

โปรแกรมประเมินการคงสภาพของท่อที่มีรอยร้าวด้วยมาตรฐาน API 579 Computer program for cracked pipe integrity assessment based on API 579 standard

นายจตุพร แก้วอ่อน¹ และ ผศ.ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ^{2*}

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
*ติดต่อ: jirapong.K@chula.ac.th, 02-2186634, 02-2522889

บทคัดย่อ

งานวิจัยพัฒนาโปรแกรมประเมินการคงสภาพของท่อที่มีรอยร้าวด้วยมาตรฐาน API 579 โครงสร้างของโปรแกรม ออกแบบด้วยแนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ โปรแกรมสามารถประเมินการคงสภาพของท่อที่มีรอยร้าวระดับ 1 และ 2 ตามมาตรฐาน API 579 และมีส่วนอำนวยความสะดวกเรื่องการระบุลักษณะรอยร้าว โปรแกรมสามารถประเมินได้เพียงรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อที่ผนังด้านใน การเปรียบเทียบผลการระบุลักษณะรอยร้าวและการประเมินระดับ 1 และ 2 กับการคำนวณด้วยมือตามคำแนะนำในมาตรฐานพบว่าโปรแกรมทำงานได้ถูกต้อง

คำหลัก: ท่อ, รอยร้าว, การประเมินการคงสภาพ, มาตรฐาน API 579, โปรแกรมเชิงวัตถุ

Abstract

The research developed pipe integrity assessment software based on API 579. The program's structure was designed using an object-oriented concept. The program was capable to perform level 1 and 2 assessments and able to perform crack characterization. The program can assess only a pipe subjected to an internal pressure with a longitudinal internal semielliptical surface crack. The results obtained from the program consistent with those performed by a long-hand calculation.

Keywords: Pipe, Crack, Integrity assessment, API RP 579, Object-oriented programming.

1. บทนำ

ท่อเป็นหนึ่งในส่วนประกอบหลักของระบบขนถ่ายของไหลในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น โรงงานปิโตรเคมี โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น สิ่งที่โรงงานเหล่านี้ต้องควบคุมให้ดีที่สุดก็คือเสถียรภาพของกระบวนการผลิต กล่าวคือโรงงานต้องมีมาตรการหรือวิธีป้องกันอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งท่อ ไม่ให้เกิดความเสียหายจนทำให้ต้องหยุดกระบวนการผลิตอย่างกระทันหัน ทั้งนี้เพื่อป้องกันการสูญเสียรายได้ อันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน และการทำลายสภาพแวดล้อม

สาเหตุที่นำไปสู่การรั่วหรือการแตกหักของท่อมีได้หลายประการ เช่น จากรอยร้าวล้าที่กำเนิดจากรอยครูด (gouge) ตามแนวยาว [1,2] หรือรอยบุ๋ม (dent) [2] บนผิวท่อ จากรอยร้าวล้าร่วมกับการกัดกร่อน (corrosion fatigue) [3] จากรอยร้าวที่กำเนิดและเติบโตเนื่องจาก

ผลของความเค้นสถิตร่วมกับการกัดกร่อน (stress corrosion cracking, SCC) [4,5] โดยบริเวณที่ความเค้นสูงอาจเป็นจุดบกร่องจากการก่อสร้าง เช่น การเอียงศูนย์ของผนังท่อที่มาเชื่อมกัน [6] หรือการเจียรผิวรอยเชื่อมไม่เรียบเสมอกับผิวท่อ [7] เป็นต้น ตัวอย่างกรณีศึกษาเหล่านี้ทำให้ทราบว่ารอยร้าวเป็นรูปแบบหนึ่งที่สำคัญของความเสียหาย

เมื่อตรวจพบรอยร้าวในท่อ สิ่งที่ต้องดำเนินการต่อไปคือวิเคราะห์ว่ารอยร้าวมีผลอย่างไรต่อการทำงานของท่อ การวิเคราะห์นี้เรียกว่า การประเมินการคงสภาพ (structural integrity assessment) หากการประเมินแสดงว่าท่อสามารถใช้งานต่อต่อไปได้ จึงเริ่มวิเคราะห์ว่าใช้งานต่อไปได้อีกนานเพียงใด การวิเคราะห์นี้เรียกว่า การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ (remaining life assessment) การประเมินการคงสภาพและอายุใช้งานที่เหลือ

ของท้องถิ่นให้ทั้งความเชื่อมั่นในการทำงานของท่อ และแนวทางการวางแผนซ่อมบำรุงที่เหมาะสมได้

ในบรรดามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการประเมินการคงสภาพและอายุที่เหลือ เช่น R6 [8], BS 7910 [9], SINTAP [10] และ API 579 [11] เป็นต้น มาตรฐาน API 579 มีจุดเด่นในเรื่องความสมบูรณ์และการจัดระเบียบเนื้อหา [12] กล่าวคือมีเนื้อหาครอบคลุม ขั้นตอนการประเมิน คำแนะนำในการซ่อมแซม คำแนะนำในการปรับเปลี่ยนสภาวะใช้งาน คำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้น และตัวอย่างข้อมูลสมบัติวัสดุ

อย่างไรก็ดี แต่ละขั้นตอนของการประเมินประกอบด้วยรายละเอียดปลีกย่อยจำนวนมาก และเกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าด้วยชุดสมการต่าง ๆ หลายชุด ทำให้การประเมินเป็นกระบวนการที่ต้องการเวลามาก นอกจากนี้ผู้ประเมินก็ควรมีความรู้ด้านกลศาสตร์การแตกหักพอสมควร อุปสรรคนี้แก้ไขได้ด้วยการพัฒนาโปรแกรมที่ทำงานตามขั้นตอนในมาตรฐาน เพราะผู้ประเมินจะมีหน้าที่จัดเตรียมข้อมูลเท่านั้น

จากการสำรวจยังไม่พบโปรแกรมระดับงานวิจัยที่พัฒนาโดยอ้างอิงกับมาตรฐาน API 579 แต่พบโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่อ้างอิงกับมาตรฐานนี้ได้แก่ FlawCheck [13] EngFit [14] FITNESS-for-SERVICE-TOOLBOX [15] IWM VERB 8.0 [16] โปรแกรมเหล่านี้ยกเว้น IWM VERB 8.0 สามารถประเมินการคงสภาพได้เพียงระดับต้น (ระดับ 1) และไม่รองรับกรณีที่มีความเค้นทุติยภูมิเนื่องจากอุณหภูมิและความเค้นตกค้าง โปรแกรม IWM VERB 8.0 สามารถประเมินได้ถึงระดับสูงสุด (ระดับ 3) แต่ก็ยังขาดส่วนระบุลักษณะรอยร้าว ซึ่งจำเป็นในกรณีของรอยร้าวเฉียง หรือรอยร้าว 2 รอย

งานวิจัยนี้จะพัฒนาโปรแกรมประเมินการคงสภาพของท่อที่มีรอยร้าวโดยอ้างอิงกับขั้นตอนในมาตรฐาน API 579 ในขั้นต้นจะจำกัดความสามารถของโปรแกรมไว้ดังนี้ สามารถประเมินได้ถึงระดับ 2 รองรับรอยร้าวได้ชนิดเดียวคือ รอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อที่ผนังด้านใน และไม่รองรับภาวะทุติยภูมิ แต่จะเพิ่มการทำงานส่วนการระบุรอยร้าว การพัฒนาโปรแกรมจะนำแนวคิดเชิงวัตถุ (object-oriented) มาช่วยออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมเพื่อรองรับการปรับปรุงในอนาคต การพัฒนาโปรแกรมขึ้นเองนี้จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อโปรแกรมสำเร็จรูป และทำให้สามารถเพิ่มเติมความสามารถ หรือผลเฉลยใหม่ ๆ ได้เอง

2. แนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ

การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (object-oriented programming, OOP) [17] เป็นแนวคิดหนึ่งของการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ OOP มองว่ากระบวนการหาคำตอบคือการสื่อสารระหว่างตัวแปรชนิดวัตถุ (object) ซึ่งถูกสร้างมาจากคลาส (class) คลาสก็คือชนิดข้อมูล (data type) แบบหนึ่ง ซึ่งบรรจุทั้งสมบัติ (property) และพฤติกรรม (method) สำหรับเก็บข้อมูลและแสดงความสามารถเมื่อถูกเรียกใช้ทำงาน ตามลำดับ

การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุเริ่มด้วยการวิเคราะห์ปัญหาที่สนใจ เพื่อระบุว่าจะโปรแกรมควรประกอบด้วยคลาสอะไรบ้าง จากนั้นจึงระบุว่าจะแต่ละคลาสควรมีสมบัติและพฤติกรรมอะไรบ้าง และคลาสเหล่านี้ควรทำงานประสานกันอย่างไรจึงจะนำไปสู่คำตอบที่ต้องการ สุดท้ายจึงเริ่มเขียนโปรแกรมตามไวยากรณ์ของภาษาที่ใช้

คุณสมบัติพิเศษ 3 ประการที่ทำให้ OOP แตกต่างและได้เปรียบเมื่อเทียบกับวิธีเขียนโปรแกรมแบบอื่น เช่น การเขียนโปรแกรมเชิงขั้นตอน (procedural programming) มีดังนี้

1) สามารถควบคุมการเข้าถึงข้อมูล (data encapsulation) หรือสมบัติของคลาส โดยทั่วไปจะแบ่งระดับข้อมูลเป็น 3 ระดับ คือ ระดับสาธารณะ (public) ระดับป้องกัน (protected) และระดับเฉพาะที่ (private) การเข้าถึงสมบัติของวัตถุระดับป้องกันและระดับเฉพาะที่จะต้องผ่านพฤติกรรมการเข้าถึงข้อมูลของวัตถุเท่านั้น คุณสมบัตินี้ทำให้สมบัติของวัตถุไม่ถูกเปลี่ยนแปลงโดยไม่ได้ตั้งใจระหว่างที่โปรแกรมทำงาน หรือการตั้งชื่อตัวแปรซ้ำซ้อนในระหว่างการเขียนโปรแกรม

2) สามารถสืบทอด (inheritance) คลาสใหม่จากคลาสเดิมโดยเพิ่มเติมเฉพาะสิ่งที่แตกต่างจากเดิม แต่คลาสใหม่สามารถใช้สมบัติและพฤติกรรมของคลาสเดิมได้ คุณสมบัตินี้ช่วยลดความซ้ำซ้อนของการเขียนโปรแกรม โปรแกรมจึงเป็นระเบียบและมีขนาดเล็กลง

3) สามารถมีหลายรูปแบบ (polymorphism) กล่าวคือ ด้วยคำสั่งแบบเดียวกัน การทำงานของโปรแกรมจะเปลี่ยนไปตามวัตถุที่รับคำสั่งนั้น คุณสมบัตินี้ทำให้เมื่อเพิ่มคลาส (เพื่อเพิ่มความสามารถของโปรแกรม) ผู้เขียนโปรแกรมไม่จำเป็นต้องแก้ไขชื่อคำสั่งในโปรแกรมหลัก แต่เมื่อโปรแกรมทำงาน วัตถุที่สร้างจากคลาสใหม่จะตอบสนองต่อคำสั่งเดิมด้วยพฤติกรรมใหม่โดยอัตโนมัติ คุณสมบัตินี้ช่วยลดเวลาในการพัฒนาโปรแกรม

3. มาตรฐาน API 579

3.1 ขอบเขตการใช้งาน

มาตรฐาน API 579 [5] ถูกพัฒนาเพื่อใช้ประเมินการคงสภาพและอายุที่เหลือของกับโครงสร้างรับแรงดัน เช่น ระบบท่อ ภาชนะความดัน และถังเก็บ ที่ออกแบบและสร้างตามมาตรฐาน ASME (สำหรับโครงสร้างที่ออกแบบและสร้างตามมาตรฐานอื่นจะต้องปรับแก้ตามคำแนะนำก่อน)

มาตรฐานนี้ครอบคลุมกลไกความเสียหาย (damage mechanism) ที่พบบ่อยในชิ้นส่วนและโครงสร้างของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น การเสียนเนื้อโลหะเฉพาะบริเวณ (local metal loss) การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) รอยร้าว (crack) การคืบ (creep) ความเสียหายจากไฟไหม้ (fire damage) เป็นต้น

3.2 กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น

กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic fracture mechanics, LEFM) ศึกษาความสามารถในการรับภาระของวัตถุที่มีรอยร้าว โดยมีเงื่อนไขว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุที่ปลายรอยร้าวเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น

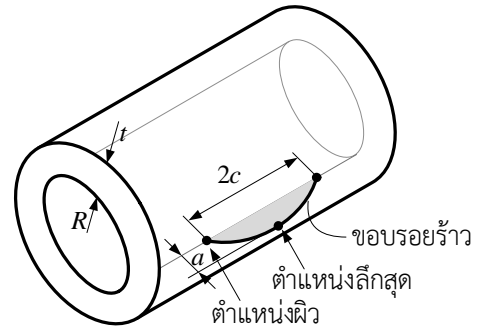
บทบาทของ LEFM กับการประเมินการคงสภาพของโครงสร้างที่มีรอยร้าวประกอบด้วย การคำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว (crack tip parameter) และการระบุค่าความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) ในโหมดเดียวกันกับการเสียนเนื้อที่ปลายรอยร้าว รายละเอียดของ LEFM ที่จำเป็นจะกล่าวในหัวข้อย่อยต่อไป

3.2.1 พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว

พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวหรือผลเฉลย K ทำหน้าที่บ่งชี้ความรุนแรงของรอยร้าว ผลเฉลย K ขึ้นกับชนิดโครงสร้าง โหมดการเสียนเนื้อ ชนิดและขนาดภาระ ชนิดและขนาดรอยร้าว เป็นต้น สำหรับท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อที่ผนังด้านใน (รูปที่ 1) มาตรฐาน API 579 กล่าวถึงวิธีคำนวณค่า K ไว้ 3 วิธี ดังนี้

1) วิธีโดยตรง (direct method) หมายถึงคำนวณค่า K จากผลเฉลยที่เป็นฟังก์ชันของความดัน มิติของท่อ และมิติของรอยร้าว จุดเด่นของวิธีนี้คือคำนวณค่า K ได้รวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือผลเฉลยใช้ไม่ได้กับภาระชนิดอื่น เช่น ภาระเชิงความร้อน (thermal stress) ความเค้นตกค้าง (residual stress) เป็นต้น

2) วิธี influence function ผลเฉลย K ของวิธีนี้จะเขียนอยู่ในรูป



รูปที่ 1 ท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อที่ผนังด้านใน

$$K = \sum_{i=0}^4 G_i \sigma_i \left(\frac{a}{t}\right)^i \tag{1}$$

โดย G_i คือ influence coefficients ซึ่งหาได้จากตารางในมาตรฐาน σ_i คือสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสี่ที่ใช้แทนการกระจายความเค้นในแนวเส้นรอบวง (circumferential stress) บนผนังของท่อ a คือความลึกรอยร้าว และ t คือความหนาของท่อ

จุดเด่นของวิธีนี้คือใช้กับภาระชนิดใด ๆ ก็ได้ เพราะสุดท้ายแล้วผลของภาระจะเขียนได้ในรูปของการกระจายความเค้น แม้ว่ามาตรฐานจะรองรับฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับสี่ของการกระจายความเค้น ซึ่งถือว่าแม่นยำและครอบคลุมแทบจะทุกกรณี แต่วิธีนี้ก็ยังมีจุดอ่อนคือ ถ้าผลเฉลยการกระจายความเค้นเป็นฟังก์ชันรูปอื่น ก็จะต้องแทนฟังก์ชันนั้นด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลที่สมมูลกัน ซึ่งอาจทำให้ความแม่นยำลดลงได้ นอกจากนี้ การแทนผลเฉลยการกระจายความเค้นบางกรณีต้องใช้ฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับสูงกว่าสี่ เช่น ความเค้นตกค้างในแนวเส้นรอบวงของรอยเชื่อมตามยาวที่ต้องประมาณด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับหก เป็นต้น [18]

3) วิธีฟังก์ชันน้ำหนัก (weight function method) ผลเฉลย K ของวิธีนี้จะเขียนในรูป

$$K = \int_0^a \sigma(x)m(x,a)dx \tag{2}$$

โดย $\sigma(x)$ คือฟังก์ชันการกระจายความเค้น ที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ตามความหนา และ $m(x,a)$ คือฟังก์ชันน้ำหนัก

จุดเด่นของวิธีนี้คือ ฟังก์ชัน $\sigma(x)$ จะมีรูปใดก็ได้ แต่วิธีนี้ก็ยังมีจุดอ่อนคือ ต้องใช้การอินทิเกรตเชิงตัวเลขเพื่อคำนวณค่า K

เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามวิธี โปรแกรมที่พัฒนาจะใช้วิธีฟังก์ชันน้ำหนัก เพราะสามารถรองรับรูปแบบการกระจายความเค้นได้กว้างขวางที่สุด

3.2.2 ความต้านทานการแตกหัก

ความต้านทานการแตกหักคือสมบัติของวัสดุ ซึ่งบ่งบอกความสามารถที่จะต้านทานการกำเนิด และการเติบโตอย่างมีเสถียรภาพของรอยร้าว ความต้านทานการแตกหักขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดวัสดุ อัตราการเสียรูป โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว สถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าว สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ เป็นต้น ความต้านทานการแตกหักที่ใช้ในการประเมินฯ คือความต้านทานการแตกหักโหมดที่ 1 ในสถานะความเครียดระนาบ (plane-strain fracture toughness) K_{Ic}

มาตรฐานแนะนำวิธีระบุค่า K_{Ic} ไว้ 4 แนวทาง ดังนี้

- 1) ทดสอบความต้านทานการแตกหักตามมาตรฐาน ASTM E 1820 [19] แล้วนำผลลัพธ์มาใช้
- 2) ประมาณค่าจากเส้นโค้งขอบเขตล่างของความต้านทานการแตกหักของ ASME (ASME lower bound fracture toughness curve) ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$K_{Ic} = 36.5 + 3.08 \exp[0.036(T - T_{ref} + 56)] \quad (3)$$

โดย K_{Ic} มีหน่วยเป็น $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ T คืออุณหภูมิของโครงสร้างที่ถูกประเมิน มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$ และ T_{ref} คืออุณหภูมิอ้างอิง มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$

- 3) ประมาณค่าจากผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงาน จากนั้นนำไปแทนในความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ ซึ่งมาตรฐานได้รวบรวมไว้เป็นจำนวนพอสมควร เช่น

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 5 \left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.02\right) \quad (4)$$

สำหรับช่วง upper shelf เป็นต้น โดย σ_{ys} คือ ความเค้นคราก มีหน่วยเป็น MPa CVN คือพลังงานชาร์ปี มีหน่วยเป็นจูล และ K_{Ic} มีหน่วยเป็น $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

- 4) หาจาก Master curve ซึ่งมีรูปสมการดังนี้

$$K_{Jc(\text{median})} = 30 + 70 \exp[0.0190(T - T_0)] \quad (5)$$

โดย $K_{Jc(\text{median})}$ คือค่ามัธยฐานของ K_{Ic} ซึ่งแปลงมาจากการทดสอบหา J_{Ic} (จึงใช้สัญลักษณ์ K_{Jc}) มีหน่วยเป็น $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ T_0 คืออุณหภูมิอ้างอิง ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ K_{Jc} ด้วยวิธีทางสถิติ รายละเอียดของการระบุ T_0 ศึกษาได้จากมาตรฐาน ASTM E 1921 [20]

3.2.3 ภาวะขีดจำกัด

แม้ว่าวัสดุที่ปลายรอยร้าวมีโอกาสเสียหายก่อนบริเวณอื่นก็ตาม แต่สำหรับวัสดุที่มีความแข็งแรงปานกลาง วัสดุสามารถต้านทานการเติบโตของรอยร้าวได้ดีกว่าวัสดุความแข็งแรงสูง หน้าตัดส่วนที่ยังไม่มีรอยร้าว (หรือลิกกาเมนต์ (ligament)) จึงมีโอกาสเสียหายจากการครากทั้งหน้าตัด (plastic collapse) ก่อนที่รอยร้าวจะเริ่มเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ ภาวะขีดจำกัด (limit load) ซึ่งหมายถึงขนาดภาระสูงสุดที่ทำให้เกิดการครากทั้งหน้าตัดของลิกกาเมนต์ จึงเป็นอีกหนึ่งขอบเขตที่ต้องพิจารณาในการประเมินการคงสภาพของโครงสร้าง

มาตรฐาน API 579 รวบรวมผลเฉลยภาวะขีดจำกัดของโครงสร้างมีรอยร้าวแบบต่าง ๆ ไว้ ซึ่งรวมกรณีที่มีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนาดแกนทอ ซึ่งงานวิจัยที่น่าสนใจ

3.3 การระบุลักษณะรอยร้าว

เนื่องจากรอยร้าวที่พบในโครงสร้างจริงมักจะมีรูปร่างไม่ชัดเจน ทำให้ยากต่อการระบุขนาดรอยร้าว และการหาผลเฉลย K ที่คล้องจองกับรูปร่างรอยร้าวที่พบ การประเมินฯ จึงต้องมีขั้นตอนสำหรับจัดการรอยร้าวที่พบ เพื่อให้การประเมินฯ ดำเนินต่อไปได้และอย่างน่าเชื่อถือ การจัดการนี้เรียกว่า การระบุลักษณะรอยร้าว (crack characterization) ซึ่งมี 4 ขั้นตอนดังนี้

- 1) ระบุรอยร้าวอุดมคติ (flaw idealization) คือการเปลี่ยนรูปร่างของรอยร้าวที่พบให้เป็นรูปเรขาคณิตง่าย ๆ ที่รักษาเค้าโครงของรอยร้าวจริง และนำไปสู่ผลการประเมินที่ปลอดภัยขึ้น ขั้นตอนนี้ทำให้สามารถระบุชนิดและขนาดรอยร้าวได้

- 2) เปลี่ยนแนววางตัวของรอยร้าวให้มาอยู่ในแนวที่การเสียรูปปลายรอยร้าวอยู่ในโหมดที่ 1 (โหมดเปิด) ขั้นตอนนี้ทำให้ทราบขนาดรอยร้าวสมมูล

- 3) พิจารณาปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าว (crack interaction) กรณีที่มีรอยร้าว 2 รอย มาตรฐานจะมีเกณฑ์ว่าควรพิจารณารอยร้าวแต่ละรอยแยกอิสระ หรือควรจะรวมรอยร้าวเป็นรอยเดียว

- 4) เปลี่ยนชนิดรอยร้าว (crack recategorization) เป็นรอยร้าวทะเลความหนา หากลิกกาเมนต์เหลือน้อย

3.4 การประเมินการคงสภาพ

มาตรฐาน API 579 แบ่งการประเมินฯ เป็น 3 ระดับ การประเมินระดับ 1 จะเพื่อความปลอดภัย (conservative) ไว้สูงที่สุด ระดับ 2 และ 3 จะลดการเพื่อความปลอดภัยลงตามลำดับ ด้วยการใช้ข้อมูลและเกณฑ์ที่เที่ยงตรงขึ้น รายละเอียดของแต่ละระดับมีดังนี้



3.4.1 การประเมินระดับ 1

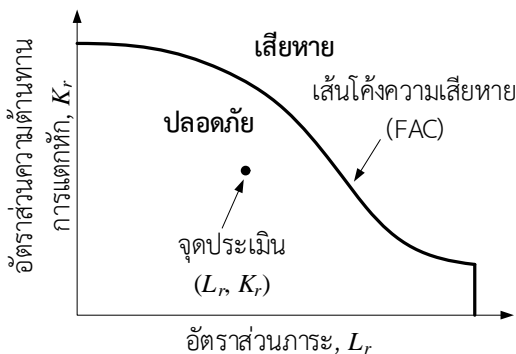
การประเมินระดับ 1 ใช้หลักการเปรียบเทียบขนาดความยาวรอยร้าวที่ระบุลักษณะแล้วกับความยาวรอยร้าวที่ยอมให้มีได้ในโครงสร้าง ซึ่งมาตรฐานเตรียมไว้สำหรับชนิดโครงสร้างและรอยร้าวแบบต่าง ๆ จำนวนหนึ่ง หากความยาวรอยร้าวที่ระบุลักษณะแล้วน้อยกว่าจะถือว่าโครงสร้างสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย แต่ถ้ามากกว่าจะถือว่าโครงสร้างเสียหาย ผู้รับผิดชอบต้องเปลี่ยนชิ้นส่วน หรือปรับลดภาระใช้งาน อย่างไรก็ตาม ถ้าเป็นไปได้ควรประเมินซ้ำด้วยวิธีประเมินระดับสูงขึ้น

3.4.2 การประเมินระดับ 2

การประเมินระดับ 2 จะใช้แผนภาพความเสียหาย (failure assessment diagram, FAD) ในรูปที่ 2 แผนภาพนี้พิจารณาความเสียหายทั้งการครากทั้งหน้าตัด และการแตกหักควบคู่กัน โดยมีเส้นโค้งความเสียหาย (failure assessment curve, FAC) แบ่งแผนภาพเป็นบริเวณปลอดภัยและบริเวณเสียหาย การประเมินจะมุ่งไปสู่การหาอัตราส่วนระหว่างภาระกับภาระขีดจำกัด หรือ L_r และอัตราส่วนระหว่างพารามิเตอร์ K กับความต้านทานการแตกหัก หรือ K_r จากนั้นพล็อตจุด (L_r, K_r) หรือจุดประเมินบนแผนภาพ หากจุดประเมินอยู่ใต้หรืออยู่บน FAC จะถือว่าโครงสร้างปลอดภัย และผู้ประเมินควรประเมินอายุใช้งานที่เหลือต่อไป แต่ถ้าจุดประเมินอยู่นเหนือ FAC จะถือว่าโครงสร้างไม่ปลอดภัย ผู้ประเมินควรปฏิบัติตามคำแนะนำที่มาตรฐานให้ไว้

3.4.3 การประเมินระดับ 3

การประเมินระดับ 3 ยังคงใช้หลักการเหมือนกับการประเมินระดับ 2 แต่มี 5 ทางเลือก คือ A, B, C, D และ E ทางเลือก A เกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบ probabilistic ทางเลือก B เกี่ยวกับการใช้ FAC ที่มีรูปร่างขึ้นกับสมบัติวัสดุ ทางเลือก C เกี่ยวกับการใช้ FAC ที่มีรูปร่างขึ้นกับสมบัติวัสดุ ชนิดของโครงสร้างและรอยร้าว ทางเลือก D



รูปที่ 2 แผนภาพประเมินความเสียหาย (FAD)

เกี่ยวกับการประยุกต์การเติบโตอย่างมีเสถียรภาพในการวิเคราะห์ และทางเลือก E เกี่ยวกับการใช้คำแนะนำเพิ่มเติมของมาตรฐานอื่น ๆ มาประกอบการประเมินฯ

4. การพัฒนาโปรแกรม

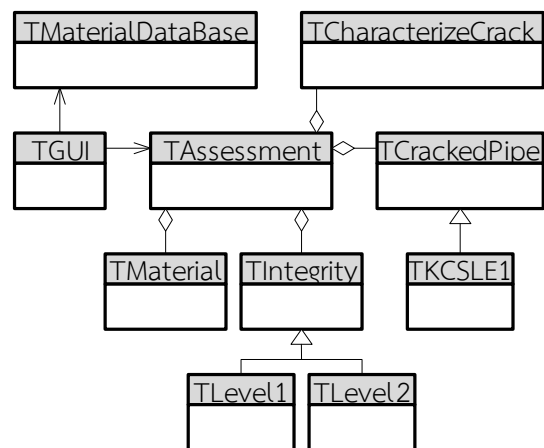
4.1 โครงสร้างของโปรแกรม

โครงสร้างของโปรแกรมที่พัฒนาสามารถแสดงเป็นแผนภาพคลาส (class diagram) ได้ดังรูปที่ 3 คลาสในรูปแบบได้ 3 กลุ่มคือ

1) กลุ่มอินเทอร์เฟซ ประกอบด้วยคลาส TGUI ทำหน้าที่รับค่าและแสดงผลการประเมิน และคลาส TMaterialDataBase ทำหน้าที่อำนวยความสะดวกเรื่องการระบุสมบัติของวัสดุจากฐานข้อมูล

2) กลุ่มปฏิบัติการ ประกอบด้วยคลาส TMaterial, TCrackedPipe, TCharacterizeCrack และ TIntegrity คลาส TMaterial จะเก็บข้อมูลวัสดุ และประมาณค่าสมบัติของวัสดุจากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ต่าง ๆ คลาส TCrackedPipe จะเก็บข้อมูลของท่อ รอยร้าว ภาระ และคำนวณความเค้นจากภาระชนิดต่าง ๆ คำนวณพารามิเตอร์ K และคำนวณภาระขีดจำกัด คลาส TCharacterizeCrack ทำหน้าที่จัดการกับรอยร้าว และส่งผลลัพธ์ให้กับคลาส TCrackedPipe สุดท้าย คลาส TIntegrity จะเก็บเงื่อนไขการประเมินแต่ละระดับ โดยรายละเอียดจะปรากฏในคลาสสูง TLevel1 และ TLevel2 กล่าวคือคลาส TLevel1 เก็บวิธีคำนวณความยาวรอยร้าวที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในท่อ คลาส TLevel2 เก็บวิธีสร้าง FAC วิธีคำนวณจุดประเมิน เป็นต้น

3) กลุ่มสั่งการ คือคลาส TAssessment ทำหน้าที่สร้างวัตถุจากคลาสในกลุ่มปฏิบัติการ จากนั้นจะเรียกใช้วัตถุเหล่านั้นตามขั้นตอนการประเมิน



รูปที่ 3 แผนภาพคลาสของโปรแกรม

โครงสร้างของโปรแกรมรองรับการเพิ่มคลาสใหม่ ๆ เช่น เพิ่มระดับการประเมินที่คลาส TIntegrity หรือเพิ่มท่อที่มีรอยร้าวชนิดอื่นที่คลาส TCrackedPipe เป็นต้น

4.2 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม

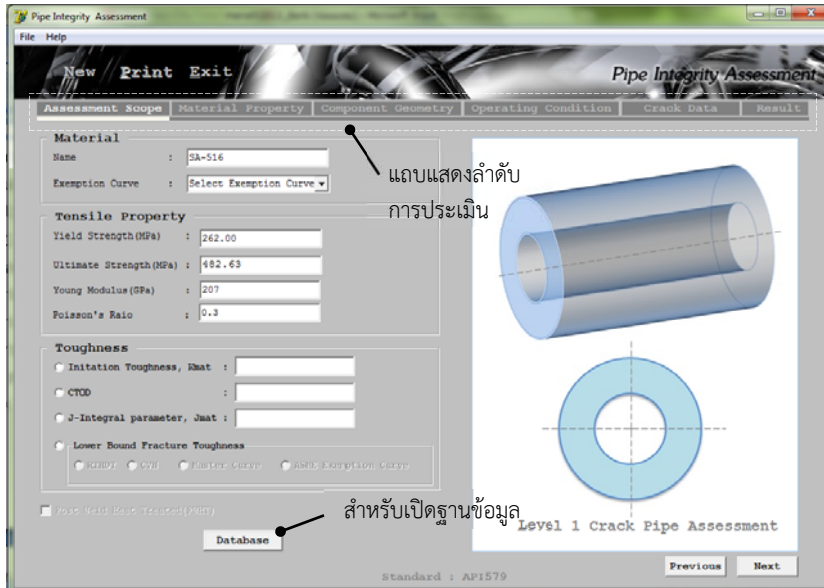
รูปที่ 4(ก) แสดงตัวอย่างหน้าจอขณะที่โปรแกรมทำงาน ในรูปจะเห็นแถบแสดงลำดับการประเมิน แต่ละลำดับขั้นจะมีรายละเอียดของหน้าจอตามกลุ่มข้อมูลที่คุณประเมินต้องป้อนและมีภาพประกอบ การใช้โปรแกรมเพื่อประเมินการคงสภาพจึงเป็นเพียงการป้อนข้อมูลเรียงจาก ระดับการประเมิน สมบัติวัสดุ มิติของท่อ ภาระ รอยร้าว และแสดงผลการประเมินในหน้าจอสุดท้ายดังรูปที่ 4(ข) โปรแกรมจึงสามารถลดเวลาที่ใช้ประเมิน และลด

ความจำเป็นที่ผู้ประเมินต้องเข้าใจทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก ได้อย่างชัดเจน

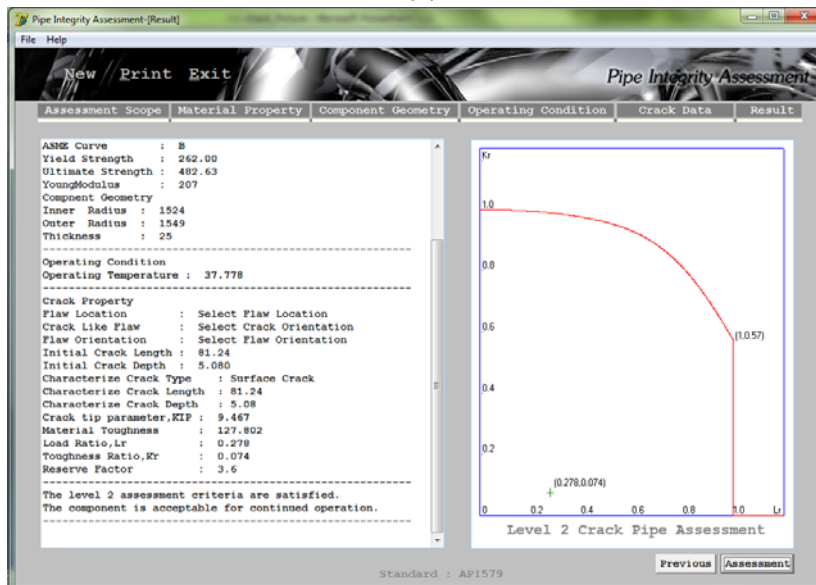
4.3 ขีดความสามารถของโปรแกรม

โปรแกรมที่กำลังพัฒนามีขีดความสามารถดังนี้

- ระบุลักษณะรอยร้าวที่อยู่ใกล้กันได้ไม่เกิน 2 รอย
- ประเมินการคงสภาพระดับ 1 และ 2 ของท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนาดแกนทอที่ผนังด้านใน (ดูรูปที่ 1 ประกอบ) โดยอัตราส่วนความหนาต่อรัศมีของท่อ t/R ตั้งแต่ 0 ถึง 1 อัตราส่วนความลึกต่อครึ่งความยาวรอยร้าว a/c ตั้งแต่ 0.03125 ถึง 2 และอัตราส่วนความลึกรอยร้าวต่อความหนาท่อ a/t ตั้งแต่ 0 ถึง 0.8



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมขณะทำงาน (ก) หน้าจอป้อนสมบัติวัสดุ (ข) หน้าจอแสดงผลการประเมิน (ระดับ 2)

- รองรับการบ่อนการะในรูปความดันภายใน และในรูปฟังก์ชันการกระจายความเค้น (โพลีโนเมียลอันดับสี่)
- รองรับการบ่อนข้อมูลสมบัติแรงดึงโดยตรงหรือเลือกจากฐานข้อมูล (ตัวอย่าง)
- รองรับการบ่อนข้อมูลความต้านทานการแตกหักของวัสดุรูปแบบต่าง ๆ ที่กล่าวในหัวข้อ 3.2.2

5. การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

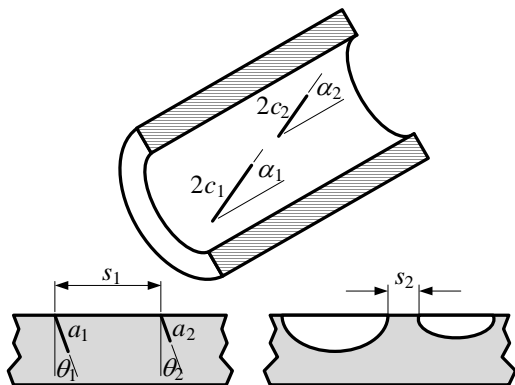
การตรวจสอบใช้วิธีเปรียบเทียบผลการประเมินจากโปรแกรม กับผลการคำนวณด้วยมือ การตรวจสอบมี 2 ส่วน คือ 1) ส่วนการระบุลักษณะรอยร้าว และ 2) ส่วนการประเมินการคงสภาพ ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 การระบุลักษณะรอยร้าว

ท่อรับความดันภายใน 100 MPa มีรัศมีภายใน 1,524 มม. หนา 25 มม. ถูกตรวจพบว่ามีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีที่ผนังด้านในสองรอยดังรูปที่ 5 รอยร้าวแรกมีความยาว $2c_1$ และความลึก a_1 เท่ากับ 27 มม. และ 6.25 มม. ตามลำดับ รอยร้าวที่สองมีความยาว $2c_2$ และความลึก a_2 เท่ากับ 29.5 มม. และ 7.25 มม. ตามลำดับ แนวยาวของรอยร้าวทำมุม $\alpha_1 = \alpha_2 = 15^\circ$ กับแนวแกนท่อ แนวลึกของรอยร้าวทำมุม $\theta_1 = \theta_2 = 10^\circ$ กับแนวเส้นรัศมี ระยะระหว่างรอยร้าว s_1 และ s_2 เท่ากับ 5.25 มม. และ 6.25 มม. ตามลำดับ

เมื่อผู้ประเมินบ่อนข้อมูลข้างต้นแล้ว โปรแกรมจะทำงานตามขั้นตอนที่กล่าวในหัวข้อ 3.3 เริ่มจากเปลี่ยนแนววางตัวของรอยร้าวแต่ละรอย จากนั้นพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าว และเปลี่ยนชนิดรอยร้าว (กรณีทีลิกกาเมนต์เหลือน้อย)

สำหรับปัญหาที่ตั้ง โปรแกรมให้ผลลัพธ์เป็นรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรียาว 64.79 มม และลึก 7.376 มม ซึ่งตรงกับการคำนวณด้วยมือ



รูปที่ 5 ท่อมีรอยร้าวเฉียงสองรอยที่ผนังด้านใน

5.2 การประเมินการคงสภาพ

ปัญหาที่ใช้ตรวจสอบการประเมินระดับที่ 1 และ 2 ของโปรแกรมมีรายละเอียดดังนี้

ท่อรับความดันภายใน 0.9653 MPa และทำงานที่อุณหภูมิ 37.78 องศาเซลเซียส ท่อทำด้วยวัสดุ SA-516 Grade 70, Carbon Steel, P1, Group 2 ท่อมีรัศมีภายใน 1,524 มม และหนา 25 มม การตรวจสอบพบรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อและตั้งฉากกับแนวรัศมีท่อที่ผนังด้านใน (ดูรูปที่ 1 ประกอบ) โดยรอยร้าวอยู่นอกบริเวณรอยเชื่อมตามยาว (seam weld) ความยาวของรอยร้าว $2c$ และความลึกของรอยร้าว a เท่ากับ 81.28 มม. และ 5.080 มม. ตามลำดับ

สำหรับการประเมินระดับ 1 โปรแกรมจะทำงานตามที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.1 ผลลัพธ์จากโปรแกรมมีดังนี้ ความยาวรอยร้าวสมมูลของท่อเท่ากับ 81.28 มม. ความยาวรอยร้าวสูงสุดที่ยอมให้มีในท่อได้เท่ากับ 203 มม. ดังนั้นจึงสรุปว่าโครงสร้างปลอดภัย ผลลัพธ์นี้คล้องจองกับการคำนวณด้วยมือ

สำหรับการประเมินระดับ 2 หลังจากโปรแกรมระบุลักษณะรอยร้าวเสร็จแล้ว ก็จะทำงานตามที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.2 ผลลัพธ์จากโปรแกรมมีดังนี้ L_r เท่ากับ 0.278 K_r ที่ตำแหน่งผิวและตำแหน่งลึกสุดเท่ากับ 0.012 และ 0.074 ตามลำดับ และจุดประเมินนี้อยู่ใต้ FAC ดังนั้นจึงสรุปว่าโครงสร้างปลอดภัย ผลลัพธ์นี้คล้องจองกับการคำนวณด้วยมือ

6. สรุป

งานวิจัยพัฒนาโปรแกรมประเมินการคงสภาพของท่อมีรอยร้าว โดยวางโครงสร้างโปรแกรมด้วยแนวคิดเชิงวัตถุ โปรแกรมมีส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่เข้าใจง่าย สามารถลดความซับซ้อนของกระบวนการประเมินการคงสภาพได้ และทำงานได้ถูกต้อง โปรแกรมยังมีขอบเขตใช้งานจำกัด แต่สามารถพัฒนาให้สมบูรณ์ขึ้นได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

9.เอกสารอ้างอิง

- [1] National Transportation Safety Board, *Anhydrous Ammonia Pipeline Rupture Near Kingman*, URL: <http://www.nts.gov/doclib/reports/2007/PAB0702.pdf>, access on 14/06/2012.
- [2] Transportation Safety Board of Canada, *Crude Oil Pipeline Leak*, URL: <http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/pipeline/2009/p09h0084/p09h0084.pdf>, access on 14/06/2012.
- [3] Transportation Safety Board of Canada, *Crude Oil Pipeline Rupture*, URL: <http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/pipeline/1999/p99h0021/p99h0021.pdf>, access on 14/06/2012.
- [4] Transportation Safety Board of Canada, *Natural Gas Pipeline Rupture*, URL: <http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/pipeline/2011/p11h0011/p11h0011.pdf>, access on 14/06/2012.
- [5] Manfredi, C. and Otegui, J.L., (2002). Failure by SCC in buried pipelines, *Eng. Fail. Ana.*, vol. 9, pp. 495-509.
- [6] Barbosa, C., de Souza, S.M.C., Centeno, R.O., Abud, I.C., and Ferraz, O.B., (2006). Failure analysis of pipes used in a hydrodesulfuration system of a petrochemical plant, *Eng. Fail. Ana.*, vol. 13, pp. 1076-1091.
- [7] Hasan, F., Iqbal, J., and Ahmed F., (2007). Stress corrosion failure of high pressure gas pipeline, *Eng. Fail. Ana.*, vol. 14, pp. 801-809.
- [8] Milne, I., Ainsworth, R.A., Dowling, A.R., and Stewart, A.T., (1988). Assessment of the integrity of structures containing defects, *Int. J. of Press. Vess. and Pip.*, vol. 32, pp. 3-104.
- [9] British Standards, BS 7910 (2005). *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*.
- [10] European Fitness for Service Network, *SINTAP Procedure*, (1999). URL: http://www.eurofitnet.org/sintap_Procedure_version_1a.pdf, access on 14/06/2012.
- [11] American Petroleum Institute and The American Society of Mechanical Engineers, (2007). *Fitness-For-Service: API Recommended Practice 579*. 2nd. Ed., Natlpetrochemical Publication, Washington.
- [12] Ruiz Ocejó, J., González-Posada, M.A., Gutiérrez-Solana, F., and Gorrochategui, I., (1997). *Review of existing procedure*, Report/SINTAP/UC/04, URL: http://www.eurofitnet.org/sintap_UC-04.pdf, access on 14/06/2012.
- [13] BMT Fleet Technology Ltd, *Structural Integrity Management Software*, URL: <http://www.bmt-software.com/downloads/BMTFlawCheck.pdf>, access on 14/06/2012.
- [14] TWI Ltd., *Engineering Fitness-For-Service Assessment Software*, URL: <http://www.twisoftware.com>, access on 14/06/2012.
- [15] Technical Toolbox Ltd., *Fitness-for-Service-Toolbox*, URL: <http://dev.ttoolbox.com/products/brochures/Fitness4ServiceToolbox.pdf>, access on 14/06/2012.
- [16] *Fracture Assessment Software IWM VERB 8.0*, URL: <http://www.en.iwm.fraunhofer.de/profile/networking/projects-with-their-own-websites/verb/>, access on 14/06/2012.
- [17] Zarko Gajic. Learning Object Oriented Programming with Delphi, URL: http://delphi.about.com/od/course/a/oop_intro.htm, access on 14/06/2012.
- [18] Bate, S.K., Green, D. and Buttle, D., (1997). A review of residual stress distributions in welded joints for the defect assessment of offshore structures, URL: <http://www.hse.gov.uk/research/othpdf/400-499/oth482.pdf>, access on 14/06/2012.
- [19] ASTM E 1820, *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [20] ASTM E 1921, *Standard Test Method for Determination of Reference Temperature T_0 for Ferritic Steel in the Transition Range*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.