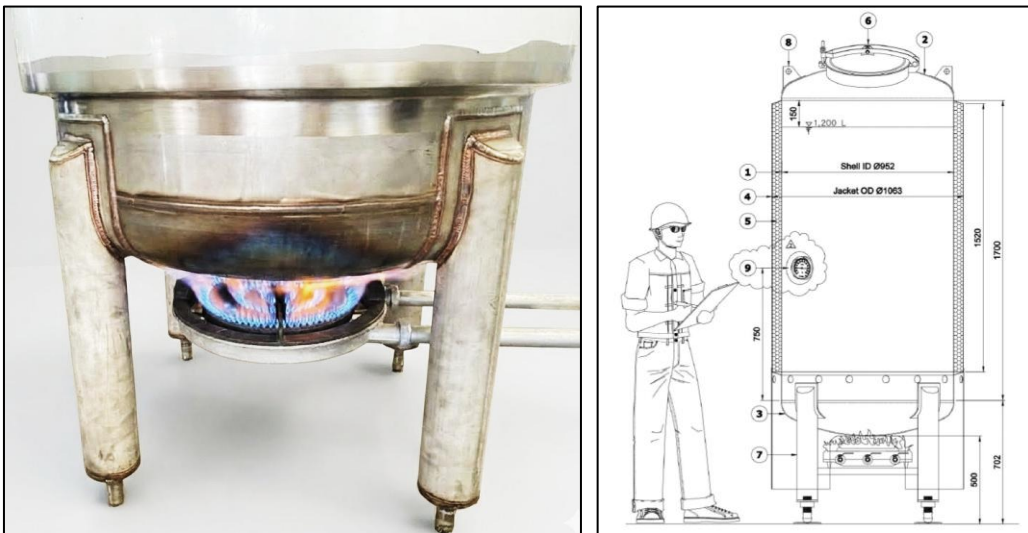
อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารหมักดอง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์กลุ่มที่มีสภาพกรดอินทรีย์อ่อน เช่น น้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าว (Coconut flower vinegar) ซึ่งมีความเข้มข้นของกรดอะซิติกประมาณ 4–6% จำเป็นต้องพึ่งพาอุปกรณ์แปรรูปที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เพื่อรักษามาตรฐานสุขอนามัย (Hygiene) และความทนทานต่อการกัดกร่อนโดยการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมในสถานะที่สัมผัสกรดอะซิติกควรพิจารณาทั้งความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ สิ่งเจือปน และความเสี่ยงจากคลอไรด์ร่วมด้วย (Lai et al., 2012; Ministry of Public Health, 1985; British Stainless Steel Association, n.d.) แม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เช่น เกรด 304 และ 316 จะเป็นวัสดุมาตรฐานในอุตสาหกรรมนี้ แต่ความทนทานต่อการกัดกร่อนอาจลดลงได้ภายใต้สภาวะที่เอื้อต่อการกัดกร่อนเฉพาะจุด (Localized corrosion) โดยเฉพาะเมื่อมีคลอไรด์ร่วมกับอุณหภูมิสูงและวัสดุมีค่าดัชนีความทนทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Resistance Equivalent Number; PREN) ต่ำ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304/304L ซึ่งไม่มีการเติมโมลิบดีนัม (Sedriks, 1996; Frankel, 1998) นอกจากนี้ การใช้งานในสภาวะที่มีกรดอะซิติกร่วมกับความร้อนสูงอาจส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงขึ้น หากมีการสะสมของสิ่งเจือปนหรือเกิดความเข้มข้นเฉพาะจุดระหว่างการใช้งาน (Zadi & Shaaban, 2012)

อย่างไรก็ตาม ความเสียหายในบริบทของผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) มักมีความซับซ้อนมากกว่าปัจจัยด้านเคมีเพียงอย่างเดียว กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้พบการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่รุนแรงจนเกิดการรั่วซึมบริเวณก้นถังภายในระยะเวลาการใช้งานประมาณ 4 เดือน จากการรวบรวมข้อมูลการใช้งานจริงพบว่า ถังดังกล่าวถูกใช้งานในกระบวนการต้มน้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าวเฉลี่ยประมาณวันละ 1 batch ลักษณะการให้ความร้อนเป็นการใช้เชื้อเพลิง LPG ผ่านหัวเตาแก๊สที่ให้เปลวไฟสัมผัสบริเวณก้นถังโดยตรง อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ระหว่างการใช้งานไม่ได้มีการบันทึกเป็นค่าตัวเลขด้วยเครื่องมือวัด แต่จากข้อมูลการปฏิบัติงานระบุว่าเป็นการให้ความร้อนจนผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะเดือด หลังสิ้นสุดการผลิตในแต่ละรอบ ผู้ใช้งานทำความสะอาดถังโดยการฉีดน้ำล้างภายในถัง แล้วใช้ปั๊มดูดน้ำล้างออกจากภายในถัง เนื่องจากถังไม่มีท่อระบายหรือวาล์วระบายที่ก้นถังโดยตรง ลักษณะดังกล่าวมีความสำคัญทางวิศวกรรม เนื่องจากอาจทำให้เกิดของเหลวตกค้างบริเวณก้นถัง โดยเฉพาะในพื้นที่ต่ำหรือบริเวณที่สัมผัสกับตำแหน่งเปลวไฟ เมื่อมีการให้ความร้อนซ้ำในรอบการผลิตถัดไป ของเหลวตกค้างดังกล่าวอาจเกิดการระเหยของน้ำและทำให้กรดอินทรีย์หรือสิ่งเจือปนมีความเข้มข้นเฉพาะจุดสูงขึ้นส่งผลให้สภาวะบริเวณก้นถังเอื้อต่อการเกิด concentration cell และการเริ่มต้นของการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นประเด็นที่วรรณกรรมส่วนใหญ่อาจมองข้าม การใช้เปลวไฟสัมผัสกันโดยตรงมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดจุดร้อนเฉพาะที่ (Hot Spot) และทำให้อุณหภูมิผิวโลหะบริเวณกันถึงสูงกว่าอุณหภูมิของของเหลวภายในถัง โดยเฉพาะบริเวณที่เปลวไฟสัมผัสระหว่างรอบการผลิต ปัจจัยดังกล่าวอาจส่งผลให้ฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเสื่อมสภาพและเอื้อต่อการเริ่มต้นของการกัดกร่อนแบบรูเข็ม นอกจากนี้ หากอุณหภูมิผิวโลหะเข้าสู่ช่วงวิกฤตซ้ำ ๆ ระหว่างการใช้งาน อาจมีความเสี่ยงต่อการเกิด sensitization หรือการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน อย่างไรก็ตาม งานศึกษานี้ยังไม่ได้ตรวจยืนยัน intergranular corrosion หรือ chromium carbide precipitation โดยตรง จึงใช้ประเด็นดังกล่าวเป็นข้อพิจารณาเชิงกลไกที่เป็นไปได้เท่านั้น (Davis, 2006; Davis, 2000) แต่ยังคงก่อให้เกิดความเสี่ยงทางโลหะวิทยาที่สำคัญ 2 ประการ คือ 1) การสลายตัวของฟิล์มพาสซีฟโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) จากสภาวะความร้อนสูงเฉพาะที่ และ 2) ความเสี่ยงต่อการเกิดภาวะไวต่อการกัดกร่อน (Sensitization) หรือการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน หากอุณหภูมิผิวโลหะสูงเข้าสู่ช่วงวิกฤต (Critical Temperature Range) ซ้ำ ๆ ระหว่างรอบการผลิต ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความเสียหายในรอยเชื่อมและพื้นที่กระทบความร้อน ตามขอบเกรน หากอุณหภูมิผิวโลหะสูงเข้าสู่ช่วงวิกฤต $425\text{--}815\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซ้ำ ๆ ระหว่างรอบการผลิต (ASM International, 2006; Davis, 2000)

จากข้อมูลของกรณีศึกษานี้พบว่า นอกจากปัจจัยด้านความร้อน ปัจจัยด้านการออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering Design) ยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อกลไกการกัดกร่อน การออกแบบถังที่ไม่มีจุดระบายก้นถัง (Bottom Drain) และใช้วิธีดูดผลิตภัณฑ์จากปากถัง ส่งผลให้เกิด "ปริมาณของเหลวตกค้าง (Residual Hold-up)" สภาวะนี้ร่วมกับความร้อนจากเปลวไฟ ทำให้เกิดการระเหยตัวของน้ำ (Evaporation) ส่งผลให้คลอไรด์และความเข้มข้นกรดเข้มข้นขึ้นเฉพาะจุด (Concentration Cell) และนำไปสู่การเพิ่มความเข้มข้นของกรดและคลอไรด์ในบริเวณกันถึงจนสูงเกินกว่าค่าออกแบบปกติ (Concentration Cell Corrosion) ปัจจัยเหล่านี้เมื่อรวมกับรอยขีดข่วนทางกลหรือสิ่งปนเปื้อนจากการผลิต ล้วนเป็นตัวเร่งให้เกิดการเริ่มต้นของรูเข็มได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (Sedriks, 1996; Frankel, 1998)

โครงการนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัญหาจากหน้างานจริง (Field Failure Analysis) โดยบูรณาการความสัมพันธ์แบบ "ครบห่วงโซ่" (Integrated Chain) ตั้งแต่ข้อจำกัดด้านการออกแบบ พฤติกรรมการใช้งาน และการเลือกวัสดุ งานศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัญหาจากหน้างานจริง (Field Failure Analysis) โดยบูรณาการความสัมพันธ์ระหว่างข้อจำกัดด้านการออกแบบ พฤติกรรมการใช้งาน สภาพแวดล้อมของกระบวนการ และการเลือกวัสดุ เพื่อสังเคราะห์แนวทางแก้ไข ปัญหาที่ปฏิบัติได้จริงสำหรับผู้ประกอบการ SME ทั้งการปรับปรุงระบบให้ความร้อน การออกแบบจุดระบายก้นถัง การควบคุมการตกค้างของของเหลว และการตรวจสอบวัสดุก่อนใช้งาน อันเป็นแนวทางที่ช่วยยกระดับความปลอดภัยและความทนทานของอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมอาหาร



ภาพที่ 1 การใช้งานถังให้ความร้อนด้วยเปลวไฟจากแก๊ส LPG สัมผัสกันถึงโดยตรง (ซ้าย) และ มิติถัง (ขวา)

วัตถุประสงค์

1. วิเคราะห์ลักษณะและความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบรูเข็มบริเวณก้นถังผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้ในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ น้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าว
2. ศึกษาสัณฐานวิทยาของหลุมกัดกร่อน (pit morphology) และวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีเบื้องต้นของบริเวณหลุมและโลหะฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) ร่วมกับเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) เพื่อประเมินแนวโน้มองค์ประกอบของวัสดุและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน
3. เสนอแนวทางเชิงวิศวกรรมสำหรับการซ่อมแซม การออกแบบใหม่ และการเดินระบบ/การทำความสะอาด เพื่อป้องกันปัญหาซ้ำในอนาคต

ขอบเขตของงาน

1. เป็นกรณีศึกษาจากถังเพียง 1 ใบในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์น้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าว ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 952 มม. หนา 4 มม. ไม่มี bottom drain ที่ผ่านการใช้งานมา 4 เดือน
2. ศึกษาเฉพาะก้นถังด้านใน ไม่ครอบคลุมโซนแนวเชื่อมหรือผนังถัง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมชิ้นงานและการตรวจสอบเบื้องต้น ชิ้นงานตัวอย่างถูกตัดจากบริเวณก้นถังที่เกิดความเสียหาย ขนาด ตัวอย่าง 50x50 มม. จำนวน 2 ชิ้น ทำความสะอาดพื้นผิวและเตรียมชิ้นงานทางโลหะวิทยา (Metallographic Preparation) ตามมาตรฐาน ASTM E3 (ASTM International, 2017) เพื่อจัดคราบสกริปโดยไม่ทำลายลักษณะทางจุลภาคดั้งเดิม การตรวจสอบพินิจด้วยสายตา (Visual Inspection) ดำเนินการเพื่อระบุตำแหน่งและการกระจายตัวของความเสียหายตามแนวทางของ ASM Handbook Vol. 11 (ASM International, 2002)
2. การประเมินลักษณะการกัดกร่อนแบบรูเข็ม การประเมินความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion Evaluation) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G46 (ASTM International, 2021) โดยทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดและคำนวณความหนาแน่นของหลุมต่อหน่วยพื้นที่ เพื่อจำแนกความรุนแรงของความเสียหาย.
3. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของบริเวณหลุมกัดกร่อน ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน และเนื้อโลหะฐาน ด้วยเทคนิค SEM-EDS โดยพิจารณาธาตุหลัก ได้แก่ Cr, Ni, Fe, Mo, C, O, Si และ Mn และเปรียบเทียบผลที่ได้กับช่วงองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตามมาตรฐาน ASTM A240/A240M ทั้งนี้ ผลจาก SEM-EDS ใช้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณสำหรับการวิเคราะห์ ไม่ใช้การยืนยันเกรดวัสดุอย่างเป็นทางการ

ผลการดำเนินงาน

1. การตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตา (Visual Inspection)

ทำการตรวจสอบก้นถังหลังการระบายน้ำทิ้งและทำความสะอาดเบื้องต้น ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยอาศัยการตรวจพินิจด้วยสายตา จากการตรวจพินิจด้วยสายตา พบว่าบริเวณก้นถังมีพื้นที่วิกฤตเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 600 มม. ซึ่งเป็นบริเวณที่พบคราบตกค้าง ร่องรอยการไหลของของเหลว และหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็มหนาแน่นที่สุด พื้นที่ดังกล่าวสัมพันธ์กับตำแหน่งเปลวไฟใต้ถังถัง และสอดคล้องกับบริเวณที่ตรวจพบความเสียหายรุนแรงที่สุด โดยหลุมกัดกร่อนกระจายตัวในลักษณะเป็นแถบวงแหวนรอบบริเวณก้นถังของถัง และสัมพันธ์กับตำแหน่งเปลวไฟใต้ถังถังซึ่งมีคราบน้ำและร่องรอยการไหลของของเหลวตกค้างอย่างชัดเจน พื้นที่ดังกล่าวสอดคล้องกับบริเวณที่ตรวจพบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) รุนแรงที่สุด โดยรูเข็มกระจายตัวหนาแน่นในลักษณะเป็นแถบวงแหวนกว้างรอบจุดศูนย์กลางของก้นถัง

จากการตรวจด้วยสายตาได้ทำการบันทึกภาพถ่ายตำแหน่งและลักษณะของการกัดกร่อนเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเชิงคุณภาพ จากนั้นกำหนดให้พื้นที่วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 มม. ที่ก้นถังดังกล่าวเป็น พื้นที่วิกฤต (critical area) สำหรับ

การตรวจสอบเชิงปริมาณ โดยวางแผนดำเนินการประเมินความหนาแน่นของรูเข็มต่อหน่วยพื้นที่ตามแนวทางในมาตรฐาน ASTM G46 เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินระดับความเสียหายและการกำหนดแนวทางซ่อมแซมเชิงวิศวกรรมต่อไป

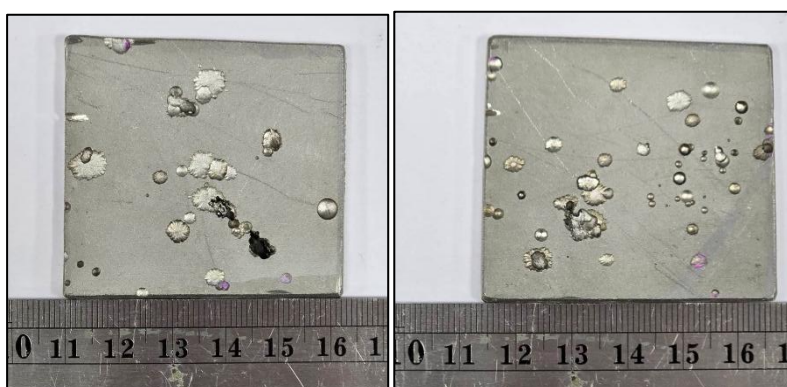


ภาพที่ 2 ลักษณะกันถังและขอบเขตพื้นที่วิกฤตกรณีศึกษาเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 มม. ที่ตรวจพบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (ด้านในถัง)

2. การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็มตาม ASTM G46

2.1 การเตรียมชิ้นงานและการถ่ายภาพมาโคร (Macro)

บริเวณกันถังที่ระบุว่าเป็นพื้นที่วิกฤตเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 600 มม. ได้ทำการตัดชิ้นงานตัวอย่างขนาด 50x50 มม. รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสออกมาจากกันถัง เพื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะการกัดกร่อนแบบรูเข็ม จากนั้นวางชิ้นงานบนพื้นเรียบและจัดวางไม้บรรทัดโลหะในภาพเดียวกันเพื่อใช้เป็นสเกลอ้างอิงสำหรับการวัดขนาดหลุม pitting ดังแสดงในภาพที่ 3 ภาพถ่ายถูกถ่ายในแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากมุมมอง (perspective error) ก่อนนำไปประมวลผลภาพดิจิทัล



ภาพที่ 3 ชิ้นงานตัวอย่างขนาด 50x50x4 มม. จากกันถังแสดงการกระจายตัวของหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็ม (ด้านในถัง)

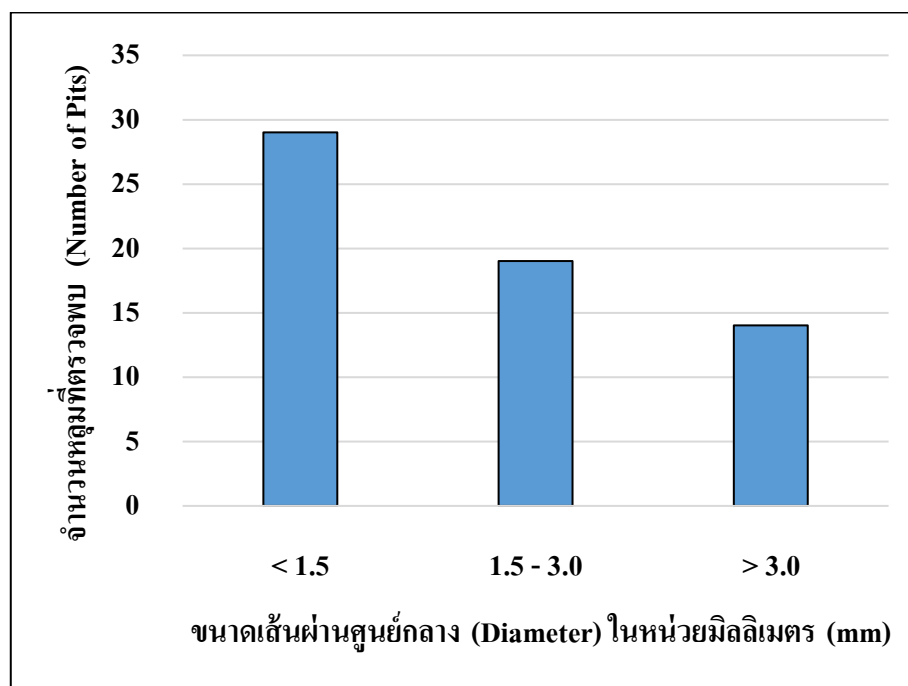
2.2 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมกัดกร่อนที่ก้นถัง

ภาพถ่ายของชิ้นงานตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 3 ถูกแปลงเป็นภาพเฉดเทา (grayscale) แล้วทำการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลเพื่อแยกบริเวณหลุม pitting ออกจากพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้เกณฑ์ความสว่างของขอบหลุมที่มีคอนทราสต์สูงกว่าพื้นผิวโดยรอบ จากนั้นทำการจัดกลุ่มพิกเซลที่ต่อเนื่องกันเป็นแต่ละหลุมกัดกร่อน (connected components) สำหรับหลุมแต่ละหลุม ทำการคำนวณพื้นที่ A (หน่วยพิกเซล²) และแปลงเป็น เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงสมมูลของวงกลม (equivalent circular diameter) ดังแสดงในสมการ (1)

$$d_{px} = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

แล้วแปลงเป็นหน่วยมิลลิเมตรด้วยอัตราส่วนสเกลที่ได้ โดยในขั้นตอนการประมวลผลมีการกรองสัญญาณรบกวน (noise) โดยตัดหลุมที่มีพื้นที่เล็กมาก (เช่น เกิดจากจุดสะท้อนแสง/คราบสกปรก) และไม่ใช่หลุมกัดกร่อนจริงออก เพื่อให้ได้เฉพาะหลุม pitting ที่มีนัยสำคัญทางวิศวกรรม วิธีการดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของมาตรฐาน ASTM G46 ในการใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของหลุมกัดกร่อนเพื่ออธิบายลักษณะการกัดกร่อนแบบรูเข็มในเชิงปริมาณ และสามารถนำไปเชื่อมโยงกับ "average pit diameter" ในแผนภูมิการจัดชั้นของ ASTM G46 ได้

จากการประมวลผลภาพ สามารถประมาณค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมกัดกร่อนและจัดกลุ่มตามช่วงขนาด ได้ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยพบหลุมกัดกร่อนรวมทั้งสิ้น 62 หลุม จากชิ้นงานตัวอย่างในรูปที่ 3 เมื่อจำแนกตามช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง พบผลดังนี้



ภาพที่ 4 แสดงจำนวนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ก้นถัง

- ช่วง < 1.5 มม. พบหลุมกัดกร่อนจำนวน 29 หลุม คิดเป็นประมาณ 47% ของจำนวนหลุมทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนส่วนหนึ่งเกิดในลักษณะรูเข็มขนาดเล็กและกระจายตัวทั่วไปบนผิวก้นถัง
- ช่วง 1.5–3.0 มม. พบหลุมกัดกร่อนจำนวน 19 หลุม หรือประมาณ 31% ของทั้งหมด เป็นกลุ่มหลุมขนาดปานกลางที่เริ่มมีผลต่อความหนาที่มีประสิทธิภาพของแผ่นก้นถังมากขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มแรก

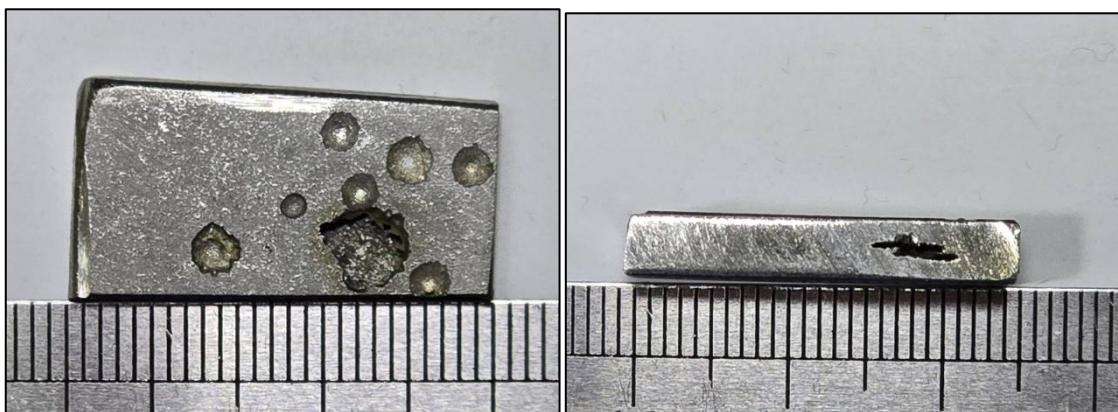
- ช่วง > 3.0 มม. พบหลุมกัดกร่อนจำนวน 14 หลุม หรือประมาณ 23% ของทั้งหมด ซึ่งจัดเป็นหลุมขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับสองช่วงแรก และสะท้อนว่าบริเวณกันดั้มมีตำแหน่งที่ได้รับความเสียหายรุนแรงอยู่หลายจุด ไม่ได้มีเพียงหลุมขนาดเล็กเท่านั้น

จากผลการตรวจวัดขนาดหลุมกัดกร่อนที่กันดั้ม พบว่าหลุมขนาดเล็กกว่า 1.5 มม. มีจำนวนมากที่สุด แต่หลุมขนาดปานกลาง 1.5–3.0 มม. และขนาดใหญ่กว่า 3.0 มม. รวมกันคิดเป็นมากกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนหลุมทั้งหมด สะท้อนว่าบริเวณกันดั้มไม่ได้มีเพียง pitting ขนาดเล็ก แต่มีการพัฒนาตัวเองเป็นหลุมขนาดกลางถึงใหญ่ในหลายตำแหน่ง ซึ่งบ่งชี้ถึงการเติบโตของหลุมในแนวตั้ง (Vertical propagation) อย่างรวดเร็ว (Szklańska-Smiałowska, 1986) ลักษณะนี้ หากเทียบกับมาตรฐาน ASTM G46 สามารถจัดได้ว่าเป็นกรณีที่มี ความหนาแน่นของหลุมค่อนข้างสูง ร่วมกับ ขนาดปากหลุมเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างใหญ่ ซึ่งมักสัมพันธ์กับความลึกของหลุมที่เพิ่มขึ้นและมีศักยภาพต่อการทะลุผนังกันดั้ม ในเชิงโครงสร้าง การมีหลุมขนาดกลางและใหญ่จำนวนมากย่อมทำให้ความหนาแน่นที่มีประสิทธิภาพของแผ่นกันดั้มลดลงและเกิดจุดรวมความเค้นเฉพาะที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความสามารถรับแรงดันของเหลวภายในถังและเพิ่มความเสี่ยงการรั่วซึมแบบ leak-before-break ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของถังในหน้าที่ตรวจพบการรั่วไหลบริเวณกันดั้ม กล่าวคือ ตำแหน่งการรั่วจริงอยู่ในโซนเดียวกับบริเวณที่ตรวจพบหลุมกัดกร่อนหนาแน่นและมีขนาดปานกลางถึงใหญ่ ทำให้มีความเป็นไปได้สูงว่า การทะลุของผนังกันดั้มเกิดจากการเจริญตัวของหลุม pitting เหล่านี้จนทะลุความหนาที่เหลือน้อยจนทำให้เกิดการรั่วไหลจากด้านในสู่ภายนอก

ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของหลุมกัดกร่อนจึงไม่ใช่เพียงข้อมูลเชิงสถิติ แต่เป็นหลักฐานสนับสนุนโดยตรงต่อกลไกการวิบัติของถังในหน้าที่ว่าความเสียหายหลักเกิดจาก localized pitting corrosion ที่พัฒนาไปสู่การรั่วซึมก่อนการวิบัติด้านกำลังรับแรงของแผ่นกันดั้ม

2.3 ลักษณะทางกายภาพของหลุม

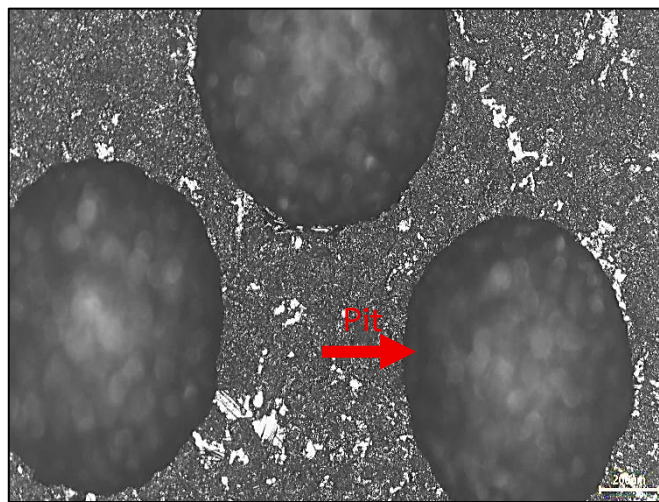
การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าหลุมกัดกร่อนส่วนใหญ่มีลักษณะค่อนข้างทรงกลมเมื่อมองจากด้านบน (Top view) และเมื่อพิจารณาภาพตัดขวาง (Side view/Cross-section) พบลักษณะที่บ่งชี้ความเป็นไปได้ของการเติบโตของหลุมทั้งในแนวตั้ง (Vertical propagation) และการกัดเซาะใต้ผิวบางส่วนในแนวนอน (Sideway propagation หรือ undercutting) ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมของ pitting corrosion ที่ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนอาจปกคลุมบริเวณปากหลุม ทำให้สภาวะภายในหลุมมีความแตกต่างจากสภาวะภายนอก และอาจเอื้อต่อการเกิดสภาวะกรดหรือความเข้มข้นเฉพาะจุดภายในหลุม



ภาพที่ 5 ภาพ Side View/Cross-section การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของหลุม
(รูปซ้าย: Top View ด้านสัมผัสผลิตภัณฑ์ และ รูปขวา: Side View/Cross-section ความหนาเดิม 4 มม.)

3. การตรวจสอบลักษณะหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็มด้วยกล้องจุลทรรศน์

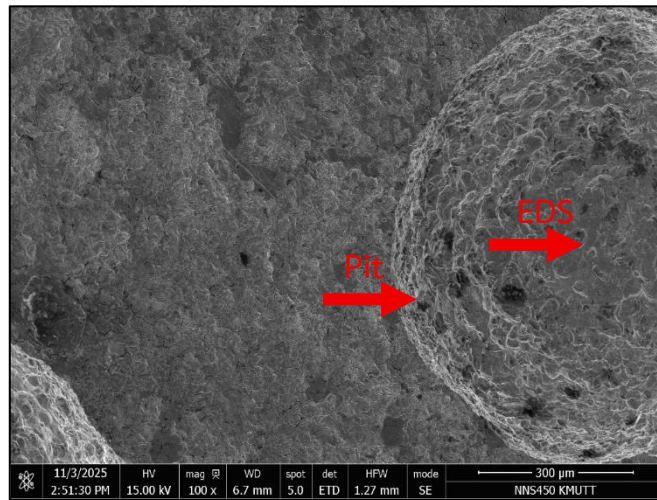
ชิ้นงานตัวอย่างถูกตัดจากบริเวณก้นถังในตำแหน่งที่ตรวจพบการกัดกร่อนรุนแรง จากนั้นทำการเตรียมผิวโดยขัดทำความสะอาดเพื่อลดคราบตะกอนและสิ่งสกปรกออกให้มากที่สุด พร้อมทั้งหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพผิวโลหะดั้งเดิมเกินจำเป็น ก่อนนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope) ที่กำลังขยายเหมาะสมสำหรับการสังเกตลักษณะรอยกัดกร่อน ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงในรูปที่ 6 พบหลุมกัดกร่อนทรงค่อนข้างกลมหลายตำแหน่งกระจายอยู่บนพื้นผิวโลหะอย่างชัดเจน ลักษณะดังกล่าวยืนยันได้อย่างมีนัยสำคัญว่าความเสียหายบริเวณก้นถังเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) มีใช้ร่อยรอยการกระแทกเชิงกลหรือข้อบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการผลิตผิวหน้าวัสดุเดิม อีกทั้งผลการสังเกตในระดับจุลภาคยังสอดคล้องกับการประเมินในระดับภาพถ่ายแบบมาโคร (macro) ดังแสดงในรูปที่ 3 ที่พบหลุมขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่จำนวนมาก ซึ่งมีศักยภาพในการลดความหนาที่มีประสิทธิภาพของแผ่นก้นถัง และเพิ่มความเสี่ยงต่อการรั่วซึมระหว่างการใช้งานในระยะยาวของถังดังกล่าว



ภาพที่ 6 ภาพขยายลักษณะหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็มบริเวณก้นถังบนชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

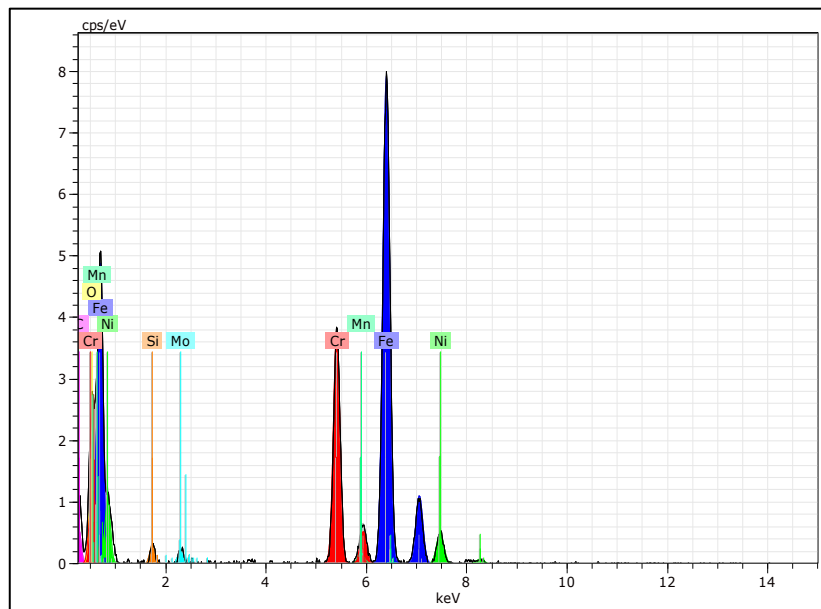
4. การตรวจสอบลักษณะหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็ม

วิธีการดำเนินงาน ชิ้นงานตัวอย่างถูกตัดจากบริเวณก้นถังในตำแหน่งที่ตรวจพบการกัดกร่อนแบบรูเข็มรุนแรง จากนั้นทำความสะอาดผิวหน้า โดยระมัดระวังไม่ให้เกิดการเปลี่ยนรูปผิวโลหะเดิมมากเกินไป ก่อนนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การถ่ายภาพใช้ค่าศักย์เร่งลำอิเล็กตรอน 15 kV กำลังขยายประมาณ 100× โดยบันทึกภาพพื้นผิวบริเวณหลุมกัดกร่อนและผิวโลหะโดยรอบ เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของหลุม (pit morphology) ดังแสดงในภาพที่ 7 ผลการตรวจสอบด้วย SEM และ EDS แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความเสียหายบริเวณก้นถังเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) เฉพาะที่ (localized corrosion) โดยภาพ SEM แสดงลักษณะปากหลุมที่มีทรงเกือบกลม ขอบหลุมชัดเจน และแยกตัวออกจากพื้นผิวโลหะโดยรอบ ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของ pitting ในเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้ การกระจายตัวของหลุมกัดกร่อนบนผิวในบริเวณก้นถังยังสอดคล้องกับผลการประเมินในระดับมาโครที่พบหลุมขนาดเล็ก ปานกลาง และใหญ่กระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมาก

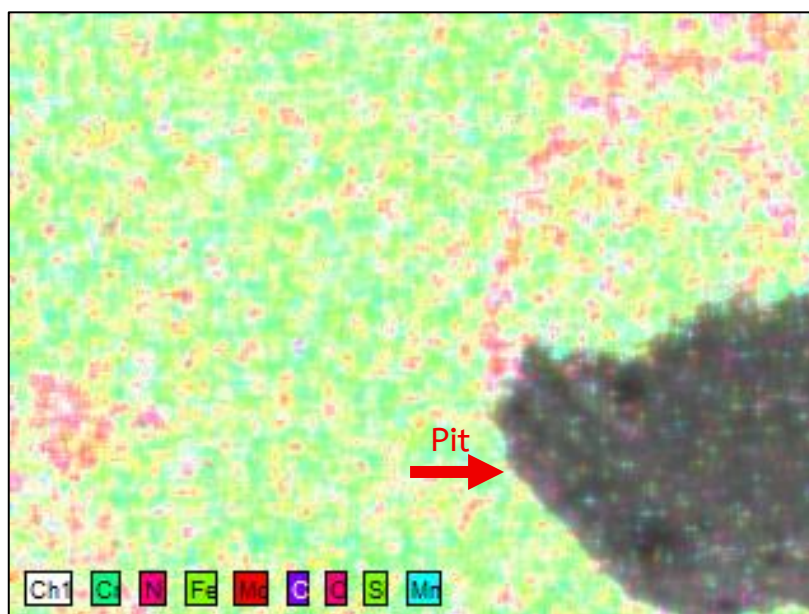


ภาพที่ 7 ภาพ SEM พื้นผิวบริเวณหลุมกัดกร่อนและผิวโลหะโดยรอบ

เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีในบริเวณหลุมและเนื้อโลหะฐานร่วมกัน ได้ทำการวัดด้วย EDS ควบคู่กับ SEM โดยเก็บข้อมูลทั้งในรูปแบบสเปกตรัมในรูปแบบแผนที่การกระจายตัวของธาตุ (elemental mapping) สำหรับธาตุหลัก โครเมียม (Chromium; Cr), นิกเกิล (Nickel; Ni), เหล็ก (Iron; Fe), โมลิบดีนัม (Molybdenum; Mo), คาร์บอน (Carbon; C), ออกซิเจน (Oxygen; O), ซิลิคอน (Silicon; Si) และแมงกานีส (Manganese; Mn) ดังแสดงใน ภาพที่ 8 และภาพที่ 9 ตามลำดับ โดยพบว่า ธาตุ C และ O เป็นคราบหรือผลิตภัณฑ์กัดกร่อน ไม่ใช่องค์ประกอบหลักของวัสดุ



ภาพที่ 8 สเปกตรัม EDS แสดงองค์ประกอบเคมีบริเวณหลุมกัดกร่อนจากรูปที่ 7 และเนื้อโลหะฐานที่กั้นถึง



ภาพที่ 9 แผนที่การกระจายตัวของธาตุ (EDS elemental mapping) บริเวณหลุมกัดกร่อนที่ก้นถัง สำหรับธาตุ Cr, Ni, Fe, Mo, C, O, Si และ Mn

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย EDS ตำแหน่งบริเวณหลุมและเนื้อโลหะฐาน แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะมีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุเหล็กโครเมียม-นิกเกิล โดยมีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวโลหะบริเวณหลุมกัดกร่อนที่ก้นถังจากการวิเคราะห์ด้วย EDS

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [wt.%]
Chromium	K-series	16.18	17.07	14.58	1.52
Nickel	K-series	6.49	6.84	5.18	0.80
Iron	K-series	62.58	66.01	52.51	5.64
Molybdenum	L-series	0.62	0.65	0.30	0.17
Carbon	K-series	4.04	4.26	15.75	2.40
Oxygen	K-series	3.42	3.61	10.03	1.71
Silicon	K-series	0.47	0.50	0.79	0.15
Manganese	K-series	1.01	1.06	0.86	0.21
Total	—	94.81	100.00	100.00	—

หมายเหตุ; C และ O ค่าธาตุเบาเป็นเพียงกึ่งปริมาณเพื่อบ่งชี้สิ่งปนเปื้อนเท่านั้น ไม่ใช่องค์ประกอบผสมหลักของวัสดุ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบริเวณเนื้อโลหะฐาน (Base Metal) ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดหลุมกัดกร่อน ด้วยเทคนิค EDS แสดงผลดังปรากฏใน ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ตรวจพบเผยให้เห็นประเด็นที่มีนัยสำคัญ องค์ประกอบหลักของโครเมียม (Cr) อยู่ที่ระดับประมาณ 16.18 – 17.07 wt.% และนิกเกิล (Ni) อยู่ที่ระดับ 6.49 – 6.84 wt.% ในขณะที่ตรวจพบโมลิบดีนัม (Mo) ในระดับต่ำมาก (< 0.7 wt.%) ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุไม่ใช่เกรด 316

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบดังกล่าวกับช่วงองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตามมาตรฐาน ASTM A240/A240M ซึ่งกำหนดช่วงปริมาณนิกเกิลไว้ที่ประมาณ 8.0–10.5 wt.% พบว่าค่าปริมาณนิกเกิลที่ตรวจวัดได้จาก SEM-EDS บริเวณชิ้นงานเกินมีค่าประมาณ 6.49–6.84 wt.% ซึ่งต่ำกว่าช่วงที่คาดหวังสำหรับเกรด 304 (ASTM International, 2022) ผลดังกล่าวบ่งชี้ความเป็นไปได้ว่าวัสดุอาจมีองค์ประกอบแตกต่างจากเกรด 304 มาตรฐาน หรือค่าที่วัดได้อาจได้รับอิทธิพลจากสภาพผิว ผลึกภัณฑ์การกัดกร่อน หรือข้อจำกัดของเทคนิค SEM-EDS ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ ดังนั้น ผล EDS ในงานนี้จึงควรใช้เป็นหลักฐานสนับสนุนสมมติฐานด้านวัสดุเท่านั้น และควรยืนยันเพิ่มเติมด้วย OES, PMI หรือ Mill Certificate ก่อนสรุปอย่างเป็นทางการว่าวัสดุไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

แม้ผลดังกล่าวยังไม่ใช่การยืนยันเชิงมาตรฐานวัสดุโดยสมบูรณ์ แต่การพบแนวโน้มของปริมาณนิกเกิลที่ต่ำกว่าค่าที่คาดหวังอาจเกี่ยวข้องกับความสามารถในการคงเสถียรภาพของโครงสร้างอสเทนนิติกและฟิล์มพาสซีฟ ซึ่งมีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมในสภาวะกรดและคลอไรด์ (Davis, 2000)

นอกจากนี้ การปรากฏของธาตุคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ในระดับค่อนข้างสูงบริเวณผิวและภายในหลุมกัดกร่อน บ่งชี้ถึงการก่อตัวของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนและสิ่งตกค้างบนผิวโลหะ ซึ่งมีแนวโน้มทำให้สภาวะภายในหลุมมีความเป็นกรดสูงขึ้น และเร่งให้เกิดกลไกการกัดกร่อนแบบ self-catalytic ตามที่รายงานไว้ในวรรณกรรมด้าน pitting corrosion ของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติก เมื่อเชื่อมโยงข้อมูลจาก SEM-EDS เข้ากับผลการแจกแจงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมในระดัมาโครที่กั้นถึง จะพบว่าความเสียหายไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะหลุมขนาดเล็ก แต่มีหลุมขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่ในสัดส่วนที่สูง ซึ่งส่งผลให้ความหนาที่มีประสิทธิภาพ (effective thickness) ของแผ่นกั้นถึงลดลงและเพิ่มจุดรวมความเค้นเฉพาะที่ ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถรับแรงดันของเหลวและความน่าเชื่อถือเชิงโครงสร้างของถังในระยะยาว

ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับกรอบแนวคิดการประเมินความรุนแรงของ pitting ตาม ASTM G46 ซึ่งพิจารณา รวมทั้งความหนาแน่น ขนาดความกว้างปากหลุม และความลึกเฉลี่ยของหลุม โดยในกรณีนี้สามารถจัดได้ว่าเป็นสภาวะความเสียหายที่มีทั้งความหนาแน่นของจำนวนหลุมในระดับสูงและมีหลุมขนาดใหญ่จำนวนหนึ่งที่มีศักยภาพเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการรั่วแบบ leak-before-break ในภาพรวม ข้อมูลจาก SEM และ EDS มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการวิเคราะห์ว่าความเสียหายของถังมีลักษณะสอดคล้องกับ pitting corrosion เฉพาะที่จากสภาวะแวดล้อมการใช้งาน และช่วยชี้ให้เห็นประเด็นด้านองค์ประกอบวัสดุที่ควรตรวจสอบเพิ่มเติม อย่างไรก็ตาม การระบุชนิดวัสดุฐานและการยืนยันว่าเป็นไปตามหรือไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของเกรด 304 ควรดำเนินการด้วยวิธีการตรวจยืนยันที่เหมาะสมกว่า เช่น OES, PMI หรือการตรวจสอบ Mill Certificate ซึ่งร่วมกันสนับสนุนความจำเป็นในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ การกำหนดเกณฑ์ซ่อมแซม และการพิจารณาปรับปรุงรายละเอียดการออกแบบและเงื่อนไขการใช้งานของถังถึงเพื่อยกระดับความปลอดภัยและความทนทานในระยะยาวต่อไป

สรุปและอภิปรายผล

จากการตรวจสอบกันถึงด้วยการบูรณาการวิธีการตรวจสอบหลายวิธี ได้แก่ การตรวจพินิจด้วยสายตา การวิเคราะห์ภาพถ่ายมาโคร การประเมินการกระจายตัวของหลุมกัดกร่อน การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของหลุม และการวิเคราะห์ SEM-EDS พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นมีลักษณะสอดคล้องกับการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) เฉพาะที่บริเวณก้นถัง โดยผลการแจกแจงขนาดหลุมพบว่าหลุมขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่ในสัดส่วนสูง ซึ่งสัมพันธ์กับบริเวณที่ตรวจพบการรั่วซึมในหน้านาง

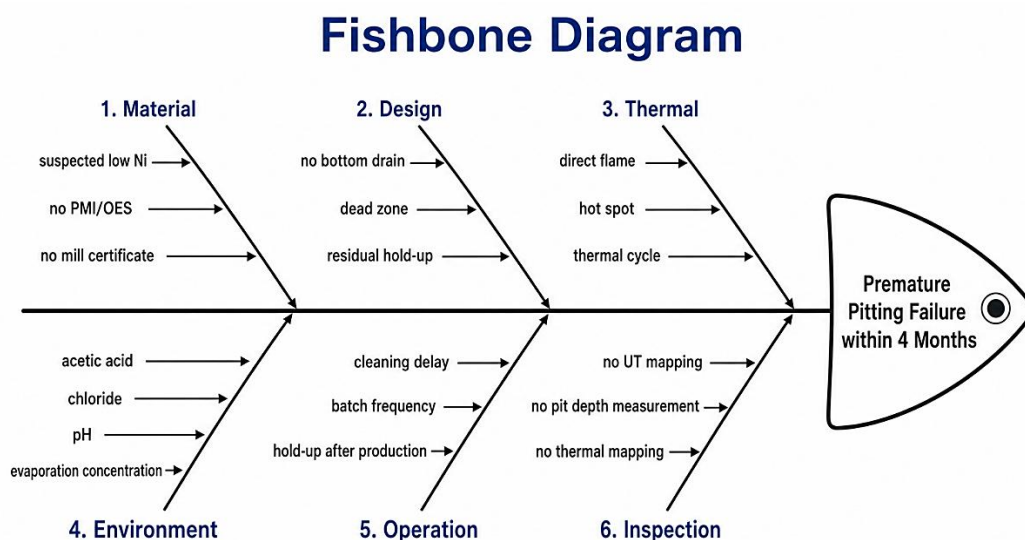
ผล SEM-EDS บ่งชี้ว่าบริเวณที่ตรวจวัดมีปริมาณนิกเกิล (Ni) ประมาณ 6.49–6.84 wt.% ซึ่งต่ำกว่าช่วงองค์ประกอบที่กำหนดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตาม ASTM A240/A240M อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก SEM-EDS เป็นเทคนิคเชิงกึ่งปริมาณและมีความไวต่อสภาพผิว ผลดังกล่าวจึงควรใช้เป็นหลักฐานเบื้องต้นในการตั้งสมมติฐานด้านวัสดุ และควรยืนยันเพิ่มเติมด้วย OES, PMI หรือ Mill Certificate ก่อนสรุปสถานะวัสดุอย่างเป็นทางการ

จากการสังเคราะห์หลักฐานทั้งหมด ความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลาประมาณ 4 เดือน มีแนวโน้มเกิดจากกลไกความเสียหายร่วม (Synergistic Failure Mechanism) ระหว่างปัจจัยหลัก 3 ด้าน ได้แก่

1. ปัจจัยด้านวัสดุ (Material factor) ผล SEM-EDS บ่งชี้ความเป็นไปได้ว่าวัสดุอาจมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าที่คาดการณ์สำหรับการใช้งานในสภาวะกรดและความร้อนสูง
2. ปัจจัยด้านการออกแบบ (Design factor) การไม่มีท่อระบายหรือวาล์วระบายที่กั้นถึงทำให้มีโอกาสเกิดของเหลวตกค้าง (Residual hold-up) บริเวณก้นถังหลังการผลิตและการล้างถัง
3. ปัจจัยด้านความร้อนและสภาพแวดล้อมกระบวนการ (Thermal and environmental factor) การใช้เปลวไฟสัมผัสกันถึงโดยตรงจาก แก๊ส LPG อาจทำให้เกิด hot spot และการระเหยซ้ำของของเหลวตกค้าง ส่งผลให้กรดอินทรีย์หรือสิ่งเจือปนมีความเข้มข้นเฉพาะจุด และเอื้อต่อการเกิด concentration cell และ pitting corrosion

เพื่อให้การอภิปรายผลมีความเป็นระบบและสอดคล้องกับแนวทางการวิเคราะห์สาเหตุรากของความเสียหาย (Root Cause Analysis) งานศึกษานี้จึงสังเคราะห์หลักฐานจากการตรวจพินิจด้วยสายตา การกระจายตัวของหลุมกัดกร่อน การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของหลุมด้วย OM และ SEM รวมถึงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย SEM-EDS ร่วมกับข้อมูลสภาวะการใช้งานจริงของถัง แล้วจัดกลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องในรูปแบบ Fishbone Diagram ดังแสดงในภาพที่ 10

แผนภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเสียหายของถังไม่ได้เกิดจากปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงลำพัง แต่เกิดจากความสัมพันธ์ของหลายปัจจัย ได้แก่ วัสดุ การออกแบบ การใช้งาน สภาพแวดล้อมของกระบวนการ ความร้อน และการตรวจสอบ/ควบคุมคุณภาพ โดยแต่ละปัจจัยมีบทบาทสนับสนุนให้เกิดการสลายตัวของฟิล์มพาสซีฟและการพัฒนาของการกัดกร่อนแบบรูเข็มบริเวณก้นถัง



ภาพที่ 10 Fishbone Diagram แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายแบบ pitting corrosion ของก้นถัง

จาก Fishbone Diagram จะเห็นได้ว่าปัจจัยแต่ละกลุ่มมีความเชื่อมโยงกันเป็นลำดับเหตุและผล กล่าวคือ การไม่มี bottom drain ทำให้เกิด residual hold-up หลังการผลิตและการล้างถัง ขณะที่การให้ความร้อนด้วยเปลวไฟโดยตรงจาก แก๊ส LPG อาจทำให้ของเหลวตกค้างบริเวณก้นถังได้รับความร้อนซ้ำจนเกิดการระเหยและเพิ่มความเข้มข้นเฉพาะจุดของกรดหรือสิ่งเจือปน เมื่อรวมกับความเป็นไปได้ของวัสดุที่มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าที่คาดการณ์ จึงทำให้สภาวะบริเวณก้นถังเหมาะสมต่อการเริ่มต้นและการเติบโตของ pitting corrosion ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ข้อจำกัดของข้อมูล

งานศึกษานี้เป็นกรณีศึกษาเชิงวิเคราะห์ความเสียหายจากชิ้นงานจริง โดยใช้หลักฐานจากการตรวจพินิจ ภาพถ่ายมาโคร การวิเคราะห์ขนาดหลุม การตรวจ OM และ SEM-EDS เป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีข้อมูลยืนยันเพิ่มเติมบางส่วน เช่น OES/PMI, UT thickness mapping, pit depth measurement, thermal mapping, flame temperature, skin temperature, chloride concentration, pH และ comparative experiment ดังนั้นข้อสรุปด้าน Root Cause จึงตีความเป็นสมมติฐานเชิงวิศวกรรมที่สนับสนุนด้วยหลักฐานที่มีอยู่

ผลการติดตามหลังการปรับปรุงเชิงวิศวกรรม

ภายหลังจากการวิเคราะห์ความเสียหายและจัดทำข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรม ผู้วิจัยและผู้ประกอบการได้ดำเนินการปรับปรุงในส่วนที่สามารถดำเนินการได้จริงภายใต้ข้อจำกัดของโรงงาน SME โดยมีการเปลี่ยนวัสดุบริเวณกันถังที่สัมผัสผลิตภัณฑ์เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีกรดอินทรีย์และความเสี่ยงจากสิ่งเจือปนหรือคลอไรด์ อย่างไรก็ตาม ระบบให้ความร้อนยังคงเป็นระบบเปลวไฟแก๊ส LPG สัมผัสกันถังโดยตรงเนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ งบประมาณ และความเหมาะสมของกระบวนการผลิตในโรงงาน SME

จากการติดตามผลภายหลังการปรับปรุงเป็นระยะเวลาประมาณ 1 ปี พบว่ายังไม่ปรากฏปัญหาการรั่วซึมหรือความเสียหายซ้ำในลักษณะเดียวกับกรณีเดิม ข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนในเชิงปฏิบัติว่า การปรับปรุงเกรดวัสดุเป็น 316L สามารถช่วยลดความเสี่ยงของการกัดกร่อนแบบรูเข็มในสภาวะการใช้งานจริงได้ แม้ระบบให้ความร้อนยังไม่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นระบบให้ความร้อนทางอ้อม อย่างไรก็ตาม ผลการติดตามนี้ควรตีความเป็นข้อมูลสนับสนุนจากภาคสนาม ไม่ใช่การยืนยันเชิงทดลองอย่างสมบูรณ์

ข้อเสนอแนะ

1. เปลี่ยนระบบให้ความร้อน ยกเลิกการใช้เปลวไฟสัมผัสกันถังโดยตรง (Direct-Fired) และเปลี่ยนมาใช้ ระบบให้ความร้อนทางอ้อม (Indirect Heating) เช่น Water Bath หรือ Steam Jacket เพื่อลดโอกาสเกิดจุดร้อนสะสม (Hot Spot) ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยเร่งที่อาจส่งผลต่อความเสียหายบริเวณกันถัง
2. พิจารณาใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ในกรณีที่มีคลอไรด์/กรดอินทรีย์สะสม และกำหนดให้มีการตรวจสอบใบรับรองคุณภาพ (Mill Certificate) หรือตรวจสอบส่วนผสมธาตุ (PMI) ก่อนรับมอบ เพื่อป้องกันวัสดุด้วยคุณภาพ
3. ปรับปรุงการออกแบบเพื่อการระบาย ออกแบบกันถังให้มีความลาดเอียงและติดตั้ง วาล์วระบายกันถัง (Bottom Drain) เพื่อขจัดจุดอับของเหลวตกค้าง (Dead Zone) ป้องกันการสะสมความเข้มข้นของกรดและเกลือ
4. มาตรการบำรุงรักษา ปรับปรุงระเบียบการทำความสะอาดให้ล้างถังทันทีหลังใช้งาน และกำหนดแผนตรวจสอบสภาพความหนาถังตามวาระ เพื่อประเมินความเสี่ยงก่อนเกิดการรั่วไหล

กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณ บริษัท เออีซี อินดัสเตรียล เซอร์วิส จำกัด ผู้บริหาร และทีมวิศวกร ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ ทรัพยากร และข้อมูลภาคสนามที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนการอำนวยความสะดวกด้านเทคนิคที่ช่วยให้การศึกษาสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น นอกจากนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ Welding Evaluation and Learning Laboratory (WELLab) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนด้านการตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมโลหการ และขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้การแนะนำและการสนับสนุนตลอดระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ASM International. (2002). *ASM handbook, Volume 11: Failure analysis and prevention*. Materials Park, OH: ASM International.
- Davis, J. R. (Ed.). (2006). *Corrosion of weldments*. Materials Park, OH: ASM International.

- ASTM International. (2017). *ASTM E3-11(2017): Standard guide for preparation of metallographic specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2021). *ASTM G46-21: Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2022). *ASTM A240/A240M-22: Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- British Stainless Steel Association. (n.d.). *Selection of stainless steels for handling acetic acid (CH₃COOH)*.
- Davis, J. R. (2000). *Nickel, cobalt, and their alloys*. Materials Park, OH: ASM International.
- Fontana, M. G. (1986). *Corrosion engineering* (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Frankel, G. S. (1998). Pitting corrosion of metals. *Journal of the Electrochemical Society*, 145(6), 2186–2198.
- Lai, J. K. L., Lo, K. H., & Shek, C. H. (Eds.). (2012). *Stainless steels: An introduction and their recent developments*. Bentham Science Publishers.
- Ministry of Public Health. (1985). *Notification of the Ministry of Public Health No. 92 B.E. 2528 Re: Prescription of quality or standard for containers, use of containers and prohibition of use of things as containers for food packaging*. Bangkok, Thailand.
- Sedriks, A. J. (1996). *Corrosion of stainless steels* (2nd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Szklarska-Smialowska, Z. (1986). *Pitting corrosion of metals*. Houston, TX: NACE International.
- Zadi, N., & Shaaban, A. (2012). Corrosion of stainless steel during acetate production. *Journal of Applied Sciences*, 12(15), 1587–1591.