



ระเบียบวิธีประมาณค่าภายในสำหรับการคำนวณตัวประกอบความเข้ม ของความเค้นตามมาตรฐาน API-579-1/ASME FFS-1 สำหรับ ท่อมีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านในและรับความดันภายใน

Interpolation Method for the Calculation of API-579-1/ASME FFS-1 Stress Intensity Factor for a Longitudinal Internal Surface Crack in Pipeline under Internal Pressure

ภัทรชนิดา สีนวล^{1,*}, จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย², นิติกอร์ นรภัยพิพากษา¹ และ ชาวสวน กาญจนมัย¹
Patchanida Seenuan^{1,*}, Jirapong Kasivitamnuy², Nitikorn Noraphaiphaksa¹ and
Chaosuan Kanchanomai¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 12120

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 10330

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, 12120, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 10330, Thailand

*E-mail: ingpatchanida@gmail.com, Tel.: 063-6285254

บทคัดย่อ

ท่อสำหรับขนส่งของไหลถูกใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเลียม เคมี และอาหาร รอยร้าวอาจเกิดได้หลังใช้งานเป็นเวลานาน จากทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก รอยร้าวสามารถทำให้เกิดการแตกหักได้หากตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าว (K) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าวิกฤตของตัวประกอบความเข้มของความเค้นของวัสดุ (K_c) การคำนวณ K ของท่อมีรอยร้าวด้วยมาตรฐาน API-579-1/ASME FFS-1 ถูกใช้งานแพร่หลายในปัจจุบัน ความแม่นยำของ K ขึ้นอยู่กับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล (G_0, G_1, G_2, G_3, G_4) ในผลเฉลย K งานวิจัยนี้เลือกปัญหาท่อมีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านในและรับความดันภายใน จำนวน 38 กรณีศึกษา เพื่อประเมินความแม่นยำของวิธีประมาณค่าภายในช่วงสำหรับการคำนวณ K ระเบียบวิธีที่พิจารณาครอบคลุมทั้งวิธีประมาณค่าภายในช่วงแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น K ที่คำนวณตามมาตรฐานและระเบียบวิธีประมาณค่าในช่วงเหล่านี้ถูกประเมินความแม่นยำด้วยการเปรียบเทียบกับ K ที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า การประมาณค่าภายในช่วงแบบเชิงเส้นให้ค่า K ต่างจากค่าที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาก โดยมีความแตกต่างสูงสุดเป็น 25% สำหรับท่อบางมาก และเป็น 16% สำหรับท่อบาง ในขณะที่การประมาณค่าภายในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามจากข้อมูล 5 จุด สามารถคำนวณ K ได้ใกล้เคียงกับผลจากระเบียบวิธี

ไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า โดยมีความแตกต่างสูงสุดเป็น 7.32% ดังนั้นวิธีประมาณค่าภายในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามซึ่งใช้จุดข้อมูล 5 จุด คือวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณค่าภายในช่วงสำหรับการคำนวณ K

คำสำคัญ: ท่อ; รอยร้าว; ตัวประกอบความเข้มของความเค้น; มาตรฐาน API-579-1/ASME FFS-1; การประมาณค่าภายในช่วง

ABSTRACT

Pipelines are responsible for transporting liquid in various industries, e.g., petroleum, chemical and food industries. After a long period of service, the cracks are possible. Based on the linear-elastic fracture mechanics, the complete fracture of crack can occur if the stress intensity factor (K) at crack tip is equal or greater than the critical stress intensity factor (K_c) of material. At present, the calculation of K proposed by the fitness-for-service assessment standard (API-579-1/ASME FFS-1) is widely applied for the cracked pipelines. However, the precision of K depends on the interpolation method of influence coefficients (G_0, G_1, G_2, G_3, G_4) within the K solution. Therefore, 38 case studies of the longitudinal internal surface crack in a pipeline under internal pressure were selected to analyze the effect of interpolation method on the precision of K . The methodology covered both linear and nonlinear interpolations. The precisions of K from various interpolation methods were determined by comparing the results with K calculated by finite element analysis. It was found that the K s from the linear interpolation were significantly different from those from the finite element analysis, i.e., the maximum difference of 25% for very small thickness pipe, and the maximum difference of 16% for small thickness pipe. While, the differences between the K s from the cubic spline interpolation using 5 data of t/R_i and the finite element analysis were lower, i.e., the maximum difference of 7.32%. Therefore, the cubic spline interpolation using 5 data of t/R_i was the most appropriate interpolation method for the K calculation.

Keywords: pipeline; crack; stress intensity factor; API-579-1/ASME FFS-1 standard; interpolation.

1. บทนำ

ท่อ (pipe) และท่อส่ง (pipeline) คือ โครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมสำหรับการลำเลียงของไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งพบในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โรงงานปิโตรเคมี โรงงานผลิตไฟฟ้า การเชื่อมสภาพและความเสียหายของท่อและท่อส่งระหว่างใช้งานเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ดำเนินในวัตถุดิบ ความบกพร่องในกระบวนการผลิต การเชื่อมสภาพเนื่องจากผลของสภาพแวดล้อม [1], [2] กรณีศึกษาเกี่ยวกับความเสียหายของท่อ [3]-[5] แสดงว่าการแตกหักจากรอยร้าวภายในท่อเป็นสาเหตุหนึ่งของความเสียหาย รอยร้าวที่พบมีการวางตัวทั้งตามแนวยาว ตามแนวเส้นรอบวง หรือทำมุมเอียงกับแนวท่อ

การวิเคราะห์การแตกหักของท่อมีรอยร้าวสามารถใช้กลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติกเชิงเส้น (linear-elastic fracture mechanics, LEFM) การแตกหักเกิดขึ้นเมื่อตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor, K) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์แสดงความรุนแรงของรอยร้าว มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความทนทานการแตกหัก (fracture toughness, K_c) รูปแบบการพื้นฐานของการแตกหักมี 3 รูปแบบ คือ รูปแบบการแบบที่ 1 (mode I) หรือรูปแบบการเปิด (opening mode) รูปแบบการแบบที่ 2 (Mode II) หรือรูปแบบการเฉือน (sliding mode) และรูปแบบการแบบที่ 3 (mode III) หรือรูปแบบการฉีก (tearing mode) สำหรับท่อที่มีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านใน

และรับความดันภายใน ซึ่งเป็นกรณีที่พบบ่อย การแตกหักเกิดในรูปแบบการเปิด [2]

มาตรฐาน API-579-1/ASME FFS-1 [6] ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า มาตรฐาน API-579 เสนอการคำนวณ K ของท่อมีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านในและรับความดันภายใน ในรูปของสัมประสิทธิ์อิทธิพล (influence coefficients) 5 ตัว คือ G_0, G_1, G_2, G_3, G_4 และตัวแปรไร้มิติ คือ อัตราส่วนความหนาต่อรัศมีภายใน (t/R_i) และอัตราส่วนความลึกรอยร้าวต่อความหนา (a/t) โดยสัมประสิทธิ์อิทธิพลสำหรับปัญหานี้แสดงในภาคผนวก การคำนวณ K ด้วยสมการในมาตรฐาน API-579 สามารถทำได้ง่ายไม่ต้องใช้ทักษะการคำนวณขั้นสูง

การคำนวณ K สำหรับท่อมีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านในและรับความดันภายใน ยังสามารถคำนวณได้ด้วยเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลข เช่น ไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) และบาวนด์รีเอลิเมนต์ (boundary element) Nabavi และคณะ [1] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาผลของจำนวนรอยร้าวต่อ K ของท่อที่มีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านในและรับความดันภายใน และได้ผลลัพธ์สอดคล้องกับผลลัพธ์ของ Shu และคณะ [7] ในขณะที่ Gonzalez และคณะ [2] ใช้วิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ คำนวณ K ของท่อที่มีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านในและรับความดันภายใน ในช่วง $0.04 \leq t/R_i \leq 0.1$ และ $0.05 \leq a/t \leq 0.6$ ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับ K ที่คำนวณตามมาตรฐาน API-579 แม้ว่าการคำนวณ K ด้วยวิธีเชิงตัวเลขเหล่านี้จะให้ผลลัพธ์แม่นยำและครอบคลุมปัญหาที่หลากหลาย แต่แนวทางนี้ต้องการซอฟต์แวร์และทักษะการคำนวณสูง ดังนั้น การคำนวณ K ด้วยสมการในมาตรฐาน API-579 จึงเหมาะสมในทางปฏิบัติ

ในกรณีท่อที่มีรอยร้าวมีอัตราส่วน t/R_i หรือ a/t ไม่ตรงกับค่าในตารางของมาตรฐาน API-579 (ตาราง ก.1 ในภาคผนวก) การหาค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล $G_0, G_1, \dots, G_4$ จำเป็นต้องใช้การประมาณค่าภายในช่วง (interpolation) อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน API-579 ไม่ได้ระบุวิธีประมาณค่าภายในช่วง วิธีที่นิยมใช้จึงเป็นวิธีประมาณค่าภายในช่วงแบบ

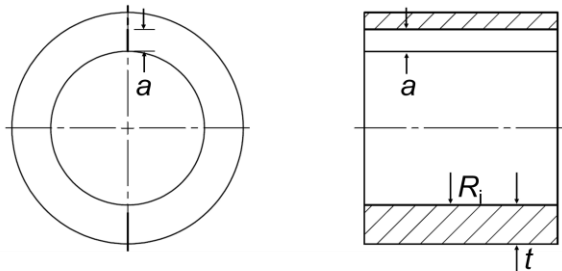
เชิงเส้น (linear interpolation) เพราะการคำนวณไม่ซับซ้อน Rahman และคณะ [8] ศึกษาวิธีประมาณค่าภายในช่วงของสัมประสิทธิ์อิทธิพล G_0 พบว่า เส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณความสัมพันธ์ระหว่าง G_0 กับ t/R_i และ a/t เป็นสมการพหุนามอันดับสาม (cubic polynomial) โดยค่า G_0 ได้แตกต่างจากการประมาณด้วยวิธีประมาณค่าภายในช่วงแบบเชิงเส้น สำหรับกรณี $t/R_i = 0.14$ และ $a/t = 0.7$ สองวิธีนี้ให้ผลลัพธ์แตกต่างกัน 3.4% ซึ่งระเบียบวิธีสำหรับประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเป็นค่าคงที่ที่สำคัญต่อการคำนวณ K อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Rahman และคณะ [8] ได้ศึกษาเพียงกรณีศึกษาเดียว และสนใจเพียงการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล G_0 โดยยังไม่ได้ระบุชัดว่าวิธีประมาณค่าภายในช่วงมีผลต่อค่า K เพียงใด ภัทร์ชนิตา และคณะ [9] ได้เพิ่มจำนวนกรณีศึกษาเป็น 4 กรณี และได้ศึกษาผลของวิธีประมาณค่าภายในช่วงแบบอื่น ได้แก่ แบบเชิงเส้น แบบพหุนาม และแบบเส้นโค้งกำลังสาม (cubic spline) ต่อการคำนวณ K งานวิจัยพบว่าวิธีประมาณค่าภายในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามให้ผลลัพธ์แม่นยำที่สุดเมื่อเทียบกับ K จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อย่างไรก็ตาม กรณีศึกษาครอบคลุมเพียงกรณี $t/R_i = 0.5$ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ได้ระบุในมาตรฐาน ดังนั้น เพื่อให้ข้อเสนอเกี่ยวกับระเบียบวิธีประมาณค่าภายในที่ที่เหมาะสม มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น จึงควรเพิ่มกรณีศึกษาให้ครอบคลุมค่าของ t/R_i และ a/t กว้างขึ้น

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีประมาณค่าภายในช่วงของสัมประสิทธิ์อิทธิพลต่อการคำนวณ K ระเบียบวิธีประมาณค่าภายในช่วงที่พิจารณาประกอบด้วย แบบเชิงเส้น แบบพหุนาม และแบบเส้นโค้งกำลังสาม โดยเลือกท่อมีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านในและรับความดันภายในเป็นกรณีศึกษา การประเมินความแม่นยำของ K ที่คำนวณโดยใช้สัมประสิทธิ์อิทธิพลใช้วิธีเปรียบเทียบกับ K ที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จุดมุ่งหมายของงานวิจัย คือ เสนอแนะวิธีที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าภายในช่วงของสัมประสิทธิ์อิทธิพลเพื่อให้การคำนวณ K ด้วยสมการของมาตรฐาน API-579 แม่นยำขึ้น

2. วิธีดำเนินงาน

2.1 ท่อและรอยร้าว

รูปที่ 1 แสดงท่อที่มีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านใน จากรูป R_i , t และ a คือ รัศมีภายใน ความหนา และความลึก รอยร้าวตามลำดับ กรณีศึกษาแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังตารางที่ 1

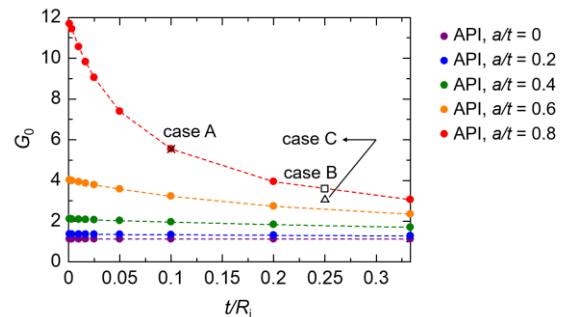


รูปที่ 1 ท่อที่มีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านใน

กลุ่ม A มี 8 กรณี แต่ละกรณีมี t/R_i และ a/t ตรงกับค่าในตารางของมาตรฐาน API-579 จึงไม่ต้องการประมาณค่าภายในช่วงของสัมประสิทธิ์อิทธิพล กรณีศึกษาในกลุ่มนี้ใช้สำหรับตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยไฟไนต์เอลิเมนต์ กลุ่ม B มี 15 กรณี แต่ละกรณีมี t/R_i ไม่ตรงกับค่าในตารางของมาตรฐาน API-579 จึงต้องการประมาณค่าภายในช่วงของ t/R_i สุดท้าย กลุ่ม C มี 15 กรณี แต่ละกรณีมี t/R_i และ a/t ไม่ตรงกับค่าในตารางของมาตรฐาน API-579 ในกลุ่มนี้จึงต้องการประมาณค่าภายในช่วงทั้ง t/R_i และ a/t โดยการศึกษาในกลุ่มนี้สามารถที่จะใช้ทำความเข้าใจผลกระทบของ t/R_i และ a/t ในเวลาเดียวกัน ที่มีต่อการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลและ K ตัวอย่างกรณีศึกษาในกลุ่ม A, B และ C สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2

ในแต่ละกรณีศึกษา K ถูกคำนวณด้วยสมการของมาตรฐาน API-579 และด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่า K จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือ K_{FEA} จะถูกใช้เป็นบรรทัดฐานสำหรับการประเมินความแม่นยำของ K จากมาตรฐาน API-579 กรณีศึกษาในกลุ่ม B จะใช้วิธีประมาณค่าภายในช่วง 3 วิธี คือ เชิงเส้น โพลีโนเมียล และเส้นโค้งกำลังสาม อย่างไรก็ตาม กรณีศึกษาในกลุ่ม C จะศึกษาเพียงวิธีประมาณค่าภายใน

ในช่วงแบบเชิงเส้น เนื่องจากเป็นวิธีที่มีการใช้งานมากที่สุด และวิธีที่ดีที่สุดจากผลการศึกษาในกลุ่ม B



รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล G_0 ที่ t/R_i และ a/t ต่าง ๆ และตัวอย่างของกรณีศึกษาในกลุ่ม A, B และ C

2.2 การคำนวณ K ด้วยมาตรฐาน API-579

การคำนวณ K ของปัญหานี้ด้วยสมการของมาตรฐาน API-579 กรณีรูปแบบการเปิด หรือ K_I สำหรับท่อที่มีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านใน และรับความดันภายใน คือ

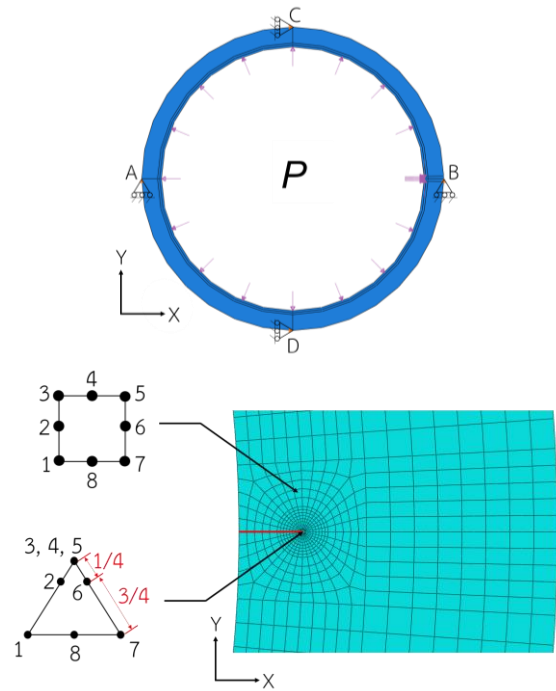
$$K_I = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[\frac{2G_0 - 2G_1\left(\frac{a}{R_i}\right) + 3G_2\left(\frac{a}{R_i}\right)^2}{-4G_3\left(\frac{a}{R_i}\right)^3 + 5G_4\left(\frac{a}{R_i}\right)^4} \right] \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

โดย p คือความดันภายใน ซึ่ง K_I แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปร p ในขณะที่ K_I แสดงความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับตัวแปร a , R_i , t สมการนี้ใช้คำนวณ K ทั้งกรณีที่ t/R_i และ a/t ตรงกับค่าที่ระบุในมาตรฐาน API-579 (กรณี A) และกรณีที่ต่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลด้วยการประมาณค่าภายในช่วงทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (กรณี B และ C)

2.3 การคำนวณ K ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณ K ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้โปรแกรม Abaqus/Standard [10] แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อที่มีรอยร้าว ใช้แบบวงแหวน 2 มิติ ในสถานะความเครียดระนาบ (plane strain) ดังรูปที่ 3 บริเวณที่อยู่ห่างจากปลายรอยร้าวใช้เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ (8-node quadratic quadrilateral, reduced integration, CPE8R) ส่วนบริเวณที่ประชิดกับปลายรอยร้าวใช้เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ ซึ่งเกิดจากการยวบจุดต่อที่ปลาย

รอยร้าวของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ สมบัติทางกลของวัสดุที่กำหนดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (E) เท่ากับ 210 GPa ความเค้นคราก (σ_y) เท่ากับ 435 MPa และอัตราส่วนปัวซอง (ν) เท่ากับ 0.3 ผนังด้านในของท่อและพื้นผิวของรอยร้าวรับความดันคงที่ ขนาดของความดันที่ใช้ปรับให้เหมาะสมกับความหนาของผนังท่อ เพื่อให้ขนาดบริเวณพลาสติกที่ปลายรอยร้าวใหญ่เกินขอบเขตของกลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติกเชิงเส้น การคำนวณเพิ่มความดันจากศูนย์ถึงความดันสูงสุดโดยแบ่งเป็น 20 ระดับ เงื่อนไขขอบเขตกำหนดให้ท่อเคลื่อนตัวได้บนระนาบ $x-y$ โดยจุด A และ B เคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวแกน x และจุด C และ D เคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวแกน y ขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ถูกปรับจนกระทั่ง K ไม่ขึ้นกับขนาดของเอลิเมนต์



รูปที่ 3 เอลิเมนต์และเงื่อนไขขอบเขตของตัวแบบ
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

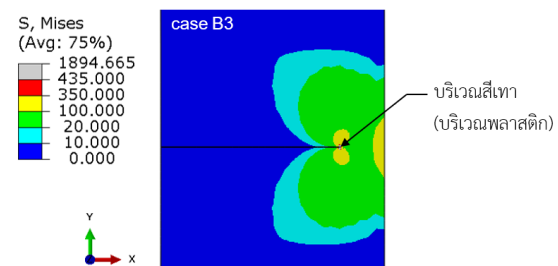
ตารางที่ 1 ขนาดของท่อและรอยร้าวของกรณีศึกษา

กลุ่ม	กรณี	ขนาดท่อและรอยร้าว (มม.)			ตัวแปรไร้มิติ	
		R_i	t	a	t/R_i	a/t
A	A1	100.00	0.100	0.0800	0.00100	0.8
	A2	100.00	0.333	0.2664	0.00333	0.8
	A3	100.00	1.000	0.8000	0.01000	0.8
	A4	100.00	2.500	2.0000	0.02500	0.8
	A5	100.00	10.000	8.0000	0.10000	0.8
	A6	100.00	33.333	26.6664	0.33333	0.8
	A7	100.00	100.000	80.0000	1.00000	0.8
	A8	100.00	300.000	240.0000	3.00000	0.8
B	B1	12500.00	25.000	5.0000	0.0020	0.2
	B2	6250.00	12.500	5.0000	0.0020	0.4
	B3	3125.00	6.250	5.0000	0.0020	0.8
	B4	1250.00	25.000	5.0000	0.0200	0.2
	B5	625.00	12.500	5.0000	0.0200	0.4
	B6	312.50	6.250	5.0000	0.0200	0.8
	B7	625.00	25.000	5.0000	0.0400	0.2
	B8	312.50	12.500	5.0000	0.0400	0.4
	B9	156.25	6.250	5.0000	0.0400	0.8
	B10	166.67	25.000	5.0000	0.1500	0.2
	B11	83.33	12.500	5.0000	0.1500	0.4
	B12	41.67	6.250	5.0000	0.1500	0.8

ตารางที่ 1 (ต่อ) ขนาดของท่อและรอยร้าวของกรณีศึกษา

กลุ่ม	กรณี	ขนาดท่อและรอยร้าว (มม.)			ตัวแปรไร้มิติ	
		R_i	t	a	t/R_i	a/t
B	B13	100.00	25.000	5.0000	0.2500	0.2
	B14	50.00	12.500	5.0000	0.2500	0.4
	B15	25.00	6.250	5.0000	0.2500	0.8
C	C1	450.00	0.900	0.0900	0.0020	0.1
	C2	450.00	0.900	0.4500	0.0020	0.5
	C3	450.00	0.900	0.6300	0.0020	0.7
	C4	450.00	9.000	0.9000	0.0200	0.1
	C5	450.00	9.000	4.5000	0.0200	0.5
	C6	450.00	9.000	6.3000	0.0200	0.7
	C7	450.00	18.000	1.8000	0.0400	0.1
	C8	450.00	18.000	9.0000	0.0400	0.5
	C9	450.00	18.000	12.6000	0.0400	0.7
	C10	450.00	67.500	6.7500	0.1500	0.1
	C11	450.00	67.500	33.7500	0.1500	0.5
	C12	450.00	67.500	47.2500	0.1500	0.7
	C13	450.00	112.500	11.2500	0.2500	0.1
	C14	450.00	112.500	56.2500	0.2500	0.5
	C15	450.00	112.500	78.7500	0.2500	0.7

รูปที่ 4 แสดงการกระจายความเค้น von Mises ของท่อบางมากและรอยร้าวลึก ($t/R_i = 0.002$ และ $a/t = 0.8$ หรือกรณี B3) เมื่อรับความดัน 0.01 MPa พบว่า บริเวณพลาสติกที่ปลายรอยร้าว (บริเวณสีเทาในรูปที่ 4) มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความลึกรอยร้าวและความหนาของท่อ ซึ่งสอดคล้องกับ เงื่อนไขของกลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติกเชิงเส้น การกำหนดความดันสำหรับท่อความหนาอื่น ๆ ก็ใช้หลักพิจารณาแบบเดียวกันนี้ โดยความดันที่เหมาะสมคือ 0.01 MPa สำหรับท่อบางมาก ($t/R_i \leq 0.00333$), 0.1 MPa สำหรับท่อปานกลาง ($0.01 \leq t/R_i \leq 0.05$) และ 1 MPa สำหรับท่อหนา ($0.1 \leq t/R_i \leq 0.33333$) และท่อหนา (มาก) ($1 \leq t/R_i \leq 3$) โดยกรณี B3 เป็นกรณีที่รุนแรงที่สุดในกรณีทั้งหมดของมาตรฐาน API-579 ดังนั้นกรณีที่เหลือจึงมีบริเวณพลาสติกที่ปลายรอยร้าวสอดคล้องกับเงื่อนไขของกลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติกเชิงเส้นทั้งหมด



รูปที่ 4 การกระจายความเค้น von Mises บริเวณรอยร้าวของท่อบางมากและรอยร้าวลึก ($t/R_i = 0.002$ และ $a/t = 0.8$)

2.4 การประมาณค่าภายในช่วง

ก) การประมาณค่าในช่วงเส้นตรง

ในกรณี x อยู่ระหว่าง x_0 และ x_1 โดยทราบค่าฟังก์ชัน $f(x_0)$ และ $f(x_1)$ แล้ว สมการสำหรับการประมาณภายในช่วงแบบเชิงเส้นของฟังก์ชัน $f(x)$ คือ

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0) \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (2)$$

ข) การประมาณค่าแบบโพลิโนเมียล

ในกรณีที่มีข้อมูล $n+1$ ข้อมูล สมการสำหรับการประมาณค่าภายในช่วงแบบโพลิโนเมียลที่สร้างจากข้อมูล $(x_0, x_1, \dots, x_n)$ คือ

$$f(x) = C_0 + C_1(x-x_0) + C_2(x-x_0)(x-x_1) + \dots + C_n(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{n-1}) \quad (3)$$

โดยสัมประสิทธิ์ C_i ซึ่ง $i = 0, 1, 2, \dots, n$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_0 = f(x_0) \quad (4)$$

$$C_1 = f[x_1, x_0] \quad (5)$$

$\vdots$

$$C_n = f[x_n, x_{n-1}, \dots, x_1, x_0] \quad (6)$$

โดย $f[x_i, x_j]$ คือ ผลต่างจากการแบ่งย่อย (divided difference) ครั้งที่ 1

$$f[x_i, x_j] = \frac{f(x_i) - f(x_j)}{x_i - x_j} \quad (7)$$

$f[x_i, x_j, x_k]$ คือ ผลต่างจากการแบ่งย่อยครั้งที่ 2

$$f[x_i, x_j, x_k] = \frac{f[x_i, x_j] - f[x_j, x_k]}{x_i - x_k} \quad (8)$$

และผลต่างจากการแบ่งย่อยครั้งที่ n คือ

$$f[x_n, x_{n-1}, \dots, x_1, x_0] = \frac{f[x_n, x_{n-1}, \dots, x_1] - f[x_{n-1}, \dots, x_1, x_0]}{x_n - x_0} \quad (9)$$

ค) การประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม

การสร้างฟังก์ชันเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลด้วยเส้นโค้งกำลังสาม (cubic spline) สามารถคำนวณจากข้อมูลอย่างน้อย 4 ข้อมูล ฟังก์ชันกำลังสามในแต่ละช่วงสำหรับกรณีมีข้อมูล 4 จุด คือ

$$f_1(x) = a_1x^3 + b_1x^2 + c_1x + d_1; x_0 \leq x \leq x_1 \quad (10)$$

$$f_2(x) = a_2x^3 + b_2x^2 + c_2x + d_2; x_1 \leq x \leq x_2 \quad (11)$$

$$f_3(x) = a_3x^3 + b_3x^2 + c_3x + d_3; x_2 \leq x \leq x_3 \quad (12)$$

โดย a_i, b_i, c_i, d_i เมื่อ $i = 1, 2, 3$ เป็นค่าคงที่ที่สามารถคำนวณได้จากเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

(1) ที่จุดต่อภายในใด ๆ ฟังก์ชันจาก 2 ด้านที่เชื่อมเข้าหากันที่จุดต่อ จำเป็นต้องมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งของจุดนั้น เช่น ที่จุดต่อ x_1

$$f_1(x_1) = a_1x_1^3 + b_1x_1^2 + c_1x_1 + d_1 = f(x_1) \quad (13)$$

และ

$$f_2(x_1) = a_2x_1^3 + b_2x_1^2 + c_2x_1 + d_2 = f(x_1) \quad (14)$$

ดังนั้น จึงเกิดเงื่อนไขเช่นนี้ 4 เงื่อนไข

(2) ฟังก์ชันแรกต้องผ่านข้อมูลที่ x_0 คือ

$$f_1(x_0) = a_1x_0^3 + b_1x_0^2 + c_1x_0 + d_1 = f(x_0) \quad (15)$$

และฟังก์ชันท้ายต้องผ่านข้อมูลที่ x_3 คือ

$$f_3(x_3) = a_3x_3^3 + b_3x_3^2 + c_3x_3 + d_3 = f(x_3) \quad (16)$$

นั่นคือ ก่อให้เกิดเงื่อนไขเพิ่มขึ้นอีก 2 เงื่อนไข

(3) ที่จุดต่อภายในใดๆ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative) หรือ ค่าความชันของฟังก์ชันทั้ง 2 ด้านของจุดต่อ ต้องมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งของจุดต่อนั้น เช่นที่จุดต่อ x_1 เงื่อนไขที่เกิดขึ้น คือ

$$f_1'(x_1) = f_2'(x_1) \quad (17)$$

ดังนั้น จึงประกอบด้วยเงื่อนไขอยู่ 2 เงื่อนไข

(4) ที่จุดต่อภายในใดๆ ค่าอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) ของฟังก์ชันทั้ง 2 ด้านของจุดต่อ ต้องมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งของจุดต่อนั้น เช่นที่จุดต่อ x_1 เงื่อนไขคือ

$$f_1''(x_1) = f_2''(x_1) \quad (18)$$

ดังนั้น จึงประกอบด้วยเงื่อนไขอยู่ 2 เงื่อนไข

(5) ค่าอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันที่ตำแหน่งจุดที่ปลายทั้งสอง นั่นคือ ที่ x_0 และ x_3 นั้น มีค่าเท่ากับศูนย์

$$f_1''(x_0) = f_3''(x_3) = 0 \quad (19)$$

ซึ่งก่อให้เกิดเงื่อนไขเพิ่มขึ้นอีก 2 เงื่อนไข

โดยรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประมาณค่าภายในช่วงทั้ง 3 แบบ สามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง [11]

3. ผลและการวิจารณ์

3.1 กรณีศึกษากลุ่ม A

กรณีศึกษากลุ่มนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลองที่ยอมรับได้ต้องให้ผลเฉลย K หรือ K_{FEA} ใกล้เคียงกับ K ที่คำนวณตามมาตรฐาน API-579 หรือ K_{API} ตารางที่ 2

แสดงผลการคำนวณ K ทั้งสองวิธีและความแตกต่าง จากตารางพบว่า K_{FEA} ของท่อบางมาก ($t/R_i = 0.001, 0.00333$) ท่อบาง ($t/R_i = 0.01, 0.025$) และท่อหนา ($t/R_i = 0.1, 0.33333$) แตกต่างจาก K_{API} น้อยกว่า 1% ดังนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อบางมาก ท่อบาง และท่อหนาจึงมีคุณภาพดีพอสำหรับการประเมิน K_{API} ที่มีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล (กรณีศึกษากลุ่ม B และ C)

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ของกรณีศึกษากลุ่ม A

กรณี	t/R_i	a/t	K_{API} (MPa√m)	K_{FEA} (MPa√m)	K_{Bowie} [12] (MPa√m)	% diff. (K_{FEA} vs. K_{API})	% diff. (K_{Bowie} vs. K_{API})
A1	0.00100	0.8	1.8547	1.8683	-	0.73%	-
A2	0.00333	0.8	0.9971	0.9982	-	0.11%	-
A3	0.01000	0.8	5.3545	5.3594	-	0.09%	-
A4	0.02500	0.8	2.9535	2.9571	-	0.12%	-
A5	0.10000	0.8	9.8145	9.8399	-	0.26%	-
A6	0.33333	0.8	3.6462	3.6458	-	-0.01%	-
A7	1.00000	0.8	2.3030	1.9892	1.9612	-13.63%	-14.84%
A8	3.00000	0.8	52.1304	1.6767	-	-96.78%	-

อย่างไรก็ตาม K_{FEA} ในกรณีท่อหนามาก ($1 \leq t/R_i \leq 3$) แตกต่างจาก K_{API} สูงถึง 13% Bowie และ Freese [12] ได้คำนวณ K ของรอยร้าวในท่อหนามาก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า K_{Bowie} ต่างจาก K_{API} อย่างมากเช่นกัน อย่างไรก็ตามสาเหตุของความแตกต่างนี้ ยังไม่ได้ถูกอธิบาย

เนื่องจากความแม่นยำของ K จากมาตรฐาน API-579 ในกรณีท่อหนามาก ($1 \leq t/R_i \leq 3$) ยังไม่ชัดเจนและท่อบางใหญ่ไม่ได้มีความหนาในช่วงดังกล่าว [2, 8] ในที่นี้จึงศึกษาผลของวิธีประมาณค่าภายในช่วงของค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลต่อการคำนวณ K เฉพาะท่อบางมาก ท่อบาง และท่อหนา

3.2 กรณีศึกษากลุ่ม B

กรณีศึกษากลุ่มนี้มี t/R_i ไม่ตรงกับค่า t/R_i ที่ระบุในตารางของมาตรฐาน API-579 การคำนวณ K_{API} ใช้วิธีประมาณค่าภายในช่วงของสัมประสิทธิ์อิทธิพล 3 วิธี คือ เชิงเส้น โพลีโนเมียล และเส้นโค้งกำลังสาม จากนั้นเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแต่ละวิธีกับ K_{FEA} ตัวอย่างการประมาณค่าภายในช่วงแบบเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์ G_0 ของกรณี B15 ($t/R_i = 0.25$ และ $a/t = 0.8$) แสดงในรูปที่ 5

จากสมการที่ (2) x หมายถึง t/R_i และ $f(x)$ หมายถึง G_0 สำหรับ t/R_i ที่ต้องการทราบจากการประมาณค่าภายในช่วงจากตารางในภาคผนวกจะได้ขอบเขตของการประมาณค่าของกรณีศึกษานี้คือ $x_0 = 0.2$ และ $x_1 = 0.33333$ และ $f(x_0) = 3.940906$ และ $f(x_1) = 3.056124$ เมื่อแทนค่าในสมการ (2) จะได้ G_0 ที่ $t/R_i = 0.25$ และ $a/t = 0.8$ เท่ากับ 3.609104

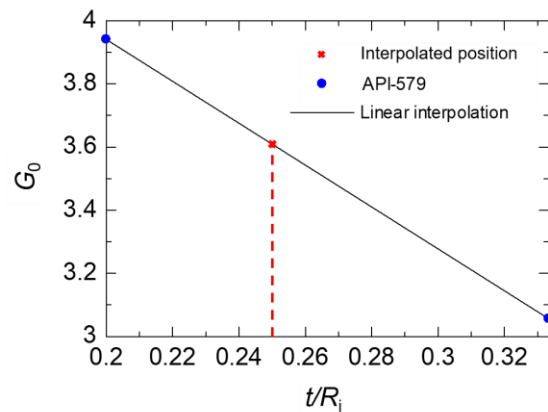
สำหรับการประมาณค่าในช่วงด้วยโพลีโนเมียล อันดับของโพลีโนเมียลขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลที่เลือกมาวิเคราะห์ การประมาณค่าในช่วง เช่น ใช้โพลีโนเมียลอันดับสอง ถ้าเลือกข้อมูล 3 จุด หลักการเลือกข้อมูลที่ใช้ในการประมาณค่าคือข้อมูลที่ต้องการประมาณค่าต้องอยู่กึ่งกลางของข้อมูลที่ใช้ประมาณค่า

รูปที่ 6ก-ง แสดงการประมาณค่าของ G_0 ด้วยโพลีโนเมียลตั้งแต่อันดับสอง อันดับสี่ อันดับห้า และอันดับแปด ตามลำดับ การประมาณค่าของ G_0 ด้วยโพลีโนเมียลอันดับสอง อันดับสี่ และอันดับห้า (รูปที่ 6ก-ค) พบว่า ค่าประมาณของ G_0 สอดคล้องกับพฤติกรรมของข้อมูลข้างเคียงที่ใช้

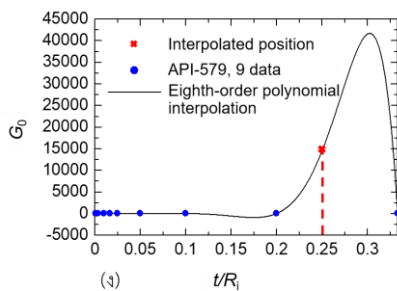
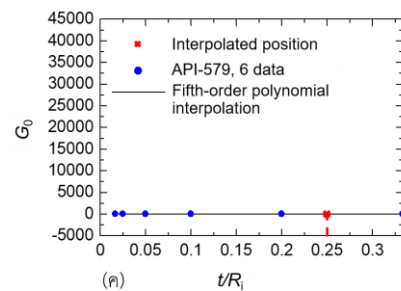
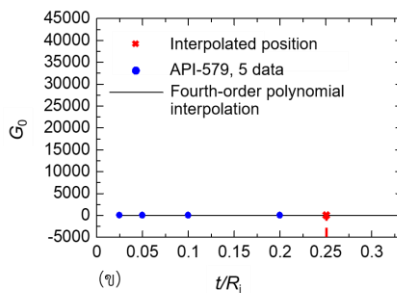
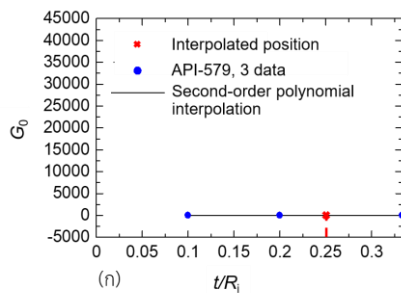
ประมาณค่า ในทางตรงกันข้าม G_0 ที่ประมาณด้วยโพลิโนเมียลอันดับแปด (รูปที่ 6ง) ซึ่งใช้จำนวนข้อมูลในการประมาณค่ามากที่สุด (9 จุด) พบว่าค่า G_0 เบี่ยงเบนอย่างมากจากข้อมูลข้างเคียงที่ใช้ประมาณค่า เมื่อเปรียบเทียบกับ K_{API} ซึ่งประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลด้วยโพลิโนเมียลอันดับต่าง ๆ กับ K_{FEA} (รูปที่ 7) พบว่า โพลิโนเมียลอันดับสองให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับ K_{FEA} มากที่สุด โดยมีความแตกต่าง -2.45% ดังนั้นการประมาณค่าในช่วงด้วยโพลิโนเมียลอันดับสองจึงถูกเลือกสำหรับประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล

สำหรับการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม จำนวนข้อมูลที่เลือกสำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลคือ 4, 5, 6, 8 และ 9 ข้อมูล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนข้อมูลที่ทำให้การประมาณค่าในช่วงมีความแม่นยำมากที่สุด หลักการเลือกตำแหน่งข้อมูลสำหรับจำนวนข้อมูล

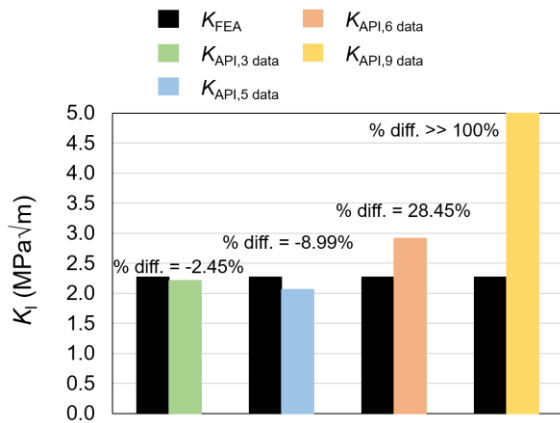
แต่ละค่าขึ้นเหมือนกันที่ใช้ในการประมาณค่าในช่วงด้วยโพลิโนเมียล



รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล G_0 จากระเบียบวิธีประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นสำหรับกรณี B15 ($t/R_i = 0.25$ และ $a/t = 0.8$)



รูปที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล G_0 จากระเบียบวิธีประมาณค่าภายในช่วงแบบโพลิโนเมียล สำหรับกรณี B15 ($t/R_i = 0.25$ และ $a/t = 0.8$): (ก) โพลิโนเมียลอันดับสอง (ข) โพลิโนเมียลอันดับสี่ (ค) โพลิโนเมียลอันดับห้า (ง) โพลิโนเมียลอันดับแปด



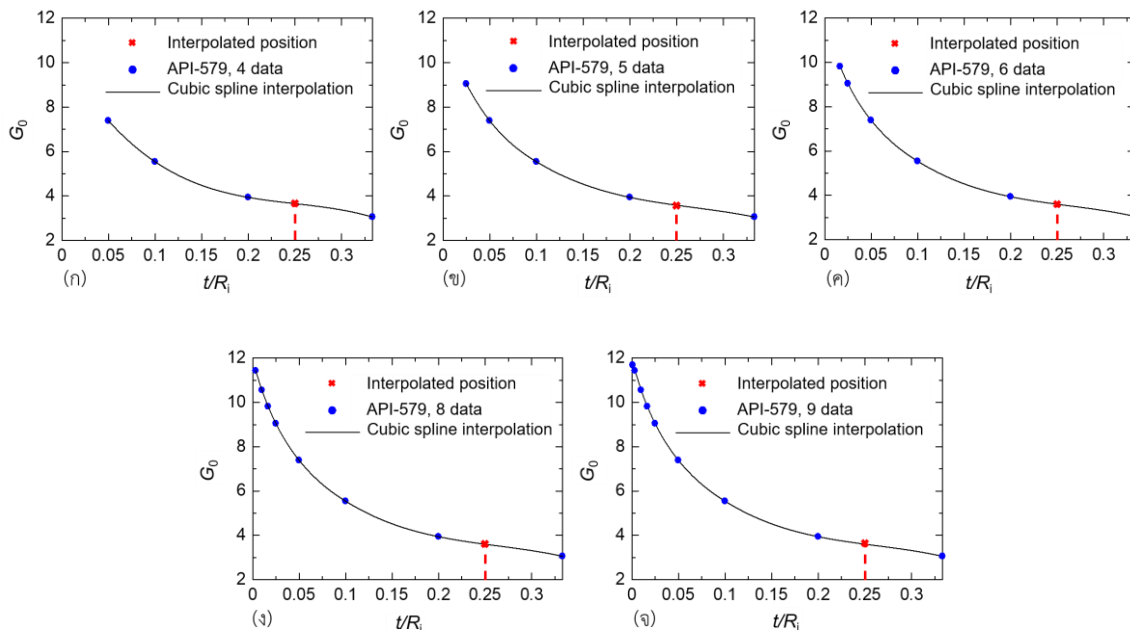
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบ K_{API} จากการเปรียบเทียบวิธีประมาณค่าภายในช่วงแบบโพลีโนเมียล กับ K_{FEA} สำหรับกรณี B15 ($t/R_i = 0.25$ และ $a/t = 0.8$)

รูปที่ 8 แสดงค่าประมาณของ G_0 สำหรับกรณี B15 เมื่อใช้จำนวนข้อมูลสำหรับประมาณค่าต่างกัน จากรูปค่าประมาณของ G_0 สอดคล้องกับพฤติกรรมของข้อมูลข้างเคียง เมื่อเปรียบเทียบ K_{API} จากการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามกับ K_{FEA} ในกรณี B15 ($t/R_i = 0.25$ และ $a/t = 0.8$) ดังรูปที่ 9 พบว่า K_{API} จากการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามโดยใช้จำนวนข้อมูล t/R_i

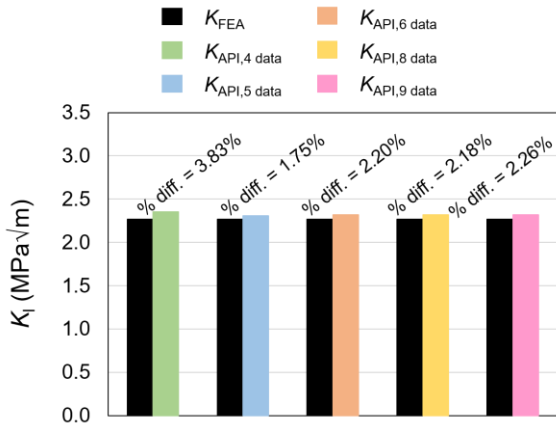
5 ข้อมูล ใกล้เคียงกับ K_{FEA} มากที่สุด โดยมีความแตกต่างเท่ากับ 1.75%

เมื่อประยุกต์การประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามที่ใช้ข้อมูล t/R_i 5 ข้อมูล กับกรณีท่อที่มีรอยร้าวต้น ($t/R_i = 0.002, 0.02, 0.15$ และ $a/t = 0.2$) พบว่า ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับ K_{FEA} เช่นกัน (รูปที่ 10)

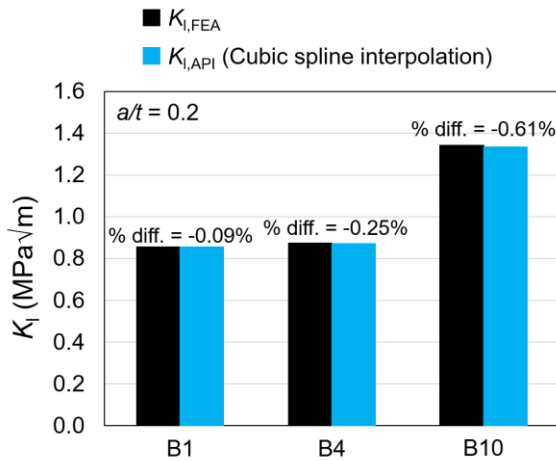
รูปที่ 11 เปรียบเทียบ K_{API} และ K_{FEA} สำหรับตัวอย่างในกลุ่มของท่อบางมาก ท่อบาง และท่อหนา จากรูปพบว่า K_{API} จากการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามจากข้อมูล t/R_i 5 ข้อมูล (รูปที่ 11ค) สอดคล้องกับ K_{FEA} มากที่สุด โดยความแตกต่างในกรณีท่อบางมาก (B3) ท่อบาง (B6, B9) และท่อหนา (B12, B15) เท่ากับ -0.43%, -0.18%, -0.15%, -0.77% และ 1.75% ตามลำดับ ตารางที่ 3 สรุป K_{API} จากการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นแบบโพลีโนเมียลอันดับสอง และแบบเส้นโค้งกำลังสามจากข้อมูล t/R_i 5 ข้อมูล และ K_{FEA} ดังนั้น วิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเพื่อคำนวณ K_{API} ด้วยระเบียบวิธีภายในช่วงแบบไม่เชิงเส้นสำหรับกรณีศึกษา กลุ่ม B คือวิธีการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามจากข้อมูล t/R_i 5 ข้อมูล



รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล G_0 จากการเปรียบเทียบวิธีประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามสำหรับกรณี B15 ($t/R_i = 0.25$ และ $a/t = 0.8$) ซึ่งประมาณค่าโดยใช้ t/R_i : (ก) 4 ข้อมูล (ข) 5 ข้อมูล (ค) 6 ข้อมูล (ง) 8 ข้อมูล (จ) 9 ข้อมูล



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบ K_{API} จากระเบียบวิธีประมาณค่า ในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม กับ K_{FEA} สำหรับกรณี B15 ($t/R_i = 0.25$ และ $a/t = 0.8$)



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบ K_{API} จากระเบียบวิธีประมาณค่า ในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม กับ K_{FEA} สำหรับกรณีรอยร้าว ตื้น ($a/t = 0.2$)

การเลือกข้อมูล t/R_i 5 ข้อมูล สำหรับการประมาณค่า ในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม มีหลักการดังนี้

1) ถ้าข้อมูลที่ต้องการประมาณค่ามีค่า t/R_i อยู่บริเวณ ส่วนกลางของตารางค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลของ API-579 ให้เลือกข้อมูลที่มีค่า t/R_i มากกว่าและน้อยกว่า t/R_i ของ ข้อมูลที่ต้องการประมาณอย่างละ 2 ข้อมูล รวมทั้งหมดเป็น 4 ข้อมูล ส่วนข้อมูลลำดับที่ 5 เลือกจากข้อมูลที่เหลือซึ่งมี ค่า t/R_i ใกล้ที่สุดกับ t/R_i ของข้อมูลที่ต้องการประมาณ ตัวอย่างเช่น ต้องการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลที่

$a/t = 0.8$ และ $t/R_i = 0.02$ ข้อมูล t/R_i จำนวน 5 ข้อมูล ที่ เลือกสำหรับการประมาณค่าภายในช่วง คือ 0.00333, 0.01, 0.01667, 0.025 และ 0.05

2) ถ้าข้อมูลที่ต้องการประมาณค่ามีค่า t/R_i ใกล้กับ ค่าต่ำสุดของ t/R_i ในตารางค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลของ API-579 ($t/R_i = 0.001$) จนทำให้เลือกข้อมูลด้วยวิธีแรก ไม่ได้ ในกรณีนี้ให้เลือกข้อมูลที่มีค่า t/R_i ต่ำสุด 1 ข้อมูล ส่วนข้อมูลที่เหลืออีก 4 ข้อมูล เลือกข้อมูลที่มีค่า t/R_i มากกว่า t/R_i ของข้อมูลที่ต้องการประมาณ ตัวอย่างเช่น ต้องการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลที่ $a/t = 0.8$ และ $t/R_i = 0.002$ ข้อมูล t/R_i จำนวน 5 ข้อมูล ที่เลือกสำหรับการ ประมาณค่าภายในช่วง คือ 0.001, 0.00333, 0.01, 0.01667 และ 0.025

3) ถ้าข้อมูลที่ต้องการประมาณค่ามีค่า t/R_i ใกล้กับ ค่าสูงสุดของ t/R_i ในตารางค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลของ API-579 ($t/R_i = 0.33333$) จนทำให้เลือกข้อมูลด้วยวิธีแรก ไม่ได้ ในกรณีนี้ให้เลือกข้อมูลที่มีค่า t/R_i สูงสุด 1 ข้อมูล ส่วนข้อมูลที่เหลืออีก 4 ข้อมูล เลือกข้อมูลที่มีค่า t/R_i น้อยกว่า t/R_i ของข้อมูลที่ต้องการประมาณ ตัวอย่างเช่น ต้องการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลที่ $a/t = 0.8$ และ $t/R_i = 0.25$ ข้อมูล t/R_i จำนวน 5 ข้อมูล ที่เลือกสำหรับการ ประมาณค่าภายในช่วง คือ 0.025, 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.33333

3.3 กรณีศึกษา กลุ่ม C

กรณีศึกษา กลุ่มนี้มี t/R_i และ a/t ไม่ตรงกับค่า t/R_i และ a/t ที่ระบุในตารางของมาตรฐาน API-579 การ ประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลจึงต้องพิจารณาทั้งตัวแปร t/R_i และ a/t ในที่นี้พิจารณา t/R_i ก่อนแล้วตามด้วย a/t การคำนวณ K_{API} ใช้วิธีประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น และ วิธีเส้นโค้งกำลังสามจากข้อมูล t/R_i 5 ข้อมูล เนื่องจาก สามารถประมาณค่า K ได้แม่นยำที่สุดจากกรณีศึกษา กลุ่ม B K_{API} ของแต่ละวิธีถูกเปรียบเทียบกับ K_{FEA} ดังแสดงในตาราง ที่ 4

การประมาณค่าภายในแบบเชิงเส้นในบางตัวอย่างของ กลุ่มท่อบางมาก ท่อบาง และท่อหนา จากรูปที่ 12ก พบว่า กรณีท่อบางมาก (C3) ท่อบาง (C6, C9) และท่อหนา (C12,

C15) วิธีประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น ประมาณค่า K_{API} แตกต่างจาก K_{FEA} เท่ากับ 24.03%, 15.95%, 11.66%, 3.67% และ 1.93% ตามลำดับ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญสำหรับกรณีท่อบางมาก (C3) และท่อบาง (C6, C9) เกิดจากสัมประสิทธิ์อิทธิพลของมาตรฐาน API-579 มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงขึ้นเมื่อ t/R_i น้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งตั้งแต่กรณีท่อบางลงไป พฤติกรรมไม่เชิงเส้นนี้ทำให้การประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นได้ผลลัพธ์ไม่แม่นยำ

อย่างไรก็ตาม วิธีประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม (รูปที่ 12ข) สามารถแสดงพฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลได้ดีกว่า K_{API} ของวิธีนี้จึงสอดคล้องกับ K_{FEA} มากกว่าโดยความแตกต่างในกรณีดังกล่าวลดเหลือ 7.32%, 3.51%, 1.73%, -1.40% และ 0.40% ตามลำดับ ดังนั้น วิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประมาณค่าในช่วงของสัมประสิทธิ์อิทธิพล คือวิธีเส้นโค้งกำลังสามจากข้อมูล 5 ข้อมูล

แม้ว่าวิธีประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น แต่ก็มีบางกรณี (กรณี C3 ในตารางที่ 4) ที่ K_{API} แตกต่างจาก K_{FEA} อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงควรศึกษาการประมาณค่าในช่วงวิธีอื่นหรืออาจใช้เทคนิค machine learning เพื่อให้การประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล และการคำนวณ K แม่นยำขึ้น

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์การประมาณค่าในช่วงทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลสำหรับคำนวณ K ด้วยสมการในมาตรฐาน API-579 โดยศึกษาท่อมีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านใน และรับความดันภายใน แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกตรวจสอบความแม่นยำก่อนใช้เป็นบรรทัดฐานสำหรับประเมินความแม่นยำของ K ที่คำนวณ จากการประมาณค่าในช่วงของสัมประสิทธิ์อิทธิพลของมาตรฐาน API-579 ผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

กลุ่ม A ซึ่งมี t/R_i และ a/t ตรงกับค่าในตารางของมาตรฐาน API-579 ใช้สำหรับตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า K_{FEA} ของท่อบางมาก ($t/R_i = 0.001, 0.00333$) ท่อบาง ($t/R_i = 0.01, 0.025$) และท่อหนา ($t/R_i = 0.1, 0.33333$) แตกต่างจาก K_{API} น้อยกว่า 1% ดังนั้น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อบางมาก ท่อบาง และท่อหนา จึงมีคุณภาพดีพอสำหรับการประเมิน K_{API} ที่มีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล

กลุ่ม B ซึ่งมี t/R_i ไม่ตรงกับค่าในตารางของมาตรฐาน API-579 จึงต้องใช้การประมาณค่าภายในช่วงของ t/R_i พบว่า K_{API} จากการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามจากข้อมูล t/R_i 5 ข้อมูลสอดคล้องกับ K_{FEA} มากที่สุด ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเพื่อคำนวณ K_{API} ด้วยระเบียบวิธีภายในช่วงแบบไม่เชิงเส้นสำหรับกรณีศึกษาในกลุ่ม B คือวิธีการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามจากข้อมูล t/R_i 5 ข้อมูล

กลุ่ม C ซึ่งมี t/R_i และ a/t ไม่ตรงกับค่าในตารางของมาตรฐาน API-579 ในกลุ่มนี้จึงต้องใช้การประมาณค่าภายในช่วงทั้ง t/R_i และ a/t โดยการศึกษาในกลุ่มนี้สามารถที่จะใช้ทำความเข้าใจผลกระทบของ t/R_i และ a/t ในเวลาเดียวกัน ที่มีต่อการประมาณค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลและ K พบว่า การประมาณค่าภายในช่วงแบบเชิงเส้นให้ค่า K ต่างจาก K_{FEA} มาก โดยมีความแตกต่างสูงสุดเป็น 25% สำหรับท่อบางมาก และเป็น 16% สำหรับท่อบาง ในขณะที่การประมาณค่าภายในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามจากข้อมูล 5 จุด สามารถคำนวณ K ได้ใกล้เคียงกับ K_{FEA} มากกว่า โดยมีความแตกต่างสูงสุดเป็น 7.32% ดังนั้นวิธีประมาณค่าภายในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสามซึ่งใช้จุดข้อมูล 5 จุด คือวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณค่าภายในช่วงสำหรับการคำนวณ K

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

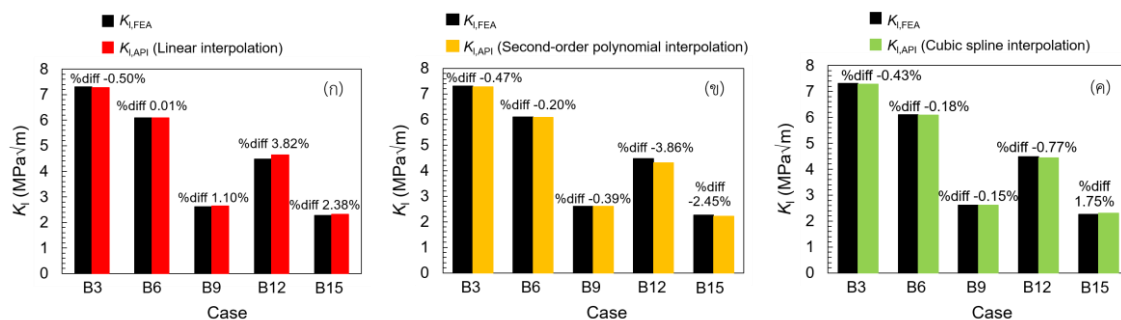
ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ของกรณีศึกษากลุ่ม B

กรณี	t/R_i	a/t	method ⁽¹⁾	K_{API} (MPa√m)	K_{FEA} (MPa√m)	% diff.
B1	0.0020	0.2	L	0.8549	0.8555	-0.07%
			P	0.8548	0.8555	-0.08%
			CS	0.8547	0.8555	-0.09%
B2	0.0020	0.4	L	1.3216	1.3237	-0.16%
			P	1.3213	1.3237	-0.18%
			CS	1.3212	1.3237	-0.19%
B3	0.0020	0.8	L	7.2719	7.3081	-0.50%
			P	7.2740	7.3081	-0.47%
			CS	7.2764	7.3081	-0.43%
B4	0.0200	0.2	L	0.8715	0.8737	-0.25%
			P	0.8715	0.8737	-0.25%
			CS	0.8715	0.8737	-0.25%
B5	0.0200	0.4	L	1.3320	1.3363	-0.32%
			P	1.3318	1.3363	-0.34%
			CS	1.3318	1.3363	-0.34%
B6	0.0200	0.8	L	6.1011	6.1006	0.01%
			P	6.0885	6.1006	-0.20%
			CS	6.0898	6.1006	-0.18%
B7	0.0400	0.2	L	0.4459	0.4488	-0.65%
			P	0.4459	0.4488	-0.65%
			CS	0.4459	0.4488	-0.65%
B8	0.0400	0.4	L	0.6732	0.6750	-0.27%
			P	0.6731	0.6750	-0.28%
			CS	0.6732	0.6750	-0.27%
B9	0.0400	0.8	L	2.6424	2.6136	1.10%
			P	2.6034	2.6136	-0.39%
			CS	2.6096	2.6136	-0.15%
B10	0.1500	0.2	L	1.3343	1.3423	-0.60%
			P	1.3342	1.3423	-0.60%
			CS	1.3341	1.3423	-0.61%
B11	0.1500	0.4	L	1.8916	1.8936	-0.11%
			P	1.8889	1.8936	-0.25%
			CS	1.8888	1.8936	-0.25%
B12	0.1500	0.8	L	4.6505	4.4794	3.82%
			P	4.3067	4.4794	-3.86%
			CS	4.4451	4.4794	-0.77%
B13	0.2500	0.2	L	0.8777	0.8822	-0.51%
			P	0.8774	0.8822	-0.54%
			CS	0.8773	0.8822	-0.56%
B14	0.2500	0.4	L	1.1821	1.1823	-0.02%
			P	1.1794	1.1823	-0.25%
			CS	1.1797	1.1823	-0.22%
B15	0.2500	0.8	L	2.3236	2.2696	2.38%
			P	2.2139	2.2696	-2.45%
			CS	2.3094	2.2696	1.75%

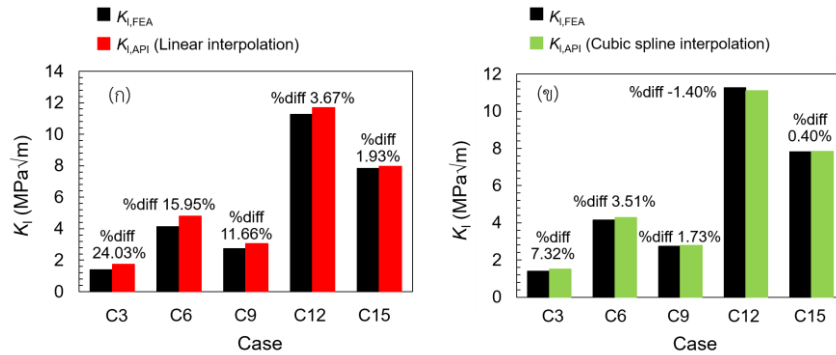
ตารางที่ 4 ผลลัพธ์ของกรณีศึกษากลุ่ม C

กรณี	t/R_i	a/t	method ⁽¹⁾	K_{API} (MPa√m)	K_{FEA} (MPa√m)	% diff.
C1	0.0020	0.1	L	0.1046	0.0997	4.91%
			CS	0.0976	0.0997	-2.11%
C2	0.0020	0.5	L	0.5758	0.5298	8.68%
			CS	0.5064	0.5298	-4.42%
C3	0.0020	0.7	L	1.7375	1.4009	24.03%
			CS	1.5034	1.4009	7.32%
C4	0.0200	0.1	L	0.3383	0.3248	4.16%
			CS	0.3211	0.3248	-1.14%
C5	0.0200	0.5	L	1.7977	1.6747	7.34%
			CS	1.6307	1.6747	-2.63%
C6	0.0200	0.7	L	4.8047	4.1438	15.95%
			CS	4.2894	4.1438	3.51%
C7	0.0400	0.1	L	0.2454	0.2357	4.12%
			CS	0.2353	0.2357	-0.17%
C8	0.0400	0.5	L	1.2586	1.1810	6.57%
			CS	1.1671	1.1810	-1.18%
C9	0.0400	0.7	L	3.0531	2.7344	11.66%
			CS	2.7818	2.7344	1.73%
C10	0.1500	0.1	L	1.4444	1.3916	3.79%
			CS	1.3983	1.3916	0.48%
C11	0.1500	0.5	L	6.2893	6.0660	3.68%
			CS	6.0785	6.0660	0.21%
C12	0.1500	0.7	L	11.6865	11.2724	3.67%
			CS	11.1147	11.2724	-1.40%
C13	0.2500	0.1	L	1.2435	1.2008	3.56%
			CS	1.2042	1.2008	0.28%
C14	0.2500	0.5	L	4.8223	4.7045	2.50%
			CS	4.7159	4.7045	0.24%
C15	0.2500	0.7	L	7.9723	7.8215	1.93%
			CS	7.8531	7.8215	0.40%

(1) L, P และ CS หมายถึง การประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น แบบโพลิโนเมียลอันดับสอง และแบบเส้นโค้งกำลังสามตามลำดับ



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบ K_{API} จากระเบียบวิธีประมาณค่าในช่วง กับ K_{FEA} ในกรณีรอยร้าวลึก ($a/t = 0.8$) และ t/R_i ไม่ตรงกับค่าที่ระบุในตาราง API-579: ก) ประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น ข) ประมาณค่าด้วยโพลิโนเมียลอันดับสอง ค) ประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบ K_{API} จากระเบียบวิธีประมาณค่าในช่วง กับ K_{FEA} ในกรณี t/R_i และ a/t ไม่ตรงกับค่าที่ระบุในตาราง API-579: ก) ประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น ข) ประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. M. Nabavi, and S. S. H. Rekavandi, "Analysis of stress intensity factors for functionally graded cylinders with multiple longitudinal cracks using finite element method," Applied and Computational Mechanics, vol. 13, no. 2, pp. 125-136, 2019.
- [2] M. Gonzalez, and M. Martinez, "Stress intensity factors for axial cracks in pressurized cylindrical elements using the boundary element method," in Proc. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 2013, vol 3.
- [3] H. J. Schindler, "Prediction of rapid ductile crack extension and arrest by an analytical approach," in International Pipeline Conference, 2010, vol. 2, pp. 341-350.
- [4] K. D. Bae, C. G. Kim, Z. Murni, S. J. Kim, and Y. J. Kim, "Reference Stress-Based J Estimation of Circumferential Through-Wall Cracked Elbow with Unequal Thickness under Bending," in Proc. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 2014, vol. 6A.
- [5] C. Q. Li, G. Fu, and W. Yang, "Stress intensity factors for inclined external surface cracks in pressurised pipes," Engineering Fracture Mechanics, vol. 165, Oct., pp. 72-86, 2016.
- [6] API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-for-service, American Petroleum Institute, Jun., 2016.
- [7] H. M. Shu, J. Petit, and G. Bezzine, "Stress intensity factors for radial cracks in thick walled cylinders—I. Symmetrical cracks," Engineering Fracture Mechanics, vol. 49, no. 4, Nov., pp. 611-623, 1994.
- [8] S. Rahman, M. Gao, and R. Krishnamurthy, "API 579 G-Factors for K calculations and improvements for assessment of crack-like flaws in pipelines," in International Conference on Fracture, 2013, vol. 5, pp. 3766-3775.
- [9] ภัทธชนิดา สินวล, จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ, นิติกร นรภัยพิพาษา และชาวสวน กาญจน์มัย, "การปรับปรุงวิธีคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นของมาตรฐาน API-579-1/ASME FFS-1 สำหรับรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านในของท่อรับความดันภายใน," ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35, 2564, หน้า 416-424.

[10] ABAQUS 6.13 Analysis User's Guide. Dassault Systemes Simulia Corp, 2013.

[11] A. Gilat, Numerical methods for engineers and scientists. Wiley Global Education, 2013.

[12] O. L. Bowie, and C. E. Freese, "Elastic analysis for a radial crack in a circular ring," Engineering Fracture Mechanics, vol. 4, no. 2, pp. 315-321, 1972.

ภาคผนวก ก

ตาราง ก.1 สัมประสิทธิ์อิทธิพลสำหรับท่อที่มีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านใน และรับความดันภายใน ตามมาตรฐาน API-579 [6]

t/R_i	a/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.00100	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.362669	0.775768	0.577169	0.475763	0.405555
	0.4	2.107481	1.059637	0.734602	0.578123	0.483688
	0.6	4.023909	1.759944	1.112458	0.819725	0.660648
	0.8	11.685450	4.447550	2.518103	1.697986	1.278424
0.00333	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.357654	0.772719	0.575074	0.474050	0.404119
	0.4	2.098124	1.055171	0.731561	0.575621	0.481987
	0.6	3.984819	1.744473	1.103460	0.813729	0.656089
	0.8	11.431820	4.361182	2.474754	1.671906	1.260057
0.01000	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.355721	0.772039	0.574618	0.473607	0.403962
	0.4	2.088097	1.051685	0.729765	0.574481	0.481203
	0.6	3.924228	1.722783	1.091988	0.806497	0.650855
	0.8	10.554820	4.054112	2.314531	1.572029	1.189801
0.01667	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.353978	0.771359	0.574252	0.473441	0.403767
	0.4	2.076759	1.047310	0.727245	0.572880	0.479971
	0.6	3.857250	1.698243	1.078613	0.797885	0.644619
	0.8	9.818255	3.796811	2.179989	1.488012	1.131273
0.02500	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.351845	0.770679	0.573795	0.473108	0.403649
	0.4	2.064088	1.042414	0.724534	0.571046	0.478588
	0.6	3.780308	1.670205	1.063426	0.788181	0.637578
	0.8	9.046439	3.526527	2.038831	1.400363	1.069409
0.05000	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.345621	0.768292	0.572560	0.472331	0.402984
	0.4	2.028188	1.028989	0.717256	0.566433	0.475028
	0.6	3.573882	1.594673	1.023108	0.762465	0.618437
	0.8	7.388754	2.946567	1.736182	1.211533	0.936978

ตาราง ก.1 (ต่อ) สัมประสิทธิ์อิทธิพลสำหรับท่อที่มีรอยร้าวตามแนวยาวที่ผนังด้านใน และรับความดันภายใน
ตามมาตรฐาน API-579 [6]

t/R_i	a/t	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
0.10000	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.332691	0.763153	0.569758	0.470495	0.401459
	0.4	1.957764	1.002123	0.702473	0.556857	0.467621
	0.6	3.223438	1.466106	0.953655	0.718048	0.585672
	0.8	5.543784	2.300604	1.398958	1.000682	0.789201
0.20000	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.307452	0.753466	0.564298	0.466913	0.398757
	0.4	1.833200	0.954938	0.676408	0.539874	0.454785
	0.6	2.734052	1.287570	0.857474	0.656596	0.540720
	0.8	3.940906	1.739955	1.106210	0.818230	0.661258
0.33333	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.276782	0.742170	0.558403	0.463081	0.359594
	0.4	1.697454	0.903713	0.648337	0.521591	0.440820
	0.6	2.343563	1.146104	0.781532	0.605006	0.505644
	0.8	3.056124	1.430631	0.944773	0.717096	0.591403
1.00000	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.158826	0.698680	0.534893	0.447408	0.391564
	0.4	1.324233	0.763056	0.571186	0.471434	0.408975
	0.6	1.552523	0.856392	0.625411	0.508045	0.435872
	0.8	1.937307	1.039092	0.740258	0.589449	0.497688
1.50000	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.095935	0.674192	0.521132	0.438343	0.385033
	0.4	1.195441	0.714295	0.544247	0.453881	0.396420
	0.6	1.363930	0.787606	0.588288	0.484241	0.419044
	0.8	1.712406	0.960052	0.698716	0.563341	0.479524
2.00000	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.050181	0.656452	0.511188	0.431805	0.380330
	0.4	1.117793	0.684999	0.528081	0.443349	0.388885
	0.6	1.260936	0.750026	0.567958	0.471166	0.409774
	0.8	1.589273	0.916175	0.675351	0.548481	0.469075
2.50000	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	1.015777	0.643173	0.503766	0.426933	0.376830
	0.4	1.066260	0.665614	0.517390	0.436381	0.383896
	0.6	1.195498	0.726062	0.554924	0.462733	0.403760
	0.8	1.508842	0.886980	0.659542	0.538273	0.461798
3.00000	0.0	1.120000	0.682000	0.524500	0.440400	0.379075
	0.2	0.989094	0.632923	0.498052	0.423189	0.374143
	0.4	1.029530	0.651825	0.509783	0.431415	0.380334
	0.6	1.149572	0.709114	0.545620	0.456656	0.399385
	0.8	1.450839	0.865530	0.647735	0.530539	0.456213