

การวิเคราะห์ความเสียหายรอยเชื่อมของท่อสาขา (Weld of Branch Pipe) ในระบบวาล์วควบคุม (control valve) การพ่นละอองน้ำเพื่อควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำในท่อหลัก (main pipe) ในอุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมัน

จิราภรณ์ มณีพรหม

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

35 หมู่ที่ 3 เทคโนธานี ตำบลคลองห้า อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

ความเสียหายของเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ หรือ โครงสร้าง เป็นปัญหาสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมทุกประเภท เพราะจะนำไปสู่ความเสียหายทางเศรษฐกิจเป็นมูลค่ามหาศาล และอาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ การวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นส่วนดังกล่าวจึงมีความสำคัญยิ่งเพราะจะทำให้ทราบถึงสาเหตุที่แท้จริงของความเสียหายนั้น และยังเป็นแนวทางในการป้องกันการเกิดความเสียหายในลักษณะเดียวกันที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตได้ ความเสียหายของชิ้นส่วน เครื่องจักรและอุปกรณ์เกิดขึ้นจากหลายสาเหตุด้วยกัน ซึ่งอาจมาจากการเลือกใช้วัสดุและการออกแบบที่ไม่เหมาะสม รอยบกพร่องที่เกิดจากการผลิต การแตกหักเนื่องจากภาระกรรมทางกลที่ได้รับ การใช้งานในสภาวะที่มีสารกัดกร่อน หรือจากการบำรุงรักษาที่ไม่ถูกวิธี ผู้เขียนเองทำงานเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเสียหายที่ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ซึ่งให้บริการวิเคราะห์ความเสียหายของเครื่องมือและเครื่องจักรในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ การทำงานทางด้านนี้ต้องใช้ความรู้หลากหลายสาขานำมาวิเคราะห์ชิ้นงานที่เกิดความเสียหาย สำหรับผู้เขียนคิดว่าเป็นงานที่ทำหายมาก และมีความสุขที่ลูกค้าสามารถนำสาเหตุของความเสียหายที่วิเคราะห์ได้มาแก้ไข ปรับปรุงในอุตสาหกรรมของตนเองได้ เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาซ้ำอีก ผู้เขียนจึงมีความตั้งใจอยากรวบรวมความรู้ที่ได้จากการวิเคราะห์และประสบการณ์ที่ได้จากการทำงานทางด้านนี้มาเผยแพร่ และกระบวนกรวิเคราะห์ความเสียหายดังกล่าวอาจมีผู้อ่านที่ประสบปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ในโรงงานของท่านคล้ายๆ กัน จะสามารถนำไปใช้แก้ปัญหาหรือนำวิธีการที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่ท่านกำลังประสบ ซึ่งบทความฉบับนี้ขอเสนอการวิเคราะห์ความเสียหายของรอยเชื่อมที่

เชื่อมต่อระหว่างท่อสาขา (branch pipe) ซึ่งมีอุปกรณ์ชนิดวาล์วควบคุม (control valve) อยู่ด้านบน

ความเสียหาย : พบรอยแตกที่บริเวณรอยเชื่อมด้านนอกของท่อหลัก ลักษณะความเสียหายเป็นรอยแตกกว้างตามแนวของรอยเชื่อมที่บริเวณ Weld Toe ทะลุถึงด้านใน

ข้อมูลเบื้องต้น : ตัวอย่างรอยเชื่อมที่เกิดความเสียหายเป็นส่วนหนึ่งของท่อสาขา (branch pipe) ด้านบนติดตั้งอุปกรณ์ชนิดวาล์วควบคุม (control valve) ทำหน้าที่ควบคุมการพ่นน้ำ Boiler Feed Water เข้าสู่ท่อหลัก (main pipe) เพื่อลดอุณหภูมิของไอน้ำภายในท่อหลัก โดยใช้หัวพ่นแบบ Spray Nozzle พ่นละอองน้ำเข้าไปบริเวณกึ่งกลางของท่อหลัก ซึ่งจะทำงานเมื่ออุณหภูมิของปลายทางสูงกว่าค่าควบคุม

วัสดุ : รอยเชื่อมที่เกิดความเสียหายเป็นรอยเชื่อมชนิด Fillet Weld ที่เชื่อมต่อระหว่างท่อหลักและท่อ Nozzle โดยท่อหลักและท่อ Nozzle ผลิตจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน ตามมาตรฐาน ASTM A335 เกรด P11 ไม่ทราบชนิดของวัสดุเชื่อม

อายุการใช้งาน : ประมาณ 9 ปี

ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสียหาย

ประกอบด้วยการตรวจพินิจ (visual inspection), การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ (chemical composition analysis of material), การตรวจสอบสภาพผิวแตก (fractographic investigation), การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนผิวแตก (chemical analysis of fracture surface), และการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา (metallographic Investigation)

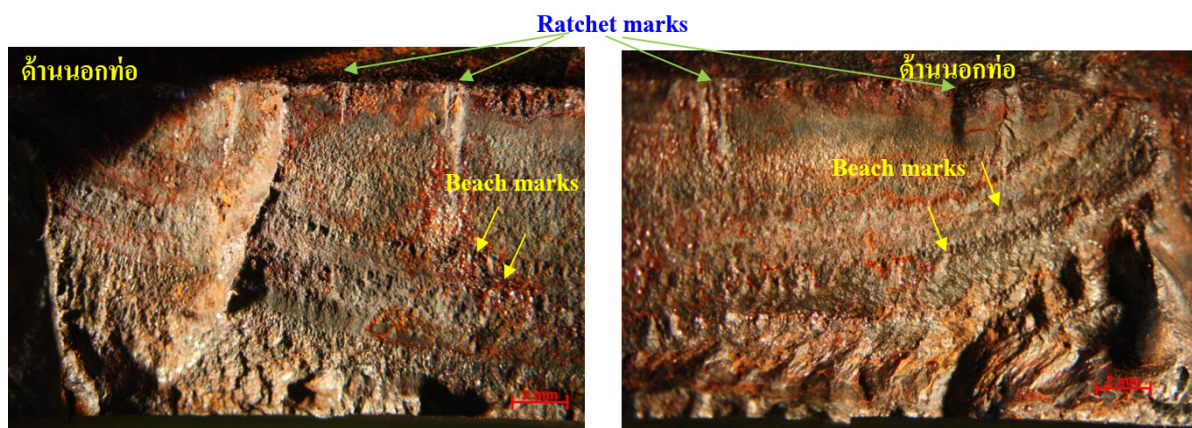
● พิจารณาตรวจสอบพินิจ

รอยเชื่อมของท่อสาขาพบความเสียหายเป็นรอยแตกร้าวตามแนวของรอยเชื่อมที่บริเวณ Weld Toe ทะลุถึงด้านใน บริเวณรอยแตกร้าวถูกตัดในห้องปฏิบัติการเพื่อเปิดผิวรอยแตกทั้งสองด้านออกจากกัน สภาพผิวรอยแตกทั้งสองแสดงลักษณะรอยแตกที่สมมาตรกัน ซึ่งบ่งชี้รอย Ratchet Marks ที่แสดงจุดเริ่มต้นรอยแตกจากผิวด้านนอกท่อ และขยายตัวสู่ผิวด้านในท่อตามแนวเส้นโค้งของรอย Beach Marks และถูกปกคลุมด้วยสารแทรกซึมสีแดงและผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนสีน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1. ผิวรอยแตก 1 และรอยแตก 2 ถูกล้างในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบสภาพผิวแตก พบรอย Ratchet Marks ที่แสดงจุดเริ่มต้นรอยแตกจากผิวด้านนอกท่อและขยายตัวสู่ผิวด้านในท่อตามแนวเส้นโค้งของรอย Beach Marks

รูปขยายบริเวณ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2. ภาพขยายผิวรอยแตกบริเวณที่ 1 ในรูปที่ 1 แสดงรอย Ratchet Marks ที่แสดงจุดเริ่มต้นรอยแตกจากผิวด้านนอกท่อและขยายตัวสู่ผิวด้านในท่อตามแนวเส้นโค้งของรอย Beach Marks และถูกปกคลุมด้วยสนิมทั่วผิวแตก

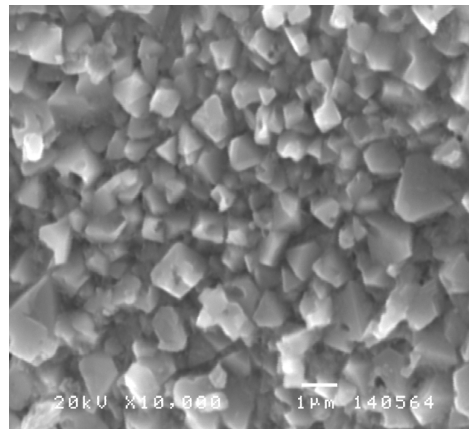
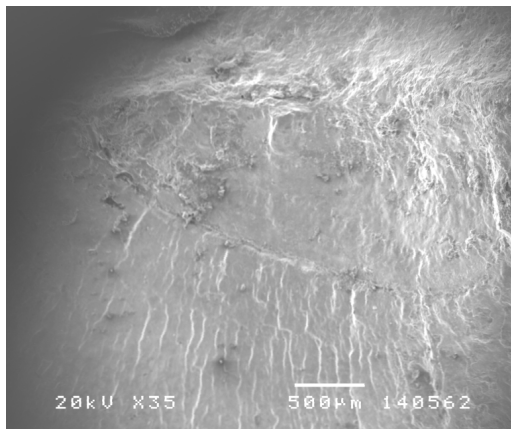
● การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ (Chemical composition analysis material)

ท่อหลักและรอยเชื่อมถูกตัดและเตรียมผิวเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ โดยใช้เครื่อง SPECTROLAB ผลการวิเคราะห์แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุท่อหลักสอดคล้องตามข้อกำหนดทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน ASTM A 335 เกรด P11

● **ผลการตรวจสอบรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM)**

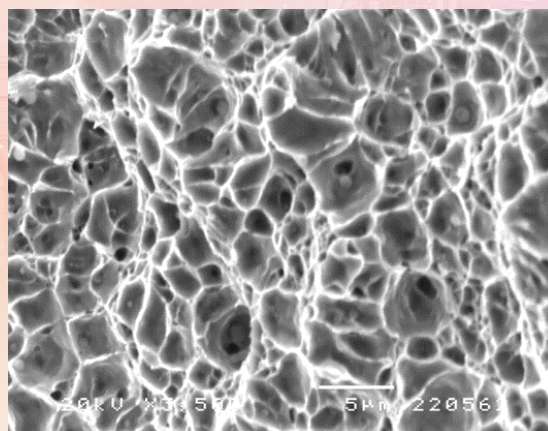
ผลการตรวจสอบรอยแตกบริเวณจุดเริ่มต้นของรอยแตกบริเวณผิวด้านนอกของท่อ แสดงสภาพผิวแตกลักษณะเปราะ มีรอย Ratchet Mark ที่ผิวด้านนอกท่อ มีแนวเส้นการขยายตัวของรอยแตก 2 ลักษณะ คือ แบบ Progressive Lines ขนานกับทิศทางการขยายตัวของรอยร้าว และแบบ Arrested Lines เป็นแนวเส้นโค้งตั้งฉากกับทิศทางการขยายตัวของรอย

ร้าว ผิวแตกถูกปกคลุมด้วยอนุภาคทรงเหลี่ยมจำนวนมาก บริเวณจุดขยายตัวของรอยแตกแสดงสภาพผิวแตกลักษณะเรียบ ผิวแตกถูกปกคลุมด้วยอนุภาคทรงเหลี่ยมจำนวนมาก ส่วนบริเวณด้านในท่อที่เป็นจุดสุดท้ายของรอยร้าวมีแนวเส้นการขยายตัวแบบ Arrested Lines เป็นแนวเส้นโค้งตั้งฉากกับทิศทางการขยายตัวของรอยร้าว ผิวแตกถูกปกคลุมด้วยอนุภาคทรงเหลี่ยมจำนวนมากเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3. ภาพถ่าย SEM ขยายบริเวณจุดเริ่มต้นของรอยแตก แสดงสภาพผิวแตกลักษณะเรียบและถูกปกคลุมด้วยอนุภาคทรงเหลี่ยมจำนวนมาก

สำหรับผิวแตกที่เปิดในท้องปฏิบัติการโดยการดึงให้ขาดของวัสดุท่อและวัสดุรอยเชื่อม แสดงสภาพผิวแตกที่ยืดตัวแบบเหนียว (ductile dimple fracture) ดังแสดงในรูปที่ 4

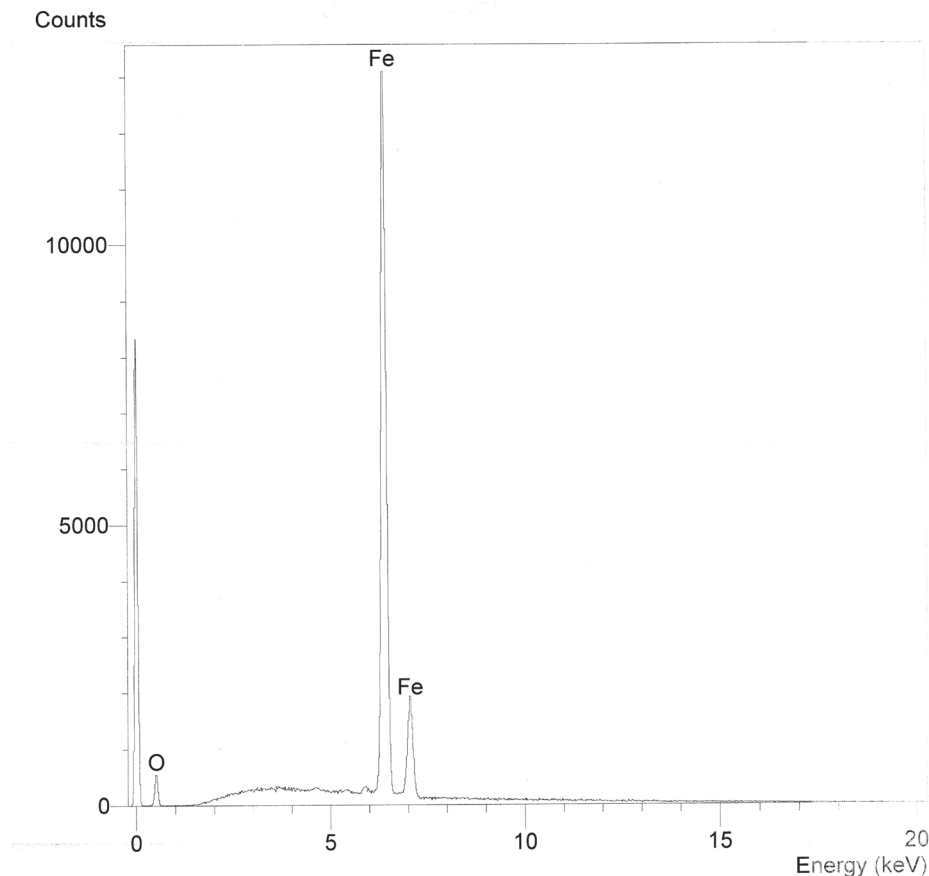


รูปที่ 4. ภาพถ่าย SEM ขยายบริเวณผิวแตกของวัสดุท่อที่ถูกดึงให้ขาดในท้องปฏิบัติการแสดงลักษณะผิวแตกที่ยืดตัวแบบเหนียว

● ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์บนผิวแตกด้วยวิธี Energy Dispersive X-Ray (EDX)

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบนผิวแตกที่ถูกปกคลุมด้วยอนุภาคทรงเหลี่ยมจำนวนมากด้วยวิธี Energy Dispersive X-Ray (EDX) ดังแสดงในรูปที่ 5

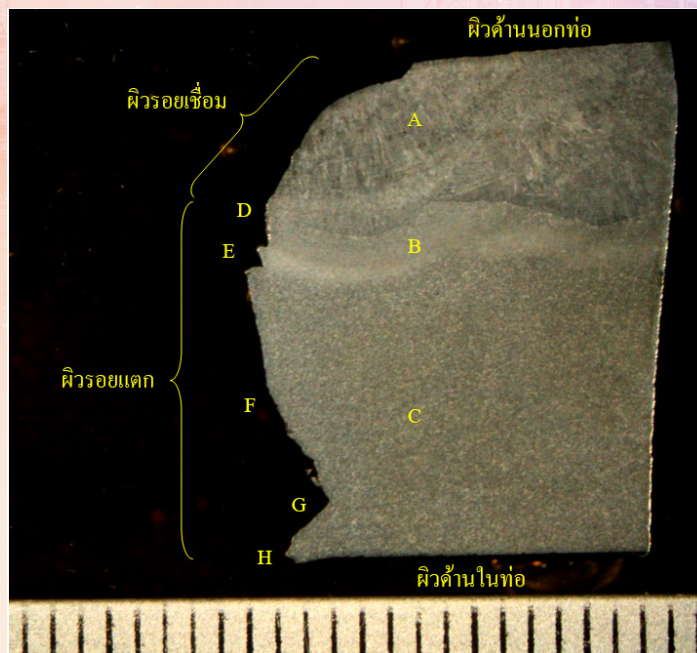
ผลการวิเคราะห์ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีบนผิวแตกที่มีธาตุเหล็ก (Fe) และออกซิเจน (O)



รูปที่ 5. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ทรงเหลี่ยมบนผิวแตก

● ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ตัวอย่างรอยแตก 1 ของรอยเชื่อมท่อสาขาถูกเลือกตัดผ่านบริเวณจุดเริ่มต้นรอยแตกและเตรียมเป็นชิ้นงานภาคตัดตามยาว (longitudinal section) และกัดกรด (etching) ด้วยสารละลาย Vilella's reagent เพื่อใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกล้อง Inverted microscope บริเวณที่ตัดเตรียมผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 6 ผลการตรวจสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 6. ภาพถ่ายของชิ้นงานภาคตัดตามยาวผ่านจุดเริ่มต้นของรอยแตก 1 เนื้อโลหะประกอบด้วยหลายบริเวณ ได้แก่ บริเวณเนื้อเชื่อม (A) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (B) บริเวณโลหะพื้น (C) ผิวรอยเชื่อม ผิวรอยแตก จุดเริ่มต้นของรอยแตก (D) และจุดสุดท้ายของรอยแตก (H)

อภิปรายผลการวิเคราะห์

จากผลการตรวจพินิจ พบความเสียหายที่บริเวณรอยเชื่อมด้านนอกของท่อหลัก ลักษณะความเสียหายเป็นรอยแตก-ร้าวตามแนวของรอยเชื่อมที่บริเวณ Weld Toe ทะลุถึงด้านในสภาพผิวรอยแตกแสดงลักษณะรอยแตกที่แสดงรอย Ratchet Marks เริ่มเกิดที่ผิวด้านนอกท่อ ซึ่งบ่งชี้ว่า รอยแตกมีจุดเริ่มต้นหลายรอยที่ผิวด้านนอกท่อ นอกจากนั้นยังพบแนวเส้นโค้งของรอย Beach Marks ซึ่งบ่งชี้การขยายตัวจากผิวด้านนอกสู่ผิวด้านในท่อ และบ่งชี้ถึงลักษณะเฉพาะของความเสียหายจากการล้า (fatigue damage)

จากผลการตรวจสอบสภาพผิวแตก พบว่าสภาพผิวแตกส่วนใหญ่มีลักษณะเรียบ และแตกแบบเปราะ (brittle fracture) และสอดคล้องกับผลการตรวจพินิจ ซึ่งพบลักษณะรอย Ratchet marks เริ่มเกิดที่ผิวด้านนอกท่อเช่นกัน ภายในบริเวณการขยายตัวแบบล้า ซึ่งแตกต่างจากผิวแตกที่เปิดในห้องปฏิบัติการโดยการดึงให้ขาด ทั้งวัสดุท่อแสดงสภาพผิวแตกที่ยืดตัวแบบเหนียว (ductile dimple fracture) แสดงนัยว่า

รอยแตกที่เกิดขึ้นไม่ใช่รอยแตกที่มาจากแรงดึง หรือจากการรับภาระกรรมเกิน (overload) แต่เป็นรอยแตกที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความเปราะ ซึ่งผลการตรวจสอบที่พบได้แสดงว่าเป็นรอยแตกเนื่องจากความล้า (fatigue fracture)

บริเวณผิวแตกโดยส่วนใหญ่ทั้งบริเวณจุดเริ่มต้นของรอยร้าวที่ผิวด้านนอก บริเวณขยายตัวของรอยร้าวที่ตรงกลางความหนา และบริเวณสุดท้ายของรอยร้าวที่ผิวด้านใน ถูกปกคลุมด้วยอนุภาคทรงเหลี่ยมจำนวนมาก โดยที่ผลการวิเคราะห์ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีบนผิวแตกที่มีธาตุเหล็ก (Fe) และออกซิเจน (O) จึงบ่งชี้ว่าผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนผิวแตกหรืออนุภาคทรงเหลี่ยมเหล่านั้น เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทออกไซด์ของเหล็กเกือบทั้งหมด

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ยืนยันว่ารอยแตกมีจุดเริ่มต้นที่ผิวท่อด้านนอก ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน สภาพผิวของรอยแตกมีหลายระนาบ ส่วนใหญ่มีลักษณะเรียบแบบผ่านเกรน (transgranular

fracture surface) และจุดสุดท้ายของรอยแตกอยู่ที่บริเวณ ผิวด้านในท่อ ผิวแตกถูกปกคลุมด้วยชั้นออกไซด์แบบแน่น ไม่มีรูพรุน (dense layer) ตลอดทั้งผิว ชั้นออกไซด์ที่พบมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ EDX ที่ตรวจพบผลิตภัณฑ์ประเภทออกไซด์ของเหล็ก

โดยทั่วไปแล้ว เมื่อเหล็กสัมผัสกับตัวกลางที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200–570 องศาเซลเซียส ผิวเหล็กจะเกิดการออกซิเดชันเกิดเป็นชั้นสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก ประกอบด้วย Magnetite (Fe_3O_4) และ Haematite (Fe_2O_3) ซึ่งสอดคล้องกับชั้นออกไซด์จากการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา และผลิตภัณฑ์ประเภทออกไซด์ของเหล็กจากการวิเคราะห์ EDX

ความเสียหายแบบการล้าเนื่องจากความร้อน (thermal fatigue) เป็นลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานที่มีความผันผวนของอุณหภูมิ (temperature fluctuation) หรือการได้รับความร้อนสลับกับการเย็นตัวเป็นรอบๆ ผิวด้านในของท่อสัมผัสกับตัวกลางที่เป็นไอน้ำอุณหภูมิควบคุมประมาณ 500 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิควบคุม หัวพ่นจะทำงานโดยการพ่นละอองน้ำ Boiler feed water อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เข้าไปบริเวณท่อหลักเพื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงจนถึงอุณหภูมิ

ควบคุม เมื่อวัสดุท่อสัมผัสกับตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงวัสดุท่อจะเกิดการยึดตัว และเมื่อวัสดุท่อสัมผัสกับตัวกลางที่มีอุณหภูมิลดลงวัสดุท่อจะเกิดการหดตัว ส่งผลให้วัสดุเกิดการล้าตัวเนื่องจากรับภาระกรรมแบบเป็นคาบเนื่องจากความผันผวนของอุณหภูมิที่สูงขึ้นและลดลง โดยมีจุดเริ่มต้นของการแตกร้าวบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนจากกระบวนการเชื่อม ซึ่งบริเวณดังกล่าวอาจมีความเค้นสะสมอยู่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ เมื่อได้ภาระกรรมแบบคาบ วัสดุจะเริ่มแตกร้าวจากบริเวณที่เป็นอ่อนแอหรือจุดบกพร่องดังกล่าว และขยายตัวทะลุสู่ผิวด้านในท่อ จนเกิดการแตกร้าวในที่สุด

สรุปผล

ความเสียหายของรอยเชื่อมของท่อสาขาเป็นลักษณะเฉพาะของความเสียหายแบบการล้าเนื่องจากความร้อน ที่มีจุดกำเนิดในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนที่ผิวด้านนอก ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเค้นสูง และเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานที่มีความผันผวนของอุณหภูมิหรือการได้รับความร้อนสลับกับการเย็นตัวเป็นรอบๆ ยิ่งเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการขยายตัวของรอยร้าวสู่ผิวด้านในของท่อจนกระทั่งเกิดรอยแตกในที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- ASTM. 2015. *ASTM A 335/A335M-15a: Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy Steel Pipe for High-Temperature Service*. Pennsylvania: ASTM.
- Eddyfi Technologies. 2022. Effective thermal fatigue cracking characterization in pipeline branch connections. [online]. Available at: <https://www.eddyfi.com/en/appnote/effective-thermal-fatigue-cracking-characterization-in-pipeline-branch-connections>, [accessed 19 August 2022].
- Materials Evaluation and Engineering, Inc., 2022. Leaking steam condensate pot. [online]. Available at: <https://www.mee-inc.com/case-studies-list/thermal-fatigue/>, [accessed 19 August 2022].