

ซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพของโครงสร้างทรงกระบอกที่มีรอยร้าวด้วยระเบียบวิธี API 579

Software for Integrity Assessment of Cracked Cylindrical Structure with API 579 Procedure

นางสาวพงษ์ทิพย์ ช่างพานิช¹ และ ผศ.ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ*

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*ติดต่อ: jirapong@chula.ac.th, 02-2186634, 02-2522889

บทคัดย่อ

การประเมินการคงสภาพของโครงสร้างที่ตรวจพบรอยร้าวช่วยยืนยันความปลอดภัยของการใช้งานโครงสร้างต่อ แต่เนื่องจากขั้นตอนการประเมินมีรายละเอียดมากจึงเกิดการพัฒนาซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามซอฟต์แวร์เหล่านี้มีราคาสูง อีกทั้งยังรองรับชนิดของโครงสร้าง และระดับการประเมินได้จำกัด การพัฒนาซอฟต์แวร์ลักษณะนี้ขึ้นเองสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายระยะยาวและสามารถปรับปรุงให้ทันสมัยได้ บทความนี้อธิบายการพัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพของโครงสร้างทรงกระบอกที่มีรอยร้าว โดยอิงกับมาตรฐาน API 579 ชัดความสามารถของซอฟต์แวร์ในตอนนี้ คือทำการประเมิน ระดับ 1 และ 2 ได้ ซอฟต์แวร์สามารถประเมินโครงสร้างทรงกระบอกที่มีรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาวหรือแนวขวาง และโครงสร้างรับภาระ ความดันภายใน แรงแนวแกน โมเมนต์ดัด และโปรไฟล์ความเค้นตามแนวความหนาในรูปสมการพหุนามอันดับ 4 โครงสร้างของซอฟต์แวร์ออกแบบด้วยแนวคิดเชิงวัตถุ โดยมีคลาสหลัก 2 คลาส คือ คลาสโครงสร้าง และคลาสประเมินสภาพ คลาสโครงสร้างมีคลาสย่อย สำหรับเก็บข้อมูลสมบัติวัสดุ, รอยร้าว, ภาระใช้งาน และสำหรับคำนวณแรงขับเคลื่อนรอยร้าว, ภาระขีดจำกัด และประมาณค่าความต้านทานการแตกหัก คลาสประเมินสภาพมีคลาสย่อยการประเมินระดับ 1 สำหรับคำนวณความยาวรอยร้าวที่ยอมรับ และคลาสย่อยการประเมินระดับ 2 สำหรับคำนวณจุดประเมิน และเส้นโค้งความเสี่ยง

คำหลัก: การประเมินการคงสภาพ; API 579; โปรแกรมเชิงวัตถุ

Abstract

Structural integrity assessment of a cracked structure ensures the safety of continue servicing. A lot of details in an assessment procedure lead to a development of commercial software. However, the software has a high price and applicability limit in structural type and level of assessment. Development of software will save a long term expense and support future update. This article describes a software development for integrity assessment of a cracked cylinder based on API 579 standard. At present, the software has the capability to assess level 1 and 2. The software can assess a cylindrical structure having axially or circumferentially through-wall crack, and subjected to internal pressure, axial force, bending moment, and stress profile along thickness described by the 4th order polynomial function. The software structure is design the object-orientated paradigm and has 2 main classes namely “structure” and “assessment” classes. The “structure” class has subclasses for

collecting information on material properties, crack, applied load, and calculating a crack driving force, a limit load, and fracture toughness. The “assessment” class has a level 1 assessment subclass for determining an allowable crack length and level 2 assessment subclass for calculating an assess point and failure assessment curve.

Keywords: structural integrity, API 579, object-oriented programming.

1. บทนำ

รอยร้าวเป็นรูปแบบหนึ่งของความเสียหายซึ่งอาจทำให้โครงสร้างเสียหายจนระบบการผลิตต้องหยุด กระตันหันหรือเกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน เช่น กรณีท่อส่งก๊าซในรัฐฟลอริดาที่เสียหาย ในปี 2009 เกิดจากรอยร้าวเติบโตเนื่องจากสภาพแวดล้อมทำให้ผู้บาดเจ็บและมีมูลค่าความเสียหายมาก [1] นอกจากนี้ยังมีความเสียหายของภาชนะความดันเกิดขึ้นอีกหลายกรณี [2] การตรวจสอบและการประเมินสภาพโครงสร้าง (Fitness-For-Service, FFS) จึงเป็นกิจกรรมที่มีความสำคัญ

ในปัจจุบันมีมาตรฐานที่เสนอแนวปฏิบัติสำหรับประเมินการคงสภาพของโครงสร้างหลายมาตรฐาน เช่น API 579 [3], R6 [4], SINTAP [5] และ BS 7910 [6] มาตรฐาน API 579 มีความโดดเด่นกว่ามาตรฐานอื่นตรงที่รองรับกลไกความเสียหายจากการกร่อน, การเหลื่อมของแนวเชื่อม ฯลฯ

การประเมินตามขั้นตอนของ API 579 มีรายละเอียดมาก จึงทำให้เกิดซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์จำนวนมาก เช่น Signal [7], IWM VERB 8.0 [8] และ VINDIO 1.1 [9] แต่ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปก็มีข้อจำกัดด้านราคา ดังนั้น การพัฒนาโปรแกรมขึ้นเองจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

อย่างไรก็ดีซอฟต์แวร์เชิงวิจัยก็มีอยู่บ้าง เช่น โปรแกรมที่พัฒนาโดย Chandra [10], เนติพันธ์ [11] และ จตุพร [12]

ซอฟต์แวร์ของเนติพันธ์ประเมินสภาพของโครงสร้างโดยใช้มาตรฐาน R6 มีจุดเด่น คือ สามารถจัดการรอยร้าวได้มากกว่า 1 รอย และจัดการกับรอยร้าวแนวเฉียงเทียบกับแนวแกนของโครงสร้างทรงกระบอกได้ แต่มีจุดอ่อนที่ไม่สะดวกในการเพิ่มผลเฉลยของโครงสร้างใหม่

ซอฟต์แวร์ของจตุพรดำเนินการประเมินตามมาตรฐาน API 579 สามารถประเมินการคงสภาพของท่อที่มีรอยร้าวได้ 3 ระดับ, สามารถประเมินอายุการใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง และประเมินการรื้อก่อนแตกหักได้ แต่ไม่เอื้อต่อการปรับปรุงซอฟต์แวร์ให้สามารถรองรับการประเมินโครงสร้างชนิดอื่น

จากเหตุผลข้างต้น จึงเป็นที่มาสำคัญงานวิจัยพัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพของโครงสร้างทรงกระบอกที่มีรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาวหรือขวางแนว ซอฟต์แวร์ทำงานตามขั้นตอนการประเมินของมาตรฐาน API 579 และสามารถประเมินได้ถึงระดับ 2 การพัฒนาซอฟต์แวร์ใช้แนวคิดเชิงวัตถุทำให้ยืดหยุ่นกับการปรับปรุงในอนาคต เช่น การเพิ่มเติมโครงสร้างชนิดอื่น และประหยัดค่าใช้จ่าย

2. มาตรฐาน API 579

ในหัวข้อนี้จะอธิบายรูปแบบความเสียหายของโครงสร้างที่มีรอยร้าว และรายละเอียดของการประเมินซึ่งได้แก่ การจำแนกความเค้น หลักการประเมินของแต่ละระดับ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมิน

2.1 ความเสียหายของโครงสร้างที่มีรอยร้าว

โครงสร้างที่มีรอยร้าวมีโอกาสเกิดความเสียหาย 2 แบบ คือ 1) การแตกหัก (fracture) ซึ่งหมายถึงเหตุการณ์ที่รอยร้าวในโครงสร้างเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพจนทำให้โครงสร้างใช้งานต่อไปไม่ได้ และ 2) การครากทั้งหน้าตัด (collapse) ซึ่งหมายถึงเหตุการณ์ที่หน้าตัดที่เหลืออยู่บนระนาบรอยร้าวต้องรับความเค้นเท่ากับความเค้นคราก ดังนั้น การประเมินสภาพต้องพิจารณาความเสียหายทั้งสองแบบควบคู่กัน

2.2 การจำแนกประเภทของความเค้น

มาตรฐาน API 579 แบ่งความเค้นออกเป็น 2 ชนิด คือ ความเค้นปฐมภูมิ และความเค้นทุติยภูมิ เพราะความเค้นทั้งสองทำให้โครงสร้างเสียหายต่างกัน

ความเค้นปฐมภูมิ เกิดจากภาระภายนอก ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายแบบครากทั้งหน้าตัดและแตกหัก ส่วนความเค้นทุติยภูมิ คือ ความเค้นที่สมดุลในตัวเอง แรงลัพท์และโมเมนต์ลัพท์ภายในบนหน้าตัดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ความเค้นแบบนี้ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายแบบแตกหัก แต่ไม่ทำให้โครงสร้างเสียหายแบบครากทั้งหน้าตัด

มาตรฐานแบ่งการประเมินเป็น 3 ระดับ การประเมินระดับ 1 ใช้หลักการว่า ถ้าความยาวรอยร้าวที่ตรวจพบสั้นกว่าความยาวรอยร้าวที่ยอมรับ (allowable crack length) จะสรุปว่าโครงสร้างปลอดภัย อย่างไรก็ตาม ถ้าชนิดโครงสร้าง และชนิดภาระไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่มาตรฐานกำหนด หรือ ผลการประเมินระดับ 1 ระบุว่าโครงสร้างไม่ปลอดภัยแล้ว มาตรฐานแนะนำให้ประเมินระดับ 2 ต่อไป หากผลการประเมินระดับ 2 ระบุว่าโครงสร้างไม่ปลอดภัยก็ต้องประเมินในระดับ 3 หรือปรับสภาพการทำงานให้ลดลง แต่ถ้าผลการประเมินการคงสภาพผ่าน ก็สามารถใช้งานโครงสร้างต่อไปได้

การประเมินระดับ 2 ระบุสภาพของโครงสร้างที่มีรอยร้าวโดยใช้แผนภาพประเมินความเสียหาย (Failure Assessment Diagram, FAD) ดังรูปที่ 1 แกนตั้งของแผนภาพคือ K_r ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนระหว่าง ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor, K) กับความต้านทานการแตกหักที่สถานะความเครียดระนาบ (plane strain fracture toughness, K_{Ic}) และแกนนอน คือ L_r ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างขนาดภาระและภาระขีดจำกัด (limit load) หรือ อาจกล่าวได้ว่า L_r คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นอ้างอิง (reference stress) และความเค้นคราก

แผนภาพ FAD ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยเส้นโค้งความเสียหาย (Failure Assessment Curve, FAC) การ

ประเมินระดับ 2 ใช้ FAC ที่ไม่ขึ้นกับชนิดโครงสร้าง ชนิดรอยร้าวและชนิดวัสดุ ซึ่งเขียนอยู่ในสมการที่ (1) เมื่อ L_r น้อยกว่า $L_r^{\max}$ เมื่อ $L_r^{\max}$ คือ อัตราส่วนภาระสูงสุดที่โครงสร้างรับได้ก่อนจะเกิดความเสียหายจากการครากทั้งหน้าตัด

$$K_r = \left(1 - 0.14(L_r^P)^2\right) \left\{0.3 + 0.7 \exp[-0.65(L_r^P)^6]\right\} \quad (1)$$

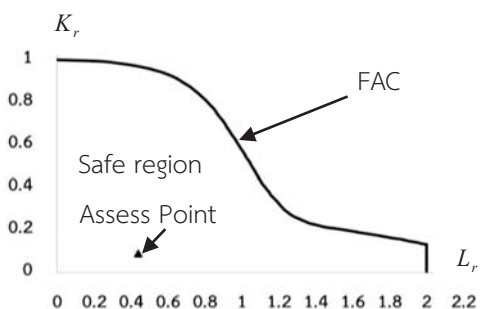
เมื่อ L_r^P คืออัตราส่วนภาระปฐมภูมิ

เป้าหมายของการประเมิน คือ การระบุตำแหน่งของจุดประเมิน (assess point) ซึ่งเป็นคู่อันดับ (L_r, K_r) โดย K_r คำนวณจากสมการ (2)

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{mat}} \quad (2)$$

เมื่อ K_I^P และ K_I^{SR} คือ ผลเฉลย K ที่คำนวณจากความเค้นปฐมภูมิและความเค้นทุติยภูมิตามลำดับ, Φ คือ ค่า plasticity interaction factor และ K_{mat} คือค่าความต้านทานการแตกหัก

หากจุดประเมินอยู่ใต้เส้น FAC จะถือว่าโครงสร้างใช้งานได้อย่างปลอดภัย แต่ถ้าจุดประเมินอยู่บนเส้นหรือเหนือเส้น FAC แล้วจะถือว่าโครงสร้างไม่ปลอดภัย



รูปที่ 1 แผนภาพประเมินความเสียหาย

2.3 วิธีคำนวณพารามิเตอร์ที่แนะนำจากมาตรฐาน

2.3.1 พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว

มาตรฐานกล่าวถึงวิธีหาผลเฉลย K ไว้ 4 รูปแบบ คือ 1) ผลเฉลยในรูปของภาระระบุ (nominal Load) เช่น ความดัน, แรงดึงแนวแกน, โมเมนต์ดัด ฯลฯ 2) ผลเฉลยในรูป influence coefficient 3) ผลเฉลยในรูป membrane stress และ bending stress และ 4) ผลเฉลยที่หาด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก

2.3.2 ความต้านทานการแตกหัก

K_{Ic} เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ค่า K_{Ic} แทนความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเติบโตของรอยร้าวจากที่มีอยู่ การระบุค่า K_{Ic} ทำได้หลายวิธี เช่น ระบุค่า K_{Ic} จากการทดสอบโดยตรง, ประมาณค่าจากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง K_{Ic} กับ ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) และประมาณค่า K_{Ic} จากเส้นโค้งขอบล่างของความต้านทานการแตกหัก ซึ่งเป็นวิธีประมาณค่าที่งานวิจัยนี้ใช้ แสดงด้วยสมการ (3)

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

เมื่อ T และ T_{ref} คือ อุณหภูมิใช้งาน และอุณหภูมิอ้างอิงตามลำดับ

2.3.3 ความเค้นอ้างอิง

ความเค้นอ้างอิงที่ปลายรอยร้าว (σ_{ref}^P) เกิดจากการพิจารณาความเค้นปฐมภูมิ เป็นค่าที่บอกระดับความสามารถที่จะครากทั้งหน้าตัดของรอยร้าว มีนิยามตามสมการ (4)

$$\sigma_{ref}^P = \left(\frac{P_l}{P_{ly}} \right) \sigma_{ys} \quad (4)$$

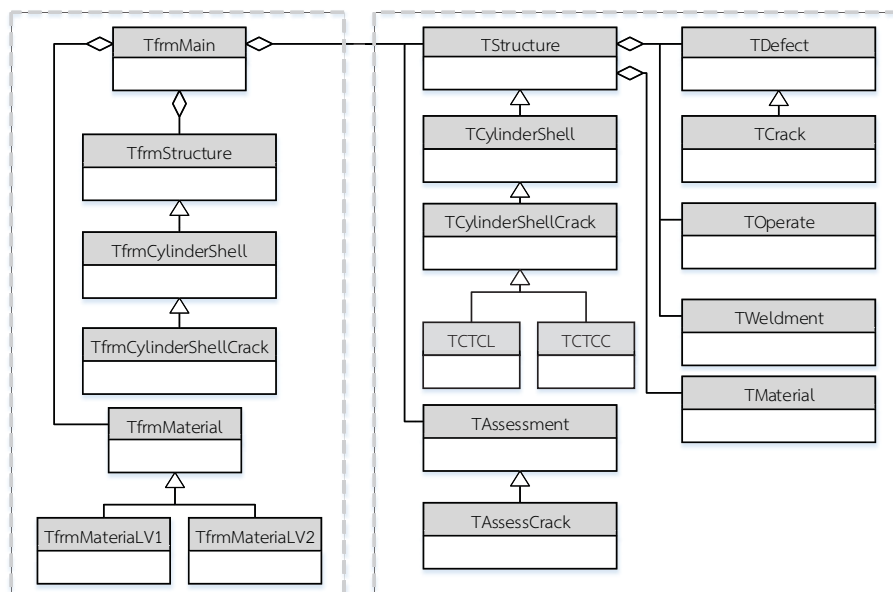
เมื่อ σ_{ys} คือ ความแข็งแรงคราก, P_l คือ ขนาดภาระ และ P_{ly} คือ ภาระขีดจำกัด ตามลำดับ

3. การพัฒนาซอฟต์แวร์

งานวิจัยนี้ใช้แนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object Oriented Programing, OOP) แนวคิดนี้มองการแก้ปัญหาเป็นการสื่อสารกันระหว่างวัตถุ (object) ซึ่งเกิดจากคลาส (class) [13] โครงสร้างของซอฟต์แวร์แสดงในแผนภาพคลาส (class diagram) งานวิจัยแบ่งการพัฒนาซอฟต์แวร์ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนปฏิบัติการ (กรอบด้านขวาของรูปที่ 2) และส่วนอินเตอร์เฟส (กรอบด้านซ้ายของรูปที่ 2)

ส่วนปฏิบัติการแบ่งเป็น 2 คลาสหลัก คือ 1) คลาสประเมินสภาพ (TAssessment) และ 2) คลาสโครงสร้าง (TStructure) โดยคลาส TStructure มีคลาสย่อย คือ คลาส TMaterial เก็บข้อมูลวัสดุ, คลาส TOperate เก็บภาระใช้งาน, คลาส TCrack ซึ่งสืบทอดมาจากคลาส TDefect มีหน้าที่เก็บข้อมูลรอยร้าว และ วิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าว (crack interaction) กรณีที่รอยร้าวมี 2 รอย, คลาส TWeldment เก็บข้อมูลเกี่ยวกับรอยเชื่อม, คำนวณค่าความเค้นตกค้างที่ส่งผลต่อรอยร้าว

ในงานวิจัยนี้พิจารณาความเค้นตกค้างที่ผิวเป็นการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด โดยใช้ค่าความเค้นตกค้างสูงสุดที่รอยร้าวได้รับในการประเมิน ผลที่ได้จาก



รูปที่ 2 คลาสไดอะแกรม

รูปที่ 3 หน้าต่างกลุ่มข้อมูลวัสดุ จากคลาส TfrmMaterialLV2

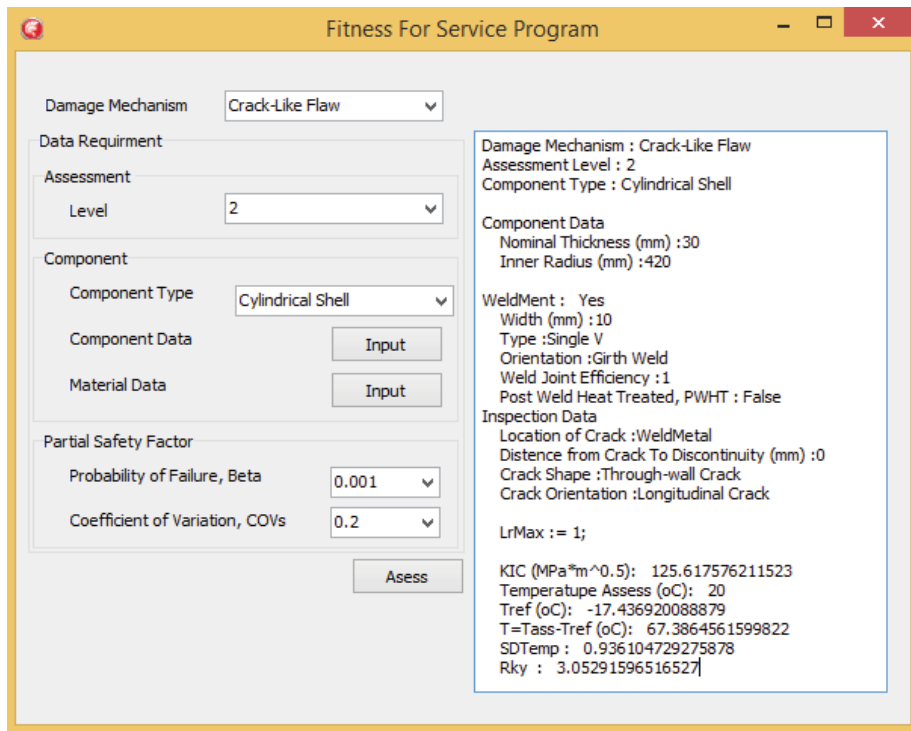
รูปที่ 4 หน้าต่างกลุ่มข้อมูลโครงสร้าง, ภาระข้อมูลรอยร้าว จากคลาส TfrmCylinderShellCrack

การพิจารณาความเค้นตกค้างจึงให้ผลการประเมินมีแนวโน้มไปทางปลอดภัย

ส่วนอินเตอร์เฟซมีหน้าที่รับค่าจากผู้ใช้ และแสดงผลการประเมิน งานวิจัยนี้แบ่งข้อมูลเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) วัสดุ, 2) โครงสร้าง, ภาระ และรอยร้าว และ 3) รายละเอียดการประเมิน

ข้อมูลของวัสดุที่ต้องกรอกขึ้นกับระดับการประเมิน รูปที่ 3 แสดงหน้าต่างของคลาส TfrmMaterialLevel2, ข้อมูลโครงสร้าง, ภาระ และรอยร้าวถูกระบุในหน้าต่างของคลาส TfrmCylinderShellCrack ดังรูปที่ 4

เมื่อผู้ประเมินกดปุ่ม Assess ในหน้าต่างหลัก รูปที่ 5 คลาส TfrmMain จะประสานการทำงานระหว่างส่วนปฏิบัติการ และส่วนอินเตอร์เฟซ โดยนำข้อมูลที่กรอกใน



รูปที่ 5 หน้าต่างหลัก

ส่วนอินเตอร์เฟซส่งไปเก็บที่คลาส TStructure คลาส TAssessCrack ซึ่งสืบทอดจากคลาส TAssessment จะดำเนินการเรียกค่าพารามิเตอร์จากคลาส TStructure มาประเมินการคงสภาพตามระดับที่ผู้ใช้ระบุ หลังจากนั้นจึงแสดงผลการประเมินและแสดงข้อมูลทั้งหมดทางกล่องข้อความด้านขวาของหน้าต่างหลักในรูปที่ 5

4. ขีดความสามารถของซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์ที่พัฒนามีขีดความสามารถดังนี้

- สามารถประเมินการคงสภาพของโครงสร้างทรงกระบอกที่มีรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาวหรือขวางแนวขวาง ระดับ 1 และระดับ 2 เท่านั้น
- โครงสร้างรับภาระต่อไปนี้ ความดันภายใน แรงแนวแกน โมเมนต์ดัด และโปรไฟล์ความเค้นตามแนวความหนาในรูปสมการพหุนามอันดับ 4
- ค่าความต้านทานการแตกหักประมาณจากเส้นโค้งขอบล่างของความต้านทานการแตกหัก

5. การตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์

การตรวจสอบใช้วิธีเปรียบเทียบจุดประเมินจากซอฟต์แวร์กับผลการคำนวณด้วยมือ ตรวจสอบโดยใช้ปัญหาที่ดังนี้

5.1 ปัญหาที่ 1

ประเมินการคงสภาพระดับ 1 ของโครงสร้างทรงกระบอกที่มีรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาว ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2438.4 มิลลิเมตร และหนา 31.75 มิลลิเมตร รับความดัน 0.965 MPa ที่อุณหภูมิทำงาน 37.778 องศาเซลเซียส ทำด้วยวัสดุ SA-516 Grade 70, Carbon steel, P1, Group 1 มีความเค้นคราก 275.8 MPa, ความต้านแรงดึงสูงสุด 482.633 MPa, โมดูลัสของความยืดหยุ่น 210 GPa ความดันออกแบบ 2.0684 MPa ที่อุณหภูมิ 343.33 องศาเซลเซียส ตรวจสอบรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาว ยาว 27.94 มิลลิเมตร และรอยร้าวอยู่ในบริเวณรอยเชื่อม

ซอฟต์แวร์คำนวณความยาวรอยร้าวสูงสุดที่โครงสร้างยอมรับได้ เท่ากับ 42 มิลลิเมตร ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ ซึ่งเท่ากับ 42.89 มิลลิเมตร สรุปได้ว่าโครงสร้างสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยคล้อยจองกับผลการคำนวณด้วยมือ

5.2 ปัญหาที่ 2

ประเมินการคงสภาพระดับ 1 ของโครงสร้างทรงกระบอกมีรายละเอียดวัสดุ และโครงสร้างเช่นเดียวกับปัญหาที่ 1 รอยเชื่อมวางตัวตามแนวยาว ชนิด Double-v ไม่ผ่านการทำ Post Weld Heat Treated รอยเชื่อมกว้าง 10 มิลลิเมตร ตรวจพบรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวขวาง นอกบริเวณรอยเชื่อม

ซอฟต์แวร์คำนวณความยาวรอยร้าวสูงสุดที่โครงสร้างยอมรับได้ เท่ากับ 14 มิลลิเมตร ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยมือ ซึ่งเท่ากับ 13.09 มิลลิเมตร สรุปได้ว่าโครงสร้างไม่ปลอดภัยหากจะใช้งานต่อคล้อยจองกับผลการคำนวณด้วยมือ

5.3 ปัญหาที่ 3

ประเมินการคงสภาพระดับ 2 ของโครงสร้างทรงกระบอกที่มีรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาว มีรัศมีภายใน 420 มิลลิเมตร และหนา 20 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุ Carbon Steel ความเค้นคราก 275.8 MPa, ความต้านแรงดึงสูงสุด 482 MPa Exemption Curve A, ความดันออกแบบ 2.0684 MPa ที่อุณหภูมิ 343.33 องศาเซลเซียส รับความดัน 0.965 MPa ที่อุณหภูมิทำงาน 4 องศาเซลเซียส โครงสร้างทรงกระบอกมี รอยเชื่อมวางตัวตามแนวยาว (seam weld) ชนิด Double-v ผ่านการทำ Post Weld Heat Treated แล้ว รอยเชื่อมกว้าง 10 มิลลิเมตร ตรวจพบรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาว ยาว 60 มิลลิเมตร ทำการประเมินระดับ 2 Pf 0.001 COV 0.2 ผลลัพธ์ที่ได้คือ L_r เท่ากับ 0.16, K_r ที่ผิวด้านในของโครงสร้าง คือ 0.774 และ K_r ที่ผิวด้านนอกของโครงสร้าง คือ 0.582 สรุปผลการ

ประเมินได้ว่าโครงสร้างปลอดภัย คล้อยจองกับผลการคำนวณด้วยมือ

6. สรุป

งานวิจัยพัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพของโครงสร้างทรงกระบอกที่มีรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาวและขวางแนวขวาง ประเมินตามขั้นตอนของมาตรฐาน API 579 ซอฟต์แวร์ใช้แนวคิดเชิงวัตถุในการออกแบบทำให้ยืดหยุ่นกับการปรับปรุงในอนาคต หลังจากทำการสอบทวนการคำนวณของซอฟต์แวร์พบว่าใช้งานได้ถูกต้อง

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กลสิวิทย์อำนวยการ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านสละเวลา ให้ความรู้ คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยสนับสนุนทุนวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Board, N.T.S., Rupture of Florida Gas Transmission Pipeline and Release of Natural Gas, *Pipeline Accident Brief*, A. No.DCA09FP007, Editor. 2009.
- [2] James I. Chang, C.-C.L., *A study of storage tank accidents*. Elsevier, 2006. 19(Journal of Loss Prevention in the Process Industries): pp. 51-59.
- [3] American Petroleum Institute and The American Society of Mechanical Engineers, (2007). *Fitness- For-Service: API Recommended*

Practice 579. 2nd. Ed., Natlpetrochemical Publication, Washington.

[4] Andrew Cosham, P.H., *THE PIPELINE DEFECT ASSESSMENT MANUAL*. 2002.

[5] International, M., *SINTAP SOFTWARE MANUAL*.

[6] F. Gutierrez-Solana, S.C., *FITNET FFS procedure: A unified European procedure for structural integrity assessment*. Elsevier, 2009. 16(Engineering Failure Analysis): pp. 559-577.

[7] GROUP, Q.I., *Fitness-for-Service Software and Fracture Mechanics- Signal™*.

[8] Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, *Fracture Assessment Software IWM VERB 8.0*.

[9] ingenieros, I., *VINDIO 1.1*.

[10] A. Rama Chandra Murthy, G.S.P., Nagesh R. Iyer, *Object-oriented programming paradigm for damage tolerant evaluation of engineering structural components*. Elsevier, 2011. 42(Advances in Engineering Software): pp. 12-24.

[11] เนติพันธ์ พุทธิรักษ์, การออกแบบโปรแกรมเชิงวัตถุสำหรับการประเมินการคงสภาพท่อที่มีรอยร้าว ด้วยระเบียบวิธี $R6$, in *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล*. 2551, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[12] จตุพร แก้วอ่อน, ซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพและอายุใช้งานที่เหลือของท่อที่มีรอยร้าวด้วย *API RP 579*, in *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล*. 2555, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[13] Zarko Gajic, *Object Orientation with Delphi*. 2006.