

ซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพและอายุใช้งานที่เหลือของภาชนะทรงกระบอกที่มีรอยร้าว



นางสาวพงษ์ทิพย์ ช่างพานิช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SOFTWARE FOR INTEGRITY AND REMAINING LIFE ASSESSMENT OF CRACKED  
CYLINDRICAL VESSEL

Miss Pongthip Changpanitch



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพและอายุใช้งานที่เหลือของ  
ภาชนะทรงกระบอกที่มีรอยร้าว

โดย

นางสาวพงษ์ทิพย์ ช่างพานิช

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์ถนัดกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตน์สุมาวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร.ชาวสวน กาญจน์มัย)

พงษ์ทิพย์ ช่างพานิช : ซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพและอายุใช้งานที่เหลือของภาชนะ  
ทรงกระบอกที่มีรอยร้าว (SOFTWARE FOR INTEGRITY AND REMAINING LIFE  
ASSESSMENT OF CRACKED CYLINDRICAL VESSEL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.  
ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, 133 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้พัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับประเมินการคงสภาพของโครงสร้างทรงกระบอกที่มี  
รอยร้าว โดยใช้ระเบียบวิธีของการประเมินตามมาตรฐาน API 579 สามารถทำการประเมินได้ 3  
ระดับคือ ระดับ 1, ระดับ 2 และระดับ 3 (ทางเลือก B) ซอฟต์แวร์สามารถประเมินโครงสร้าง  
ทรงกระบอกที่รับภาระ ความดันภายใน, แรงแนวยาว, โมเมนต์ดัด และโปรไฟล์ความเค้นตามแนว  
ความหนาในรูปสมการพหุนามอันดับสี่, ความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และความเค้น  
ตกค้างเนื่องจากการเชื่อม โครงสร้างมีรอยร้าวผิวหรือรอยร้าวทะลุความหนาวางตัวตามแนวยาวหรือ  
แนวเส้นรอบวง นอกจากนี้ ซอฟต์แวร์ยังรองรับการประเมินอายุใช้งานที่เหลือและการประเมินการ  
รื้อก่อนการแตกหัก

โครงสร้างของซอฟต์แวร์ออกแบบด้วยแนวคิดเชิงวัตถุ โดยมีคลาสหลัก 3 คลาส คือ คลาส  
GUI, คลาสโครงสร้าง และคลาสประเมินสภาพ คลาส GUI มีหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้ คลาส  
โครงสร้างมีคลาสย่อย สำหรับเก็บข้อมูลสมบัติวัสดุ, รอยร้าว, ภาระใช้งาน, จำนวนแรงขับเคลื่อนรอย  
ร้าว, ภาระขีดจำกัด และประมาณค่าความต้านทานการแตกหัก คลาสประเมินสภาพสามารถคำนวณ  
ความยาวรอยร้าวที่ยอมรับ, จำนวนจุดประเมิน และคำนวณเส้นโค้งความเสียหาย

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการโดยใช้ภาษา Delphi โปรแกรม Delphi XE6 Embarcadero  
RAD Studio for Windows ซึ่งรองรับการออกแบบซอฟต์แวร์ด้วยแนวคิดเชิงวัตถุ

สอบทวนความถูกต้องของซอฟต์แวร์ด้วยการเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยโปรแกรม  
MathCAD การสอบทวนแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ปัญหาตัวอย่างใน API 579 และตัวอย่างปัญหาซึ่ง  
ครอบคลุมเงื่อนไขต่าง ๆ ของมาตรฐาน จากการตรวจสอบพบว่าผลการประเมินตรงกัน

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

# # 5670289521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: API 579, STRUCTURAL INTEGRITY, OBJECT-ORIENTATED PROGRAMING

PONGTHIP CHANGPANITCH: SOFTWARE FOR INTEGRITY AND REMAINING LIFE ASSESSMENT OF CRACKED CYLINDRICAL VESSEL. ADVISOR: ASST. PROF. JIRAPONG KASIVITAMNUAY, Ph.D., 133 pp.

This thesis developed software for integrity assessment of a cracked cylinder based on API 579 standard. The software has the capability to assess level 1, 2 and 3 (Option B). The software subjected to internal pressure, axial force, bending moment, and stress profile along thickness described by the 4th order polynomial function, thermal stress profile due to the temperature gradient. And residual stress due to welding. A through-wall crack or a surface crack in axial or circumferential orientation. The software also supports the evaluation of the remaining life assessment and leaked-before-break assessment.

The software structure is design the object-orientated paradigm and has 3 main classes namely “GUI”, “structure” and “assessment” classes. The “GUI” class communicate with a user. The “structure” class has subclasses for storage, material properties, crack, load, and compute the driving force for fracture, the limit load and about the fracture toughness. The “assessment” class has a Screening curve assessment function for determining an allowable crack length and FAD assessment function subclass for calculating an assess point and failure assessment curve.

This thesis has developed by using the Delphi language and using Delphi XE6 Embarcadero RAD Studio for Windows program is compatible with the concept of object-oriented programming software design.

Validate the software by comparing the calculation results with the program MathCAD. Validation is divided into 2 parts. Firstly, the example problems in API 579. Secondly, the problem was covered

Department: Mechanical Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี เพราะได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย อาจารย์ที่ปรึกษางานวิทยานิพนธ์ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยและการดำเนินชีวิตในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์ และ ศาสตราจารย์ ดร. ชาวสวน กาญจนมัย ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงงานวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชา วิศวกรรม เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยสนับสนุนทุนวิจัย

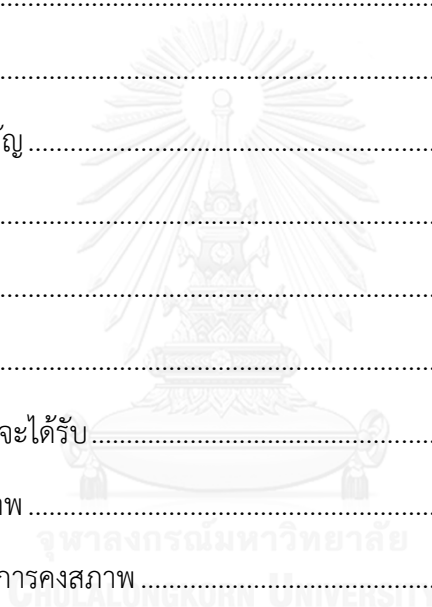
ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และบุคคลรอบข้างที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ ด้วยความเต็มใจมาตลอด

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนด้านการศึกษา ช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอ ทำให้ผู้วิจัยทำวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขต.....	3
1.4 วิธีดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. การประเมินการคงสภาพ.....	4
2.1 มาตรฐานประเมินการคงสภาพ.....	4
2.1.1 มาตรฐาน R6.....	4
2.1.2 มาตรฐาน BS7910.....	5
2.1.3 มาตรฐาน FITNET.....	5
2.1.4 มาตรฐาน SINTAP.....	6
2.1.5 มาตรฐาน CVDA-84.....	6
2.1.6 มาตรฐาน API 579.....	6
2.2 โปรแกรมเชิงพาณิชย์.....	7
2.2.1 IWM VERB 8.1.....	8



2.2.2 Signal FFS 4.2.1.....	8
2.2.3 Vindio 1.1.....	8
2.3 โปรแกรมเชิงงานวิจัย.....	9
3. ความรู้พื้นฐาน.....	15
3.1 ภาวะ.....	15
3.2 กลศาสตร์การแตกหัก.....	16
3.2.1 พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว.....	16
3.2.2 สมบัติวัสดุ.....	25
3.2.2.1 สมบัติทางกายภาพ.....	25
3.2.2.2 สมบัติแรงดึง.....	25
3.2.2.3 ความต้านทานการแตกหัก.....	26
3.2.2.4 อัตราการเติบโตของรอยร้าว.....	27
4. การประเมินการคงสภาพของโครงสร้างที่มีรอยร้าวตามมาตรฐาน API 579.....	30
4.1 การระบุลักษณะรอยร้าว.....	30
4.1.1 การระบุลักษณะรอยร้าวอุดมคติ.....	30
4.1.2 การเปลี่ยนแนวการวางตัวของรอยร้าว.....	31
4.1.3 การพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าว.....	32
4.1.4 การเปลี่ยนชนิดของรอยร้าว.....	33
4.2 โพรไฟล์ความเค้นตกค้าง.....	34
4.2.1 โพรไฟล์ความเค้นตกค้างที่ผิว.....	36
4.2.2 โพรไฟล์ความเค้นตกค้างตามแนวความหนา.....	37
4.3 สมบัติแรงดึง.....	38
4.4 ความต้านทานการแตกหัก.....	39



4.4.1 การประมาณจากเส้นโค้งขอบเขตล่าง .....	39
4.4.2 การประมาณจากค่าชาร์ปี.....	41
4.4.3 การประมาณโดยใช้ Master Curve .....	41
4.5 การประเมินการคงสภาพ .....	42
4.5.1 การประเมินระดับ 1 Screening Curve.....	43
4.5.2 แผนภาพประเมินความเสียหาย .....	46
4.5.2.1 การประเมินระดับ 2 .....	52
4.5.2.2 การประเมินระดับ 3 .....	54
4.6 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ .....	54
4.7 การประเมินการรั่วก่อนการแตกหัก.....	57
5. การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ.....	59
5.1 แนวคิดการเขียนโปรแกรม .....	59
5.2 คลาสและวัตถุ.....	59
5.3 เอกลักษณ์ของแนวคิดเชิงวัตถุ.....	61
5.3.1 หลักการห่อหุ้มข้อมูล .....	61
5.3.2 หลักการสืบทอด .....	62
5.3.3 การทำงานร่วมกันของออบเจกต์.....	63
5.3.4 หลักการเปลี่ยนรูป.....	64
6. การออกแบบซอฟต์แวร์ .....	65
6.1 การกำหนดขีดความสามารถของซอฟต์แวร์.....	65
6.2 เครื่องมือ.....	66
6.3 การออกแบบโครงสร้างโปรแกรม.....	66
6.3.1 การระบุคลาสหลัก.....	67

6.3.2 คลาสต่อประสานงานกับผู้ใช้ .....	67
6.3.3 คลาส TStructure.....	68
6.3.4 คลาส TAssessment.....	78
6.4 ผลการออกแบบ .....	85
6.4.1 คลาส TfrmMain .....	85
6.4.2 คลาส TfrmStructure .....	89
6.4.3 คลาส TfrmMaterial .....	96
7. ตรวจสอบการทำงานของซอฟต์แวร์.....	101
7.1 ปัญหาที่ใช้ตรวจสอบส่วนย่อย .....	102
7.1.1 การตรวจสอบเกณฑ์ตัดสินใจเลือกแผนภาพการประเมินระดับ 1.....	103
7.1.2 การตรวจสอบเกณฑ์ตัดสินใจเลือก screening curve.....	103
7.1.3 การตรวจสอบเกณฑ์ตัดสินใจเลือกเส้นใน screening curve.....	104
7.1.4 การตรวจสอบการคำนวณอุณหภูมิอ้างอิง.....	105
7.1.5 การตรวจสอบการประเมินการคงสภาพระดับ 1 .....	105
7.1.6 การตรวจสอบการเลือกตัวประกอบความปลอดภัย.....	108
7.1.7 การตรวจสอบเปรียบเทียบผลจากการระบุภาระและระบุความเค้น .....	109
7.1.8 การตรวจสอบการระบุภาระในโครงสร้างที่มีรอยร้าววางตัวตามยาว .....	112
7.1.9 การตรวจสอบการประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง .....	115
7.1.10 การตรวจสอบการประเมินการรั่วก่อนการแตกหัก.....	117
7.2 ตัวอย่างการประเมินจากมาตรฐาน API 579.....	118
7.2.1 โจทย์ข้อ 1 .....	118
7.2.2 โจทย์ข้อ 2 .....	119
8 สรุป.....	122

8.1 ศึกษาความรู้ที่เกี่ยวข้อง .....	122
8.2 ผลการออกแบบโปรแกรม .....	122
8.3 ซีดความสามารถของซอฟต์แวร์.....	123
8.4 ข้อเสนอแนะ .....	124
ภาคผนวก การประมาณค่าในช่วง .....	126
ผนวก.1 การประมาณค่าฟังก์ชัน 1 ตัวแปร.....	126
ผนวก.2 การประมาณค่าฟังก์ชันที่มี 3 ตัวแปร.....	126
รายการอ้างอิง .....	127
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	133



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบมาตรฐานการประเมินการคงสภาพที่มีในปัจจุบัน .....	4
ตารางที่ 2.2	เปรียบเทียบของซอฟต์แวร์สำเร็จรูปสำหรับประเมินการคงสภาพ .....	9
ตารางที่ 2.3	เปรียบเทียบโปรแกรมการประเมินการคงสภาพที่พัฒนาในเชิงงานวิจัย .....	10
ตารางที่ 2.4	ข้อสังเกตเกี่ยวกับคลาสไดอะแกรมของจุดพร .....	14
ตารางที่ 4.1	ตารางเปรียบเทียบรอยร้าวที่พบกับรอยร้าวในอุดมคติจำแนกตามชนิดของรอยร้าว ....	31
ตารางที่ 4.2	ตัวอย่างเงื่อนไขปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าวและข้อเสนอแนะของการรวมรอยร้าว .....	33
ตารางที่ 4.3	แนะนำการเปลี่ยนชนิดของรอยร้าว .....	33
ตารางที่ 4.4	เงื่อนไขในการแทนค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาความเค้นตกค้างที่ผิว .....	37
ตารางที่ 4.5	สัมประสิทธิ์ปรับแก้เพื่อหาความต้านทานการแตกหักค่ากลาง .....	40
ตารางที่ 4.6	ข้อจำกัดการประเมินระดับ 1 .....	43
ตารางที่ 4.7	เงื่อนไขที่ใช้เลือกแผนภาพประเมินระดับ 1 ในโครงสร้างทรงกระบอก .....	44
ตารางที่ 5.1	เปรียบเทียบมุมมองการเข้าถึงระดับข้อมูล .....	61
ตารางที่ 6.1	ภาวะปฏิกิริยาที่ซอฟต์แวร์รองรับ .....	65
ตารางที่ 6.2	ชนิดของการวิเคราะห์ที่ในการประเมินแต่ละระดับ .....	66
ตารางที่ 6.3	ออบเจกต์จากคลาสที่เกี่ยวข้องกับคลาส TMaterial .....	76
ตารางที่ 6.4	ออบเจกต์ที่เกี่ยวข้องกับภาวะ .....	77
ตารางที่ 6.5	สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันประมาณอุณหภูมิอ้างอิงของวัสดุ Carbon Steel .....	80
ตารางที่ 6.6	เงื่อนไขที่ใช้สร้างออบเจกต์ Structure .....	89
ตารางที่ 7.1	ตัวย่อและความหมายที่ใช้ในบท 7 .....	101
ตารางที่ 7.2	เงื่อนไขและผลการตรวจสอบการเลือกแผนภาพการประเมินระดับ 1 .....	103
ตารางที่ 7.3	เงื่อนไขและผลการตรวจสอบการเลือกกลุ่ม screening curve .....	104
ตารางที่ 7.4	เงื่อนไขและผลการตรวจสอบการเลือก screening curve .....	104

ตารางที่ 7.5 ตรวจสอบการคำนวณอุณหภูมิอ้างอิง .....	105
ตารางที่ 7.6 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้ในกรณีต่าง ๆ.....	105
ตารางที่ 7.7 ผลการคำนวณความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้.....	106
ตารางที่ 7.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบการคำนวณตัวประกอบความปลอดภัย .....	108
ตารางที่ 7.9 ผลการคำนวณตัวประกอบความปลอดภัยจากข้อมูลในตารางที่ 7.8 .....	109
ตารางที่ 7.10 ผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างภาระระบุและโปรไฟล์ความเค้น.....	111
ตารางที่ 7.11 ผลการประเมินการคงสภาพเปรียบเทียบการระบุภาระใน CSCLE1.....	114
ตารางที่ 7.12 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้างกรณี CSCCE1.....	116
ตารางที่ 7.13 ผลการประเมินการรื้อก่อนการแตกหักใน CTCC.....	118
ตารางที่ 7.14 ผลการประเมินการคงสภาพตามโจทย์ข้อ 1.....	119
ตารางที่ 7.15 ผลการประเมินการคงสภาพตามโจทย์ข้อ 2.....	121

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คลาสไดอะแกรมที่ออกแบบโดยเนติพันธ์ .....	11
รูปที่ 2.2 คลาสไดอะแกรมที่เพิ่มคลาส Elbow.....	12
รูปที่ 2.3 คลาสไดอะแกรมที่ออกแบบโดยจตุพร .....	13
รูปที่ 3.1 โหมดการเสียรูป .....	16
รูปที่ 3.2 องค์ประกอบความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว .....	17
รูปที่ 3.3 ขนาดของโครงสร้างที่มีรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาวและรับความดัน.....	18
รูปที่ 3.4 ขนาดของโครงสร้างที่มีรอยร้าวผิว วางตัวตามแนวยาวและรับความดัน .....	20
รูปที่ 3.5 ขนาดของโครงสร้างที่มีรอยร้าวผิว วางตัวตามแนวยาวและรับโปรไฟล์ความเค้น.....	21
รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนความเค้นให้อยู่ในรูปผลบวกของ $\sigma_M$ และ $\sigma_B$ .....	21
รูปที่ 3.7 แนวคิดหลักการทับซ้อน เพื่อหาค่าผลเฉลย $K_I$ .....	23
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการใช้หลักการซ้อนทับของโครงสร้าง .....	23
รูปที่ 3.9 บริเวณเสียรูปพลาสติกตามแบบจำลองของ Irwin และ Dugdale.....	24
รูปที่ 3.10 ลักษณะเส้นโค้ง $\Delta a/\Delta N - \Delta K$ ที่พบทั่วไป.....	28
รูปที่ 4.1 การหาความลึกรอยร้าวสมมูล .....	31
รูปที่ 4.2 การหาความยาวรอยร้าวสมมูล.....	32
รูปที่ 4.3 ประเภทของรอยเชื่อม .....	34
รูปที่ 4.4 แนวยรอยเชื่อม.....	34
รูปที่ 4.5 ภาพรวมการหาความเค้นตกค้าง .....	35
รูปที่ 4.6 ความเค้นตกค้างที่ผิวในโครงสร้างท่อในทิศตั้งฉากกับรอยเชื่อม.....	36
รูปที่ 4.7 รูปแบบโปรไฟล์ความเค้นตามแนวยาว .....	38
รูปที่ 4.8 แนวคิดการใช้ค่า $T_{ref}$ ปรับแก้ความต่างของวัสดุ.....	40
รูปที่ 4.9 พฤติกรรมของ Master Curve.....	42

รูปที่ 4.10 ภาพรวมของการประเมินการคงสภาพ .....	43
รูปที่ 4.11 ภาพรวมของการการประเมินการคงสภาพระดับ 1 .....	44
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างแผนภาพสำหรับประเมินสภาพโครงสร้างทรงกระบอกมีรอยเชื่อมตามยาว และมีรอยร้าวขนานกับรอยเชื่อม .....	45
รูปที่ 4.13 เกณฑ์ตัดสินใจเลือก screening curve .....	45
รูปที่ 4.14 เกณฑ์ตัดสินใจเลือกเส้นใน screening curve .....	46
รูปที่ 4.15 แนวคิดการพัฒนาเส้นโค้งความเสียหาย .....	47
รูปที่ 4.16 แผนภาพประเมินความเสียหาย.....	49
รูปที่ 4.17 แผนภาพประเมินความเสียหายระดับ 3B.....	51
รูปที่ 4.18 ตำแหน่งประเมินของรอยร้าวทะลุความหนา .....	53
รูปที่ 4.19 ตำแหน่งประเมินของรอยร้าวผิว.....	54
รูปที่ 4.20 ภาพรวมของการประเมินอายุใช้งานที่เหลือ .....	54
รูปที่ 4.21 ขนาดเริ่มต้นของรอยร้าวทะลุความหนา.....	55
รูปที่ 4.22 ขนาดเริ่มต้นของรอยร้าวผิว .....	55
รูปที่ 4.23 ขนาดใหม่ของรอยร้าวทะลุความหนา .....	56
รูปที่ 4.24 ขนาดใหม่ของรอยร้าวผิว .....	56
รูปที่ 4.25 ความยาวรอยร้าวที่ตรวจพบเท่ากับความยาวรอยร้าวทะลุความหนา .....	57
รูปที่ 4.26 ความยาวรอยร้าวที่สามารถตรวจพบมีค่ามากกว่าความยาวรอยร้าววิกฤติ .....	57
รูปที่ 4.27 ความยาวรอยร้าววิกฤติมีค่ามากกว่าความยาวรอยร้าวที่สามารถตรวจพบ .....	58
รูปที่ 5.1 สัญลักษณ์ของคลาส TStudent.....	60
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการส่งข้อความเรียกใช้พฤติกรรมระหว่างคลาส .....	60
รูปที่ 5.3 ตัวอย่างระดับการมองเห็นรายละเอียดต่าง ๆ เมื่อมองออบเจกต์จากภายใน .....	62
รูปที่ 5.4 ตัวอย่างระดับการมองเห็นรายละเอียดต่าง ๆ เมื่อมองออบเจกต์จากภายนอก .....	62

รูปที่ 5.5 ตัวอย่างแผนภาพจำลองการสืบทอดของคลาส .....	63
รูปที่ 5.6 สัญลักษณ์ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลาสหรือออบเจกต์ .....	64
รูปที่ 5.7 ตัวอย่างหลักการเปลี่ยนรูป .....	64
รูปที่ 6.1 คลาสหลักของโปรแกรม .....	67
รูปที่ 6.2 ลำดับการระบุข้อมูลของโปรแกรม .....	68
รูปที่ 6.3 คลาสเกี่ยวกับการต่อประสานกับผู้ใช้ .....	68
รูปที่ 6.4 แผนภาพคลาส TStructure เมื่อพิจารณาเรื่องรูปร่าง และตำหนิ .....	69
รูปที่ 6.5 แผนภาพปรับคลาส TStructure ที่มีคลาสสืบทอด TPlate .....	69
รูปที่ 6.6 แผนภาพคลาส TStructure เมื่อเพิ่มการพิจารณาเรื่องวัสดุ ภาวะ ตำหนิ และรอยเชื่อม .	70
รูปที่ 6.7 แผนภาพคลาส TMaterial เมื่อพิจารณาประเภทของสมบัติของวัสดุ .....	71
รูปที่ 6.8 แผนภาพคลาส TStressStrain ที่มีคลาสสืบทอด .....	71
รูปที่ 6.9 แผนภาพคลาส TToughness และ TEstimateToughness ที่มีคลาสสืบทอด .....	72
รูปที่ 6.10 แผนภาพคลาส TCrackGrowth ที่มีคลาสสืบทอด .....	72
รูปที่ 6.11 แผนภาพปรับคลาส TCrackGrowth ที่มีคลาสสืบทอด TSCCG .....	73
รูปที่ 6.12 แผนภาพปรับคลาส TCrackGrowth ที่มีคลาสสืบทอด TParis .....	73
รูปที่ 6.13 แผนภาพคลาส TLoad ที่มีคลาสสืบทอด .....	74
รูปที่ 6.14 แผนภาพคลาส TDefect ที่มีคลาสสืบทอด .....	74
รูปที่ 6.15 แผนภาพปรับคลาส TDefect ที่มีคลาสสืบทอด TPitting .....	74
รูปที่ 6.16 สมบัติในคลาส TStructure .....	75
รูปที่ 6.17 สมบัติในคลาส TCylSh .....	76
รูปที่ 6.18 สมบัติและพฤติกรรมในคลาส TCylShCrk .....	77
รูปที่ 6.19 แผนภาพคลาส TAssessment ที่มีคลาสสืบทอด .....	78
รูปที่ 6.20 สมบัติและพฤติกรรมในคลาส TAssessCrack .....	79



รูปที่ 6.21 คลาสไดอะแกรมของโปรแกรม.....	84
รูปที่ 6.22 ออบเจกต์ frmMain ส่วนต่อประสานงานกับผู้ใช้.....	85
รูปที่ 6.23 ตัวเลือกมาตรฐานการออกแบบของออบเจกต์ frmMain .....	86
รูปที่ 6.24 ตัวเลือกกลไกความเสียหายของออบเจกต์ frmMain .....	86
รูปที่ 6.25 ตัวเลือกระดับการประเมินการคงสภาพ และผลสืบเนื่องต่อการวิเคราะห์ประเภทอื่น ได้แก่ LBB และ อายุใช้งานที่เหลือ .....	87
รูปที่ 6.26 ตัวเลือกสำหรับระบุตัวประกอบความปลอดภัยย่อยของออบเจกต์ frmMain.....	87
รูปที่ 6.27 ตัวเลือกสำหรับระบุชนิดของโครงสร้างที่ต้องการประเมินของออบเจกต์ frmMain.....	88
รูปที่ 6.28 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของออบเจกต์ frmCylShCrk.....	90
รูปที่ 6.29 ส่วนระบุขนาดของภาชนะทรงกระบอกของคลาส TfrmCylSh .....	90
รูปที่ 6.30 ส่วนระบุการกักความร้อนของคลาส TfrmCylSh .....	90
รูปที่ 6.31 ส่วนระบุข้อมูลรอยเชื่อมของคลาส TfrmCylSh .....	91
รูปที่ 6.32 ส่วนระบุข้อมูลการออกแบบของคลาส TfrmCylSh.....	91
รูปที่ 6.33 ส่วนระบุข้อมูลการระบุภูมิของคลาส TfrmCylSh .....	92
รูปที่ 6.34 ส่วนระบุข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ของคลาส TfrmCylSh.....	93
รูปที่ 6.35 ส่วนระบุข้อมูลการละลายของคลาส TfrmCylSh .....	93
รูปที่ 6.36 ส่วนระบุผลกระทบการประเมิน และสถานะการโตของรอยร้าวของคลาส TfrmCylSh..	94
รูปที่ 6.37 ส่วนระบุวิธีการตรวจหารอยร้าวของคลาส TfrmCylShCrk.....	94
รูปที่ 6.38 ตำแหน่งของรอยร้าวที่วางตัวบนรอยเชื่อม .....	95
รูปที่ 6.39 ส่วนระบุตำแหน่งและจำนวนรอยร้าวของคลาส TfrmCylShCrk.....	95
รูปที่ 6.40 ส่วนระบุชนิด, แนวการวางตัวของรอยร้าวในคลาส TfrmCylShCrk .....	95
รูปที่ 6.41 ส่วนระบุตำแหน่งของรอยร้าวผิวของคลาส TfrmCylShCrk.....	96
รูปที่ 6.42 ส่วนระบุรอยร้าวที่ตรวจพบได้ของคลาส TfrmCylShCrk.....	96

รูปที่ 6.43 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของออบเจกต์ frmMaterial .....	96
รูปที่ 6.44 ส่วนระบุข้อมูลทั่วไปของวัสดุของคลาส TfrmMaterial.....	97
รูปที่ 6.45 ส่วนระบุสมบัติแรงดึงของคลาส TfrmMaterial .....	98
รูปที่ 6.46 ส่วนระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคลาส TfrmMaterial .....	98
รูปที่ 6.47 ส่วนระบุความต้านทานการแตกหักของการประเมินระดับ 1.....	98
รูปที่ 6.48 ตัวเลือกสำหรับการระบุความต้านทานการแตกหักในการประเมินระดับ 2 และ 3B.....	99
รูปที่ 6.49 ส่วนระบุความต้านทานการแตกหักจากการทดสอบ .....	99
รูปที่ 6.50 ส่วนระบุข้อมูลที่ใช้ประมาณความต้านทานการแตกหักจากเส้นโค้งขอบเขตล่างของ ASME.....	99
รูปที่ 6.51 ส่วนระบุข้อมูลที่ใช้ประมาณความต้านทานการแตกหักจากค่าพลังงานชาร์ปี .....	99
รูปที่ 6.52 ส่วนระบุข้อมูลที่ใช้ประมาณความต้านทานการแตกหักด้วย Master Curve.....	100
รูปที่ 6.53 ส่วนระบุข้อมูลที่ใช้ประมาณการเติบโตของรอยร้าว.....	100
รูปที่ 7.1 ชนิดและทิศการวางตัวของรอยร้าว .....	102
รูปที่ 7.2 แผนภาพ 9.13 และความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้กรณี 1, 2, 4 และ 5 ของตารางที่ 7.6107	
รูปที่ 7.3 แผนภาพ 9.15 และความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้กรณี 3, 6 และ 7 ของตารางที่ 7.6....	107

## 1. บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ภาวะความดันทรงกระบอก เช่น ท่อหรือถัง ถูกใช้สำหรับขนถ่ายและเก็บของไหลในงานอุตสาหกรรม หากภาชนะเหล่านี้เสียหายอาจส่งผลให้การทำงานของระบบต้องหยุดลงหรือเกิดอุบัติเหตุซึ่งนำไปสู่ความสูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน อาทิ กรณีความเสียหายจากการครากทั้งหน้าตัด (collapse) เนื่องจากความบกพร่องของรอยเชื่อมในภาชนะความดันของโรงงานที่รัฐเวอร์จิเนียทำให้สารเคมีจำนวนมากไหลลงสู่ม่าน้ำเอลิซาเบธในปี 2008 [1] กรณีถัดมาคือ ถังความดันสูงของโรงงาน NDK Crystal ที่เสียหายในปี 2009 เนื่องมาจากการแตกร้าวจากความเค้นและการกัดกร่อน (stress corrosion cracking, SCC) จากภายในท่อ มีผู้บาดเจ็บ 1 คน และเสียชีวิต 1 คน [2] กรณีถัดมาในปี 2009 ท่อส่งก๊าซในรัฐฟลอริดาเสียหาย เนื่องจากมีรอยร้าวเนื่องจากสภาพแวดล้อมทำให้มีผู้บาดเจ็บ 3 คน และความเสียหายมูลค่าหลายแสนดอลลาร์สหรัฐ [3] กรณีถัดมา ท่อส่งน้ำมันดิบรั่วที่รัฐอิลลินอยด์ สหรัฐอเมริกา ถูกสันนิษฐานว่ามีสาเหตุมาจากท่อถูกน้ำกัดเซาะ [4] หรือในกรณีถัดมา ความเสียหายที่โรงกลั่น Chevron ในปี 2012 มีสาเหตุมาจากผนังท่อบางลงเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟต (sulfidation corrosion) และแตก ทำให้สารไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) รั่วไหลสู่บรรยากาศ [5] นอกจากความเสียหายที่กล่าวไป ยังมีอุบัติเหตุจำนวนมากซึ่งมีสาเหตุมาจากความเสียหายของภาชนะความดัน [6]

รูปแบบความเสียหายมีหลายประเภท เช่น การแตกหักเปราะ (brittle fracture), การเสียเนื้อโลหะ (metal loss), การผุกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion), การคืบ (creep), ความเสียหายจากเพลิงไหม้ (fire damage) และ รอยร้าว (crack-like flaws) ความเสียหายจากรอยร้าวเป็นหนึ่งในรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นบ่อย [7] เมื่อตรวจพบความเสียหายผู้ที่รับผิดชอบควรทำ Fitness-for-service (FFS) เพื่อพิจารณาว่าควรใช้โครงสร้างต่อ, ซ่อมแซม หรือเปลี่ยนโครงสร้าง เพื่อหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้น

FFS ประกอบไปด้วย การประเมินการคงสภาพของโครงสร้าง (Structural Integrity Assessment) เพื่อประเมินว่าโครงสร้างยังสามารถใช้งานต่อได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ ถ้าผลการประเมินการคงสภาพผ่าน ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินอายุใช้งานที่เหลือ (Remaining life Assessment) เพื่อวางแผนตรวจสอบโครงสร้างให้เหมาะสม และการประเมินการรั่วก่อนแตกหัก (Leak before Break Assessment, LBB) เพื่อพิจารณาว่าขนาดของรอยร้าวที่อัตราการรั่วซึ่งสามารถตรวจพบได้ทำให้เกิดความเสียหายหรือไม่

มาตรฐานการประเมินการคงสภาพมีหลายมาตรฐาน เช่น R6 [8], BS7910 [9], SINTAP [10] , FITNET [11], CVDA-84 [12] และ API 579 [13] เป็นต้น ทุกมาตรฐานใช้แผนภาพประเมินความเสียหาย (Failure Assessment Diagram, FAD) สำหรับประเมินการคงสภาพของโครงสร้างที่มีรอยร้าว [14]

มาตรฐาน API 579 มีความโดดเด่นกว่ามาตรฐานอื่น เช่น รองรับรูปแบบความเสียหายได้หลากหลายกว่ามาตรฐานอื่น [13] สมการที่ใช้คำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวมีขอบเขตใช้งานกว้างกว่ามาตรฐานอื่น [9] และเป็นมาตรฐานที่ใหม่ที่สุดในปัจจุบัน [15]

การใช้มาตรฐาน API 579 ผู้ประเมินต้องทำความเข้าใจเงื่อนไขจำนวนมากในการประเมินการคงสภาพ และต้องมีความรู้เกี่ยวกับกลศาสตร์การแตกหักอีกด้วย หากมีโปรแกรมประเมินการคงสภาพก็จะช่วยลดงานของผู้ประเมิน และลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น

โปรแกรมประเมินการคงสภาพสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์ปัญหานี้มีหลายโปรแกรม เช่น FlawCheck [16], Signal [17], IWM VERB 8.0 [18], Becht [19], ENGFIT [20] และ VINDIO 1.1 [21] เป็นต้น โปรแกรมเหล่านี้ประเมินการคงสภาพอ้างอิงตามมาตรฐาน API 579 แต่มีราคาสูง, โปรแกรมอาจไม่ครอบคลุมโครงสร้างรูปแบบต่าง ๆ และภาระที่ต้องการวิเคราะห์ นอกจากนี้ผู้ใช้ยังไม่สามารถเพิ่มเติมผลเฉลยใหม่ ๆ ได้

อย่างไรก็ดี มีโปรแกรมประเมินการคงสภาพโครงสร้างในเชิงงานวิจัย เช่น โปรแกรมที่พัฒนาโดย H. Kobayashi และ คณะ [22], เนติพันธ์ [23], Chandra [24], จตุพร [25] และ X.J. Zhou และ คณะ [7] โปรแกรมเหล่านี้ ยกเว้นโปรแกรมของ X.J. Zhou และ คณะ ถูกพัฒนาโดยอาศัยแนวคิดเชิงวัตถุ โปรแกรมของจตุพร และ X.J. Zhou และ คณะ อ้างอิงการประเมินจากมาตรฐาน API 579 โปรแกรมของจตุพรสามารถประเมินได้ถึง 3 ระดับ แต่มีข้อจำกัดที่รอยร้าวต้องวางตัวตามแนวยาวเท่านั้น ในขณะที่ โปรแกรมของ X.J. Zhou และ คณะรองรับการประเมินได้เพียง 2 ระดับ และไม่ได้ถูกระบุชนิดของโครงสร้าง และภาระในการประเมินที่รองรับได้

จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่ายังไม่มีโปรแกรมใดที่รองรับประเมินได้ทุกระดับและสามารถประเมินโครงสร้างที่มีรอยร้าวตามแนวยาวและแนวเส้นรอบวงได้ ดังนั้นควรออกแบบโปรแกรมที่เอื้อต่อการเพิ่มชนิดโครงสร้างอื่น ๆ , รองรับความเค้นตกค้าง (residual stress) และความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (thermal gradient), สามารถประเมินการคงสภาพในระดับสูงขึ้น, สามารถประเมินอายุการใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง และประเมินการร้าวก่อนแตกหักได้

แนวคิดที่ใช้เขียนโปรแกรมมี 2 แบบคือ แนวคิดเชิงกระบวนการ (procedural concept) และแนวคิดเชิงวัตถุ (object-oriented concept) แนวคิดเชิงวัตถุมีข้อได้เปรียบกว่าแนวคิดเชิงกระบวนการหลายอย่าง คือสามารถควบคุมการเข้าถึงข้อมูล (encapsulation), มีคุณสมบัติสืบทอด

(inheritance) และหลักการเปลี่ยนรูป (polymorphism) [26] จึงเพิ่มขีดความสามารถได้ง่ายกว่า หากโครงสร้างของโปรแกรมถูกออกแบบอย่างเหมาะสม

ผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นสรุปว่า การออกแบบซอฟต์แวร์มีความจำเป็นและควรออกแบบโครงสร้างให้เอื้อต่อการเพิ่มโครงสร้างอื่น ๆ , การคงสภาพในระดับสูงขึ้น, การประเมินอายุการใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง และการประเมินการรื้อก่อนแตกหักได้ ด้วยแนวคิดเชิงวัตถุ

## 1.2 วัตถุประสงค์

ออกแบบซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพ อายุใช้งานที่เหลือ และประเมินการรื้อก่อนการแตกหักของโครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอกที่มีรอยร้าวด้วยระเบียบวิธี API 579

## 1.3 ขอบเขต

1. โปรแกรมประเมินโครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอกเท่านั้น
2. โปรแกรมรองรับรอยร้าวผิวและรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาวและแนวเส้นรอบวง
3. โปรแกรมรองรับภาระ ความดัน, แรงดึงแนวแกน, โมเมนต์ดัด, โพรไฟล์ความเค้นเนื่องจากภาระทางกล, ความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และความเค้นตกค้าง
4. โปรแกรมสามารถประเมินการคงสภาพ ระดับ 1, 2, 3B ด้วยมาตรฐาน API 579, โปรแกรมสามารถประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง และประเมินการรื้อก่อนแตกหักได้

## 1.4 วิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้ที่เกี่ยวข้อง เช่น กลศาสตร์การแตกหัก, ขั้นตอนการประเมินจากมาตรฐาน API 579 และการออกแบบเชิงวัตถุ
2. แจกแจงข้อมูลที่ต้องระบุ, การใช้ตาราง และกราฟที่เกี่ยวข้องกับการประเมิน
3. ออกแบบโครงสร้างโปรแกรมด้วยแนวคิดเชิงวัตถุและเขียนโปรแกรม
4. ตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์โดยเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม MathCAD

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อโปรแกรม
2. ได้โปรแกรมที่รองรับผลเฉลยใหม่ ๆ ของพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวได้
3. ลดความยุ่งยากในการประเมินการคงสภาพของโครงสร้างทรงกระบอกที่มีรอยร้าว

## 2. การประเมินการคงสภาพ

ในบทนี้จะเปรียบเทียบภาพรวมของมาตรฐานต่าง ๆ ที่ใช้ประเมินการคงสภาพ, ความสามารถโปรแกรมเชิงพาณิชย์ และโปรแกรมเชิงงานวิจัย

### 2.1 มาตรฐานประเมินการคงสภาพ

มาตรฐานการประเมินการคงสภาพที่ตีพิมพ์ออกมาในมีด้วยกันหลายมาตรฐาน

ตารางที่ 2.1 สรุปแนวคิดที่ใช้ประเมินการคงสภาพ ค.ศ.ที่เผยแพร่มาตรฐานฉบับล่าสุด และประเภทของโครงสร้างที่ใช้มาตรฐานได้ รายละเอียดของมาตรฐาน R6, BS7910, FITNET, SINTAP, CVDA-84 และ API579 จะอธิบายในหัวข้อ 2.1.1 - 2.1.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบมาตรฐานการประเมินการคงสภาพที่มีในปัจจุบัน

ชื่อมาตรฐาน	แนวคิดที่ใช้ประเมินการคงสภาพ	ค.ศ.ล่าสุดที่เผยแพร่	ประเภทโครงสร้างที่รองรับ
R6	FAD	2001	Nuclear Component
BS7910	FAD, CTOD	2013	Metal Structures
FITNET	FAD, CDFD	2006	All Component
SINTAP	FAD, CDFD	1999	Metal Structures
CVDA-84	FAD	1985	Non-nuclear Component
API 579	FAD	2016	Petrochemical Structures
HPIS Z101	-	2001	Pressure Equipment
RCC- MR A16	apply J-integral	2002	Nuclear Component
FKM	FAD	2004	Metal Structures
RSE-M	apply J-integral	2010	Nuclear Component
WES 2805	CTOD	2011	Fusion Welded Steels

#### 2.1.1 มาตรฐาน R6

มาตรฐาน R6 (Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects) [27] ถูกพัฒนาในปี ค.ศ. 1976 โดยบริษัท Central Electricity Generating Board (CEGB) ใช้ในการ

ประเมินการคงสภาพโครงสร้างที่ตรวจพบรอยร้าว ในโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ มาตรฐานมีการปรับแก้ครั้งที่ 2 และ 3 ในปี ค.ศ. 1980 และ ค.ศ. 1988 ตามลำดับ ฉบับแก้ไขล่าสุดคือฉบับที่ 4 ถูกตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 2001 และยังคงใช้อยู่จนถึงปัจจุบัน

มาตรฐานนี้ใช้ประเมินกลไกความเสียหายประเภทการแตกหักและความเสียหายจากการล้า แนวคิดการประเมินการคงสภาพใช้แผนภาพ FAD [14] การประเมินแบ่งเป็น 3 ระดับ การประเมินระดับ 1 ใช้เส้นโค้ง FAC ซึ่งไม่ขึ้นกับชนิดวัสดุ, ภาวะที่กระทำ และรูปร่างของโครงสร้าง เส้นโค้ง FAC ได้จากการประมาณค่าขอล่างของเส้นโค้ง FAC ที่ของวัสดุชนิดต่าง ๆ การประเมินระดับ 2 ใช้เส้นโค้ง FAC ที่ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเท่านั้น ไม่ขึ้นกับขนาดรอยร้าว และขนาดโครงสร้าง ในขณะที่การประเมินระดับ 3 ใช้เส้นโค้ง FAC ที่เจาะจงกับชนิดวัสดุ, ขนาดรอยร้าว และชนิดโครงสร้าง

มาตรฐานนี้มักถูกอ้างเพื่อเป็นต้นแบบการประเมินการคงสภาพในมาตรฐานอื่น ๆ [28] เช่น SINTAP, RSE-M และ BS7910 เป็นต้น

### 2.1.2 มาตรฐาน BS7910

มาตรฐาน BS7910 (Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures) [9] ถูกเผยแพร่โดย The British Standard Institute (BSI) ในปี ค.ศ. 2000 ถูกเปลี่ยนชื่อเป็น Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures [29, 30]

BSI ได้เผยแพร่มาตรฐาน PD 6493 สำหรับประเมิน ๆ โครงสร้างที่พบรอยร้าวและถูกใช้งานในอุณหภูมิสูง ปัจจุบัน มาตรฐาน PD 6493 และมาตรฐาน BS 7910 ถูกผนวกเป็น BS 7910 มาตรฐานนี้จึงสามารถใช้งานเชื่อม, การออกแบบและการผลิตโครงสร้างโลหะ โดยใช้ FAD ในการประเมิน [9] มาตรฐานรองรับกลไกความเสียหายจากการแตกหัก, ความล้า, ความคืบ และการกัดกร่อน

### 2.1.3 มาตรฐาน FITNET

FITNET (The European fitness for service network) [11] ใช้ FAD และแผนภาพแรงขับเคลื่อนรอยร้าว (Crack driving force diagram, CDFD) ในการประเมิน มาตรฐานนี้ใช้ในการประเมินการคงสภาพของโครงสร้างโลหะทั้งที่มีหรือไม่มีรอยเชื่อม พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2002 ถึง 2006 กลไกความเสียหายที่ประเมินได้คือ การแตกหัก, ความล้า, ความคืบ และการกัดกร่อน สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบ, ผลิต หรือประเมินโครงสร้างที่ใช้งานอยู่ได้

#### 2.1.4 มาตรฐาน SINTAP

มาตรฐาน SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry) [31] มาตรฐานนี้พัฒนาจากมาตรฐาน R6 และ Engineering Treatment Model (ETM) [10] ในปี ค.ศ.1996 ถึง 1999 มาตรฐานนี้ประเมินโครงสร้างได้หลากหลายชนิด ทั้งโครงสร้างในโรงงานไฟฟ้า, อุตสาหกรรมชายฝั่งและอุตสาหกรรมเคมีในแถบประเทศยุโรป การประเมินการคงสภาพใช้ FAD และ CDFD มาตรฐานนี้พิจารณาผลของความเค้นทุติยภูมิคล้ายกับการประเมินตามมาตรฐาน FITNET [32] ครอบคลุมกลไกความเสียหายจากการแตกหัก, ความล้า (fatigue), ความคืบ (creep) และการกัดกร่อน (corrosion)

#### 2.1.5 มาตรฐาน CVDA-84

CVDA-84 (Chinese Pressure Vessel Defect Assessment) [12] พัฒนาเสร็จในปี ค.ศ. 1985 โดย The Chinese Pressure Vessel Institute (CPVI) ครอบคลุมกลไกความเสียหายจากการแตกหัก, ความล้า แต่ไม่พิจารณาความเสียหายที่เกิดจากความคืบ และการกัดกร่อน ใช้แนวคิดการประเมินการคงสภาพโดยใช้ FAD ที่ถูกพัฒนาจากมาตรฐาน R6 พิจารณาระยะอ้าปากรอยร้าว (Crack Opening displacement, COD) คล้ายมาตรฐาน PD 6493 แต่พัฒนามาตรฐานในแง่มุม p-factor, ความปฏิสัมพันธ์ระหว่าง อิลาสติก-พลาสติก (elastic-plastic interaction), dkiz6dijvo แบบรูเข็ม (pitting) และความล้า

#### 2.1.6 มาตรฐาน API 579

API 579 (The American Petroleum Institute Recommended Practice 579) [13] โดย American Petroleum Institute (API) แบ่งการประเมินการคงสภาพของโครงสร้างเป็น 3 ระดับ การประเมินระดับ 1 ใช้หลักการว่า ถ้าความยาวรอยร้าวที่ตรวจพบสั้นกว่าความยาวรอยร้าวที่ยอมรับ (allowable crack length) จะสรุปว่าโครงสร้างปลอดภัย อย่างไรก็ตาม ถ้าชนิดโครงสร้างและชนิดการระไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่มาตรฐานกำหนด หรือผลการประเมินระดับ 1 ระบุว่าโครงสร้างไม่ปลอดภัยแล้ว มาตรฐานแนะนำให้ประเมินระดับ 2 ต่อไป หากผลการประเมินระดับ 2 ระบุว่าโครงสร้างไม่ปลอดภัยก็ต้องประเมินในระดับ 3 หรือปรับสภาวะการทำงานให้ลดลง แต่ถ้าผลการประเมินการคงสภาพผ่าน ก็สามารถใช้งานโครงสร้างต่อไปได้ การประเมินระดับ 2 และ 3 ระบุสภาพของโครงสร้างที่มีรอยร้าวโดยใช้เส้นโค้งความเสียหาย (Failure Assessment Curve, FAC) ในแผนภาพ FAD มาตรฐาน API 579 ได้เปรียบกว่ามาตรฐานอื่นดังนี้



ข้อได้เปรียบข้อแรกของมาตรฐาน API 579 คือ มาตรฐานนี้ครอบคลุมความเสียหายที่เกิดจากกลไกหลายประเภท เช่น การแตกหักเปราะ (brittle fracture), การเสียนเนื้อโลหะ (metal loss), การผุกร่อนแบบรูเข็ม, การคืบ, ความเสียหายจากเพลิงไหม้ (fire damage) และรอยร้าว (crack-like flaws) มาตรฐานมีข้อมูลประกอบได้แก่ สมการคำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว, ความเค้นอ้างอิง, ความเค้นตกค้าง และ สมบัติวัสดุ เพื่อใช้ในการประเมิน

ข้อได้เปรียบข้อที่ 2 คือ สมการที่ใช้คำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวมีขอบเขตใช้งานกว้างกว่า [9] เช่น กรณีท่อที่มีรอยร้าวรูปครึ่งวงรี รอยร้าววางตัวตามแนวยาว รองรับ crack aspect ratio หรืออัตราส่วนระหว่างความลึกต่อครึ่งความยาวของรอยร้าว ได้กว้างกว่า ตั้งแต่ 0 ถึง 2 และอัตราส่วนความหนาต่อรัศมีใน ตั้งแต่ 0.01 ถึง 1 ในขณะที่มาตรฐาน R6 รองรับอัตราส่วนระหว่างความลึกต่อครึ่งความยาวของรอยร้าวได้ตั้งแต่ 0.2 ถึง 1 และรองรับอัตราส่วนความหนาต่อรัศมีใน ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.22 เท่านั้น

ข้อได้เปรียบข้อที่ 3 คือ มาตรฐาน API 579 แบ่งเนื้อหาออกเป็นหมวดหมู่ เช่น การคำนวณความเค้นตกค้าง, ความเค้นอ้างอิง และข้อมูลวัสดุ นอกจากนี้ยังรวบรวมผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวจากงานเขียนที่ถูกเผยแพร่, มาตรฐาน BS7910 และการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ข้อได้เปรียบสุดท้าย คือ เป็นมาตรฐานที่ทันสมัยที่สุด แก้ไขปรับปรุงเป็นครั้งที่ 3 [15] ในปี 2016 หลังจากที่ดีพิมพ์ครั้งแรกในปี ค.ศ. 2000 และ ฉบับแก้ไขปรับปรุงครั้งที่ 2 ในปี ค.ศ. 2007

จากข้อได้เปรียบที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า มาตรฐาน API 579 มีความโดดเด่นกว่ามาตรฐานอื่น แต่การทำความเข้าใจมาตรฐานนั้นไม่ใช่เรื่องง่ายเพราะขั้นตอนของการประเมินมีรายละเอียดค่อนข้างมาก การใช้โปรแกรมประเมินการคงสภาพโครงสร้างช่วยให้สามารถประเมิน ได้สะดวกขึ้น และยังช่วยลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการคำนวณอีกด้วย โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์ปัญหานี้มีอยู่เป็นจำนวนมาก โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ โปรแกรมเชิงพาณิชย์ และโปรแกรมเชิงงานวิจัยรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อ 2.2 - 2.3

## 2.2 โปรแกรมเชิงพาณิชย์

การใช้โปรแกรมประเมินการคงสภาพโครงสร้างช่วยให้สามารถประเมิน ได้สะดวกขึ้น โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์ปัญหานี้มีอยู่เป็นจำนวนมาก รายละเอียดของโปรแกรมประเมินการคงสภาพ IWM VERB 8.1, Signal FFS 4.2.1 และ VINDIO 1.1 อธิบายในหัวข้อ 2.2.1 - 2.2.4 ตามลำดับ

### 2.2.1 IWM VERB 8.1

Fraunhofer IWM เผยแพร่ ซอฟต์แวร์ IWM VERB 8.1 ในปี ค.ศ. 2016 [33] มีมาตรฐาน BS7910, API 579, R6, SINTAP และ FITNET เป็นแนวทางในการประเมิน ประเมินการคงสภาพของรอยร้าวได้ 3 ระดับ, พิจารณาประเมินการเติบโตของรอยร้าวภายใต้ความล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่และไม่คงที่ได้ แต่ไม่สามารถพิจารณาการเติบโตของรอยร้าวภายใต้ความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน ซอฟต์แวร์รองรับการประเมินการร้าวก่อนแตกหักได้, ซอฟต์แวร์รองรับการประเมินโครงสร้างภาชนะ ความดัน รองรับภาระทางกลในรูปแบบภาระระบุ และโปรไฟล์ความเค้น อย่างไรก็ตามซอฟต์แวร์รองรับความเค้นเนื่องจากความเค้นตกค้างแต่ไม่รองรับความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

### 2.2.2 Signal FFS 4.2.1

Quest Integrity Group เผยแพร่ ซอฟต์แวร์ Signal FFS ซึ่งถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และซอฟต์แวร์รุ่นล่าสุด คือรุ่น Signal FFS 4.2.1 เผยแพร่ในปี ค.ศ. 2016 [34] มีมาตรฐาน BS 7910 และ API 579 เป็นแนวทางในการประเมิน ประเมินการคงสภาพของรอยร้าวได้ 3 ระดับ, ประเมินการเติบโตของรอยร้าวภายใต้ความล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่และไม่คงที่ได้ สามารถพิจารณาการเติบโตของรอยร้าวภายใต้ความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน แต่ซอฟต์แวร์ไม่รองรับการประเมินการร้าวก่อนแตกหัก

ซอฟต์แวร์รองรับการประเมินโครงสร้างภาชนะทรงกระบอกที่มีรอยร้าวผิวและรอยร้าวทะเล ความหนาตามแนวยาวและแนวเส้นรอบวง รองรับภาระทางกลในรูปแบบภาระระบุ และโปรไฟล์ความเค้น อย่างไรก็ตาม ซอฟต์แวร์ไม่รองรับความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิแต่รองรับความเค้นตกค้าง

### 2.2.3 Vindio 1.1

Inesco Ingenieros เผยแพร่ ซอฟต์แวร์ Vindio 1.1 [35] มีมาตรฐาน FITNET และ BS7910 เป็นแนวทางในการประเมิน ประเมินการเติบโตของรอยร้าวภายใต้ความล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่เท่านั้น แต่ไม่สามารถพิจารณาการเติบโตของรอยร้าวภายใต้ความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนและไม่รองรับการประเมินการร้าวก่อนแตกหัก

ซอฟต์แวร์นี้รองรับการประเมินโครงสร้างที่หลากหลาย, รองรับชนิดของรอยร้าวหลายชนิด เช่น รอยร้าวทะเลผิว, รอยร้าวฝัง และรอยร้าวที่ผิวของโครงสร้าง เป็นต้น และรองรับภาระทางกลในรูปแบบภาระระบุ และโปรไฟล์ความเค้น อีกทั้งยังรองรับความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิและความเค้นตกค้าง

นอกจากซอฟต์แวร์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ยังมีอีกหลายซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประเมินการคงสภาพ ตารางที่ 2.2 แสดงข้อเปรียบเทียบของโปรแกรมเชิงพาณิชย์สำหรับประเมินการคงสภาพ ในหัวข้อมาตรฐานที่เป็นแนวทางในการประเมิน และโครงสร้างที่ซอฟต์แวร์ที่สามารถประเมินได้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบของซอฟต์แวร์สำเร็จรูปสำหรับประเมินการคงสภาพ

ซอฟต์แวร์	มาตรฐานการประเมินที่เป็นแนวทาง	โครงสร้างที่สามารถประเมิน
IWM VERB 8.1	BS 7910, API 579, R6, FKM guideline, SINTAP และ FITNET	แผ่นแบน, แผ่นแบนมีรู, ท่อ, เพลลา, ภาชนะทรงกลม เป็นต้น
Signal FFS 4.2.1	BS 7910 และ API 579	ภาชนะความดัน
VINDIO 1.1	FITNET และ BS7910	ภาชนะความดันทรงกระบอกและทรงกลม, แผ่นเรียบ, คาน เป็นต้น
FlawCheck	BS 7608, API 579, BS 7910 และ PRCI NG 18	ภาชนะความดันทรงกระบอก
CrackWISE	BS 7910 และ API 579	ภาชนะความดันทรงกระบอกและทรงกลม, แผ่นเรียบ, คาน เป็นต้น
Becht	API 579	ภาชนะความดันทรงกระบอก
FlawPro	BS 7910	ภาชนะความดันทรงกระบอก
ENGFIT	BS 7608, API 579 และ BS 7910	ภาชนะความดันทรงกระบอก

จากตารางที่ 2.2 ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์สำหรับประเมินการคงสภาพนิยมอ้างอิงมาตรฐาน API 579 เป็นแนวทางในการประเมินแต่การใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ก็มีอุปสรรคดังนี้

- ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการซื้อโปรแกรม
- อาจไม่ครอบคลุมโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์
- ผู้ใช้ไม่สามารถเพิ่มเติมผลเฉลยใหม่ ๆ ได้เอง

อุปสรรคดังกล่าวทำให้การพัฒนาโปรแกรมเป็นหัวข้องานที่จำเป็น

### 2.3 โปรแกรมเชิงงานวิจัย

โปรแกรมประเมินการคงสภาพที่พัฒนาในเชิงงานวิจัยได้แก่ Chandra [24], เนติพันธ์ [23], จตุพร [25], X.J. Zhou และ คณะ [7] และ H. Kobayashi และ คณะ [22]

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบโปรแกรมการประเมินการคงสภาพที่พัฒนาในเชิงงานวิจัย ในหลายแง่มุม เช่น มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง, โครงสร้างและภาระที่โปรแกรมรองรับ และ ระดับการประเมินที่ทำได้ เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบโปรแกรมการประเมินการคงสภาพที่พัฒนาในเชิงงานวิจัย

	H. Kobayashi (ค.ศ.2000)	เนติพันธ์ (ค.ศ.2009)	Chandra (ค.ศ.2011)	จตุพร (ค.ศ.2012)	X.J. Zhou (ค.ศ.2015)
มาตรฐานอ้างอิง	Japanese FFS	R6	ไม่จำเป็นต้องมี	API 579	API 579
ชนิดโครงสร้าง	ท่อ, แผ่นแบน, ช็องอ, ข้อต่อ T	ท่อ	ท่อ, แผ่นแบน	ท่อ	ท่อ
แนวรอยร้าวเทียบแนวแกนท่อ	ไม่จำเป็นต้องมี	ขนาน / ตั้งฉาก	ไม่จำเป็นต้องมี	ขนาน	ขนาน
ความเค้นตกค้างและ ความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ	ไม่จำเป็นต้องมี	ทำไม่ได้	ทำได้	ทำได้	ทำไม่ได้
ระดับการประเมินการคงสภาพ	เทียบเท่า R6 option 1	1, 2	ทำไม่ได้	1, 2, 3B	1, 2
ประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ	ทำได้	ทำได้	ทำได้	ทำได้	ทำไม่ได้

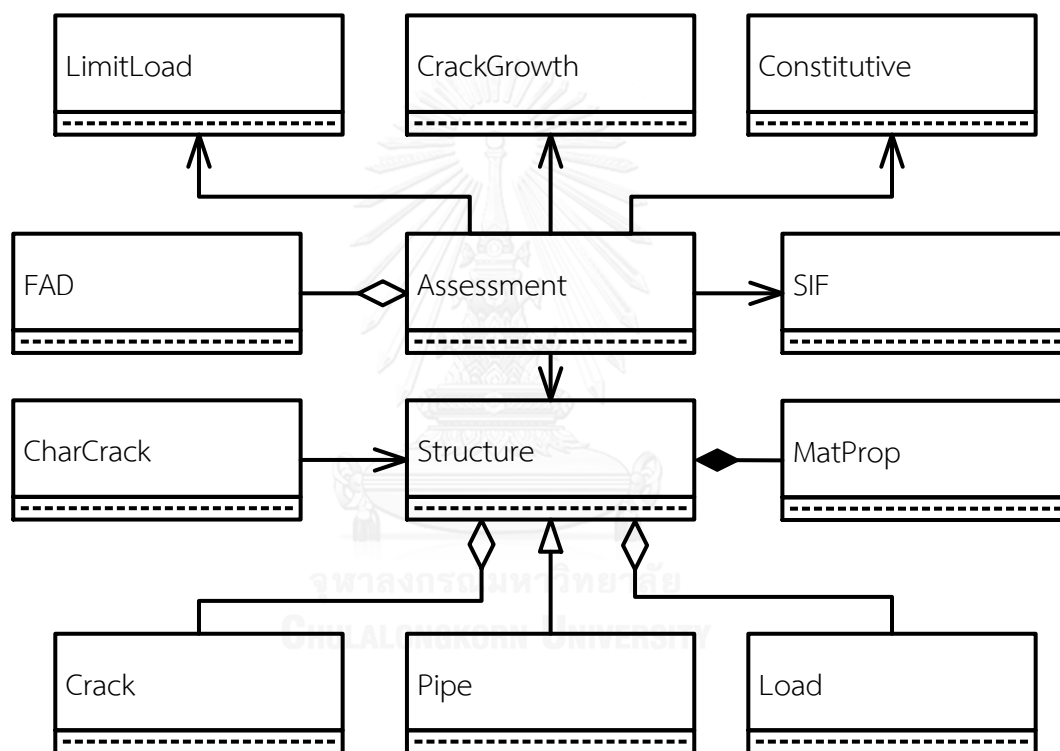
งานวิจัยในประเทศของ เนติพันธ์ ปี ค.ศ.2009 และ จตุพร ปี ค.ศ.2012 อ้างอิงการประเมินตามมาตรฐาน R6 และ API 579 ตามลำดับ ซอฟต์แวร์ทั้งคู่ใช้แนวคิดเชิงวัตถุในการออกแบบโปรแกรม

โปรแกรมของเนติพันธ์ [23] รองรับการประเมินในท่อที่มีรอยร้าวผิววงตัวตามแนวยาวและแนวเส้นรอบวง รองรับการประเมินรอยร้าวมากกว่า 1 รอย, รองรับภาระทางกล ได้แก่ ความดัน, แรง

ดึงแนวแกน และโมเมนต์ดัด แต่ไม่สามารถรองรับความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และความเค้นตกค้างได้

โปรแกรมของเนติพันธ์มีคลาสไดอะแกรม (class diagram) ดัง

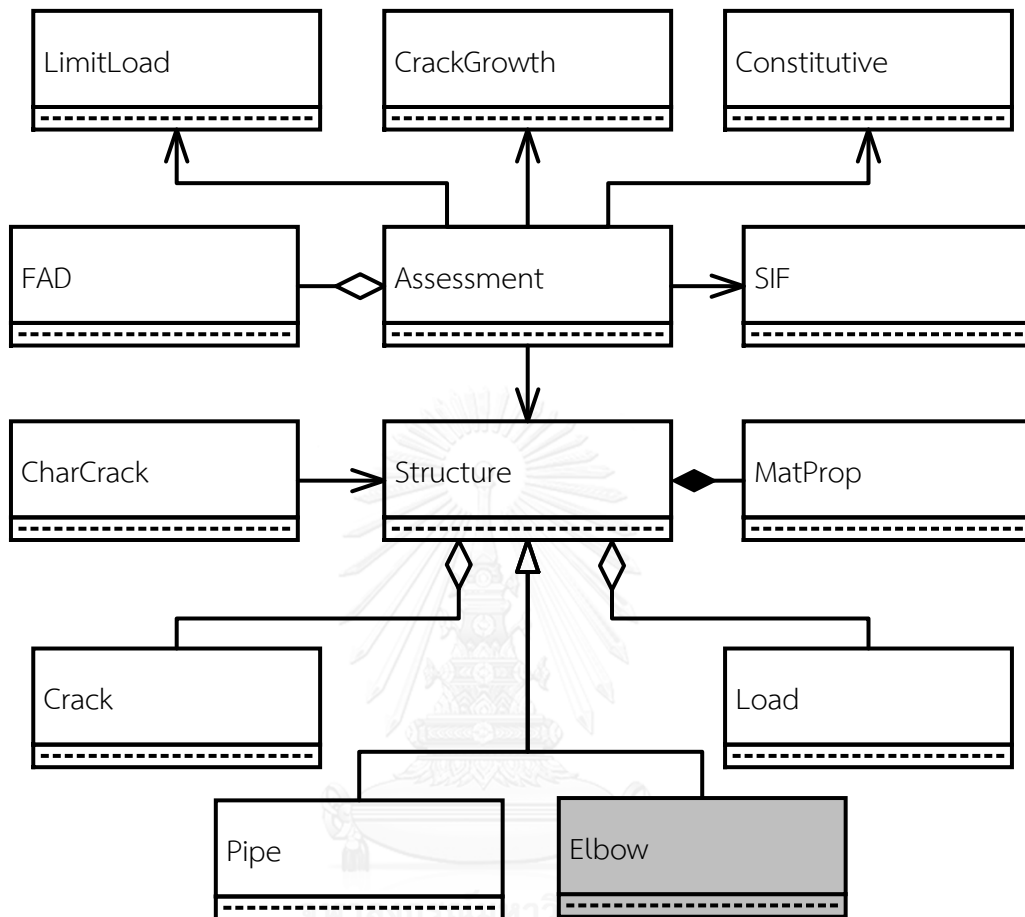
รูปที่ 2.1 คลาส Assessment สร้างวัตถุของคลาสต่าง ๆ เช่น คลาส LimitLoad สำหรับคำนวณภาระสูงสุด, คลาส CrackGrowth สำหรับเก็บค่าอัตราการเติบโตของรอยร้าว, คลาส Constitutive สำหรับคำนวณข้อมูลความเครียดอ้างอิง, คลาส FAD คำนวณเส้นโค้งความเสียหาย, คลาส Structure สำหรับเก็บข้อมูลโครงสร้าง, คลาส Load เก็บข้อมูลภาระ, คลาส Crack เก็บข้อมูลรอยร้าว, คลาส MatProp เก็บข้อมูลสมบัติวัสดุ และคลา SIF คำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว



รูปที่ 2.1 คลาสไดอะแกรมที่ออกแบบโดยเนติพันธ์ [23]

จุดเด่นของโปรแกรม คือสามารถจัดการรอยร้าวได้มากกว่า 1 รอย และจัดการกับรอยร้าวแนวเฉียงเทียบกับแนวแกนของโครงสร้างทรงกระบอก โครงสร้างของโปรแกรมเอื้อต่อการพัฒนาซอฟต์แวร์ให้รองรับโครงสร้างชนิดอื่น ๆ ได้ เช่น หากเพิ่มโครงสร้างช่องอ สามารถใช้การสืบทอดจากคลาส Structure ได้ดังรูปที่ 2.2 และสามารถเพิ่มเติมผลเฉลยค่าพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวที่คลาส SIF อย่างไม่จำกัด คลาสไดอะแกรมของเนติพันธ์ก็มีจุดอ่อนตรงที่ เมื่อพัฒนาซอฟต์แวร์ให้สามารถ

รองรับโครงสร้างชนิดอื่น ๆ ก็จะต้องเพิ่มผลเฉลย  $K$  และผลเฉลย Limit load ที่คลาส SIF และคลาส LimitLoad ซึ่งอยู่แยกกันทำให้ไม่สะดวกและมีโอกาสสร้างความผิดพลาด

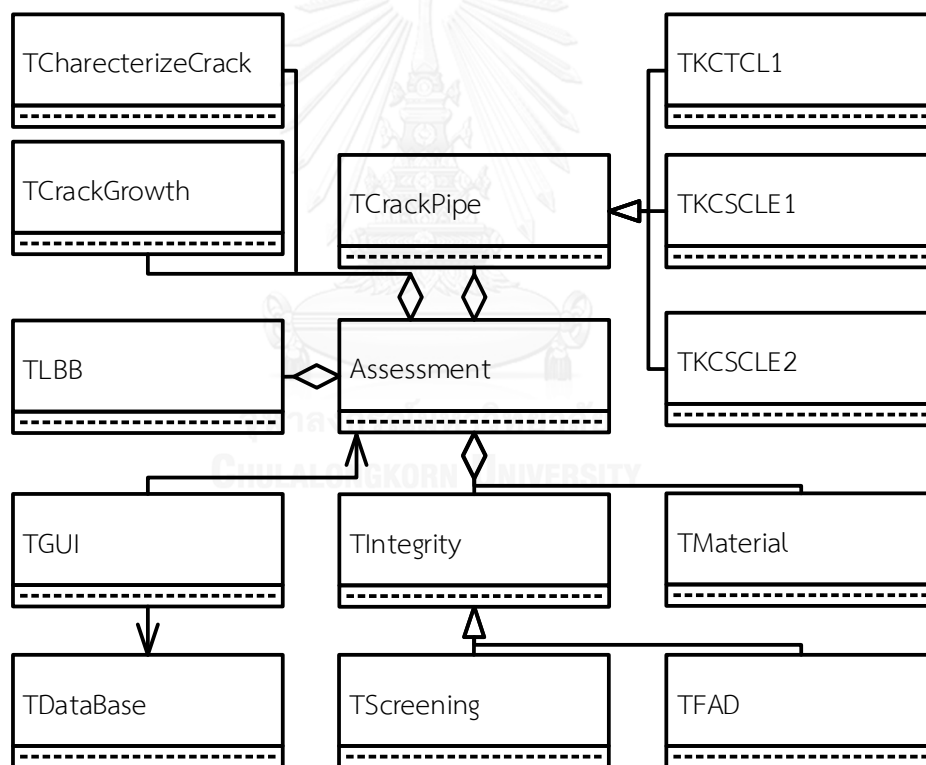


รูปที่ 2.2 คลาสไดอะแกรมที่เพิ่มคลาส Elbow

โปรแกรมของจตุพร [25] อ้างอิงมาตรฐาน API 579 รองรับรอยร้าวทะลุความหนา และรอยร้าวผิว รอยร้าววางตัวตามแนวยาวของท่อ รองรับความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิและความเค้นตกค้าง โปรแกรมของจตุพรมีจุดเด่น คือประเมินการคงสภาพได้ 3 ระดับ คือระดับที่ 1 ประเมินด้วย Screening Curve, ระดับที่ 2 ประเมินด้วย FAD ที่ไม่ขึ้นกับชนิดโครงสร้างและวัสดุ และ ระดับที่ 3 (ทางเลือก B ประเมินด้วยเส้นโค้งความเสียหายที่ขึ้นกับชนิดวัสดุ) โดยหลักการแล้วการประเมินระดับสูงขึ้นความแม่นยำในการประเมินก็จะมากขึ้นด้วย

โปรแกรมของจตุพร มีคลาสไดอะแกรมดังรูปที่ 2.3 การทำงานเริ่มจากผู้ใช้ระบุระดับการประเมินและข้อมูล เช่น ชนิดและมิติโครงสร้าง, ชนิดและมิติของรอยร้าว, ภาระที่โครงสร้างรับ และชนิดวัสดุให้แก่คลาส TGUI ข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งให้คลาส TAssessment คลาสนี้จะสร้างวัตถุจาก

คลาสอื่น ๆ เช่น คลาส TCharacterizeCrack มีหน้าที่ระบุลักษณะรอยร้าว ในขณะที่คลาสลูกของ คลาส TCrackPipe ได้แก่ TKCTCL1, TKCSCLE1 และ TKCSCLE2 มีหน้าที่คำนวณพารามิเตอร์ ปลายรอยร้าว, ความเค้นปฐมภูมิ (primary stress), ความเค้นทุติยภูมิ (secondary stress), ความเค้นอ้างอิง (reference stress) และเก็บข้อมูลโครงสร้าง, คลาสลูกของคลาส TIntegrity ได้แก่ TScreening และ TFAD มีหน้าที่ประเมินการคงสภาพของท่อที่มีรอยร้าวตามระดับการประเมินที่ ระบุ, คลาส TLBB และ TCrackGrowth มีหน้าที่ประเมินการร้าวก่อนการแตกหัก และอายุการใช้งาน ที่เหลือตามลำดับ คลาส TMaterial มีหน้าที่คำนวณความเค้นที่ยอมรับได้, อุณหภูมิอ้างอิงและค่า ขอบล่างของความต้านทานการแตกหัก (lower bound fracture toughness) คลาส TDataBase มี หน้าที่เก็บข้อมูลตัวอย่างวัสดุ เมื่อประเมินเสร็จ คลาส TAssessment จะส่งผลการประเมินกลับไปให้ คลาส TGUI เพื่อแสดงผลการประเมินและโปรแกรมจะทำลายวัตถุที่สร้างระหว่างดำเนินงานเพื่อคืน หน่วยความจำ



รูปที่ 2.3 คลาสไดอะแกรมที่ออกแบบโดยจตุพร [25]

ข้อสังเกตที่พบจากคลาสไดอะแกรมและโค้ดของจตุพร มีรายละเอียดของแต่ละคลาสสรุปได้ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อสังเกตเกี่ยวกับคลาสไดอะแกรมของจตุพร

คลาส	รายละเอียดในคลาสและข้อสังเกต
TGUI	- คลาส TGUI สามารถรองรับการประเมินได้เพียงโครงสร้างทรงกระบอก เท่านั้น ไม่เอื้อต่อการพัฒนาโปรแกรมให้รองรับการประเมินในโครงสร้างแบบอื่น ๆ ซึ่งไม่สอดคล้องกับแนวความคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ [36]
TAssessment	- คลาส TAssessment เป็นศูนย์กลางการทำงานของโปรแกรม มีหน้าที่เรียกใช้งานคลาสอื่น ๆ ตามขั้นตอนการประเมิน ส่งผลให้โค้ดมีจำนวนมาก ไม่สะดวกกับการพัฒนา
TCrackPipe	- คลาส TKCSCLE1, TKCSCLE2 และ TKCTCL1 ใช้คุณสมบัติสืบทอดจากคลาส TCrackPipe และทั้งหมดอยู่ในยูนิต (unit) เดียวกัน ข้อมูลในยูนิตนี้มีมาก





### 3. ความรู้พื้นฐาน

บทนี้จะกล่าวถึงความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินฯ ประกอบด้วย 1) ภาวะที่เกี่ยวข้องกับการประเมินฯ และ 2) เนื้อหาด้านกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่น เช่น องค์ประกอบของกลศาสตร์การแตกหัก, แขนงของกลศาสตร์การแตกหัก, โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว, พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว, ความต้านทานการแตกหัก, สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติบโตของรอยร้าวกับพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว และแผนภาพความเสียหาย

#### 3.1 ภาวะ

ภาวะภายนอกแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ภาวะทางกล และภาวะเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ค่าของภาระอาจอยู่ในรูปแบบภาระระบุ (nominal load) หรือ โปรไฟล์ความเค้น (stress profile) นอกจากนี้โครงสร้างยังอาจรับภาระในรูปแบบของความเค้นตกค้าง ซึ่งมีอยู่ในวัสดุหลังจากการผลิต, การผ่านกระบวนการทางวัสดุ หรือการผ่านการใช้งาน ความเค้นตกค้างเป็นความเค้นที่สมดุลในตัวเอง แรงลัพท์และโมเมนต์ลัพท์ภายในบนหน้าตัดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ P.E.J. Flewitt กล่าวว่า ในความเป็นจริงแทบทุกโครงสร้างมีความเค้นตกค้าง [37], N.O. Larrosa และ R.A. Ainsworth แสดงให้เห็นว่า การไม่พิจารณาความเค้นตกค้างส่งผลกระทบต่อผลการประเมินการคงสภาพ [9]

การประเมินฯ จำเป็นต้องจำแนกชนิดของภาวะและคำนวณความเค้นเนื่องจากภาวะแต่ละชนิด เพราะภาวะแต่ละชนิดทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายของต่างกัน หากพิจารณาตามเกณฑ์ความเสียหายจะแบ่งความเค้นออกเป็น 2 ชนิด คือความเค้นปฐมภูมิ (primary stress) และความเค้นทุติยภูมิ (secondary stress)

ความเค้นปฐมภูมิ คือความเค้นที่เกิดจากภาวะทางกล เช่น ความดัน, แรงดึง, โมเมนต์ดัด และแรงบิด เป็นต้น แรงลัพท์และโมเมนต์ลัพท์บนหน้าตัดจะมีขนาดขึ้นกับขนาดของภาวะ ความเค้นชนิดนี้ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายแบบครากทั้งหน้าตัดและแตกหัก

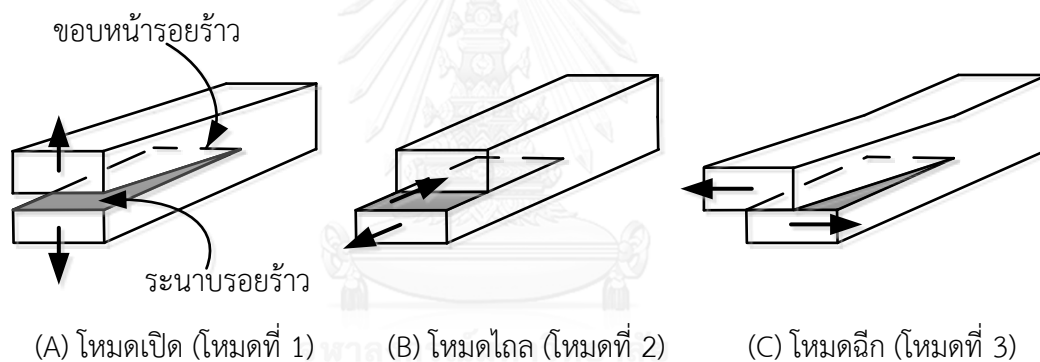
ความเค้นทุติยภูมิ คือความเค้นที่สมดุลในตัวเอง (self-equilibrium) แรงลัพท์และโมเมนต์ลัพท์ภายในบนหน้าตัดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เช่น ความเค้นตกค้างเนื่องจากการเชื่อม และความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ [38] ความเค้นแบบนี้สามารถทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายแบบแตกหัก แต่ไม่ทำให้โครงสร้างเสียหายแบบครากทั้งหน้าตัด

### 3.2 กลศาสตร์การแตกหัก

วิชากลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics) ศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงของวัสดุที่มีรอยร้าว โดยแบ่งเป็น 3 แขนงตามพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุบริเวณปลายรอยร้าว ได้แก่ กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanic, LEFM), กลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติก (Elastic-Plastic Fracture Mechanic, EPFM) และกลศาสตร์การแตกหักที่ขึ้นกับเวลา (Time-Dependent Fracture Mechanic, TDFM)

การเสียรูปที่ปลายรอยร้าวแบ่งได้เป็น 3 โหมด ตามลักษณะการเคลื่อนตัวของผิวรอยร้าว ดังนี้  
 ที่ 1 หรือโหมดเปิด ผิวรอยร้าวจะเคลื่อนที่ตั้งฉากกับระนาบของรอยร้าวดังรูปที่ 3.1 (A) โหมดที่ 1 หรือโหมดไถล ผิวรอยร้าวจะเลื่อนไถลไปบนระนาบรอยร้าวและตั้งฉากกับขอบหน้าของรอยร้าวที่ 3.1 (B) และโหมดที่ 3 หรือโหมดฉีก ดัง (A) โหมดเปิด (โหมดที่ 1) (B) โหมดไถล (โหมดที่ 2) (C) โหมดฉีก (โหมดที่ 3)

รูปที่ 3.1 (C) ผิวรอยร้าวจะเลื่อนไถลไปบนระนาบรอยร้าวและขนานกับขอบหน้ารอยร้าว



รูปที่ 3.1 โหมดการเสียรูป

องค์ประกอบของวิชาแบ่งเป็น 4 ส่วน ตามตัวแปรสำคัญที่ใช้ในกลศาสตร์การแตกหัก คือ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว (crack tip parameter), ความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness), เกณฑ์การแตกหัก (fracture criteria) และสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติบโตของรอยร้าวกับพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว

#### 3.2.1 พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว

พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวแสดงถึงความรุนแรงของรอยร้าวที่มีต่อวัสดุนั้น ๆ ขอบเขตการใช้งานของพารามิเตอร์แต่ละชนิดขึ้นกับพฤติกรรมการเสียรูปบริเวณปลายรอยร้าว พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของ LEFM เรียกว่า ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor),  $K$

พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของ EPFM เรียกว่า  $J$ -อินทิกรัล พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของ TDFM เรียกว่า  $C^*$  พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของการเสียรูปแต่ละโหมด ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ ชนิดและขนาดของภาระที่กระทำ รวมถึงขนาด รูปร่าง ตำแหน่ง และ ลักษณะการวางตัวของรอยร้าว ตัวประกอบความเข้มของความเค้นใช้สัญลักษณ์  $K_I$ ,  $K_{II}$  และ  $K_{III}$  แทนพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวในโหมดที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ สนามความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว (ดัง

รูปที่ 3.2) จะขึ้นกับพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งพารามิเตอร์  $K_I$  มีนิยามดังนี้

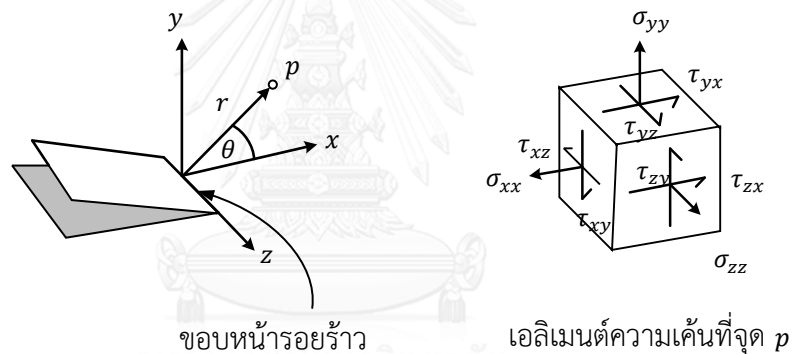
$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} [\sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, \theta^\circ)] \quad (3.1)$$

โดย  $\sigma_{yy}(r, \theta^\circ)$  คือ ความเค้นตั้งฉากกับระนาบรอยร้าว

$r$  คือ ระยะจากปลายรอยร้าวไปยังจุดใด ๆ

$\theta^\circ$  แสดงมุมของปลายรอยร้าวที่ทำกับระนาบรอยร้าว

$y$  คือ ทิศทางตั้งฉากกับระนาบรอยร้าว



รูปที่ 3.2 องค์ประกอบความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว

ผลเฉลย  $K_I$  ถูกนำเสนอในหลายแหล่ง [38] เช่น คู่มือของ Murakami เป็นแหล่งรวมผลเฉลย  $K_I$  จำนวนมากที่สุดในโลก [39] มีจำนวนกว่า 4,500 หน้า, คู่มือของ Tada-Paris และ Irwin ปรับปรุงครั้งที่ 3 ในปี 2000, คู่มือของ Rooke และ Cartwright เป็นคู่มือที่รวมผลเฉลย  $K_I$  ถูกตีพิมพ์ในปี 1974 นอกจากนี้ยังมีผลเฉลย  $K_I$  ที่ถูกสรุปอยู่ในมาตรฐานต่าง ๆ เช่น มาตรฐาน R6, BS7910, API 579, A-16 ฯลฯ

ผลเฉลย  $K_I$  สามารถเขียนได้หลายรูปแบบ เช่น 1) เขียนในรูปของภาระระบุ, 2) เขียนอยู่ในรูปของ influence coefficient และสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันโพลีโนเมียลซึ่งแทนโปรไฟล์ความเค้นตามแนวความหนาของวัตถุ ในที่นี้จะเรียกการคำนวณ  $K_I$  ด้วยวิธีนี้ว่า วิธี influence coefficient, 3) เขียนอยู่ในรูปของความเค้นเชิงเส้น (linearization method), 4) เขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันน้ำหนัก (weight function) และโปรไฟล์ความเค้นที่กระจายบนพื้นผิวรอยร้าว นอกจากนี้ยังมีผลเฉลยที่เขียน

ในรูปแบบอื่นอีก [40] เช่น ผลเฉลยที่เขียนในรูป  $J$ -อินทิกรัล, ผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาตรฐาน API 579 แนะนำวิธีคำนวณทั้ง 4 วิธี แต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังนี้

### 1) ผลเฉลย $K_I$ ในรูปภาวะระบุ

ผลเฉลยอยู่ในรูปภาวะระบุ เช่น ความดัน, แรงดึงแนวแกน, โมเมนต์ดัด ฯลฯ เป็นฟังก์ชันที่เจาะจงกับรูปทรงเรขาคณิตหนึ่ง ๆ โดยเฉพาะ วิธีนี้มีข้อดีคือสามารถหาผลเฉลย  $K_I$  ได้รวดเร็ว

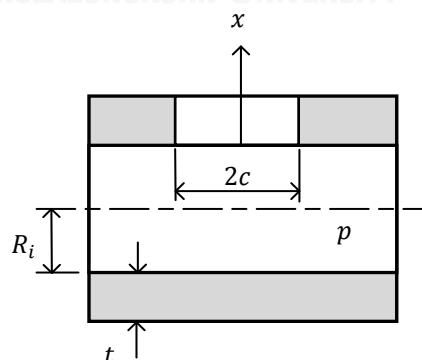
ตัวอย่างผลเฉลย  $K_I$  ของภาชนะความดันทรงกระบอกที่มีรัศมีภายในและภายนอกเท่ากับ  $R_i$  และ  $R_o$  ตามลำดับ มีรอยร้าวทะลุความหนา มีครึ่งความยาว  $c$  วางตัวตามแนวยาว รับความดัน ( $p$ ) (ดังรูปที่ 3.3) ที่มาตรฐาน API 579 ระบุไว้คือ

$$K_I = \frac{pR_o}{t} G_p \sqrt{\pi c} \quad (3.2)$$

$$\text{เมื่อ } G_p = \frac{A_0 + A_1\lambda + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^3}{1 + A_4\lambda + A_5\lambda^2 + A_6\lambda^3} \quad (3.3)$$

$$\lambda = \frac{1.818c}{\sqrt{R_i t}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $A_i$  คือ ค่าคงที่ และ  $i = 0, 1, \dots, 6$  จากตาราง C.6 ค่า  $A_i$  ขึ้นกับอัตราส่วนของความหนาและรัศมีภายในของท่อ ซึ่งในตารางระบุค่าอัตราส่วนดังกล่าว คือ 0.01, 0.01667, 0.05, 0.1, 0.2, 0.33333 และ 1.0 หากต้องการประเมินการคงสภาพเมื่อค่าอัตราส่วนของความหนาและรัศมีภายในของท่ออยู่ระหว่างค่าที่ระบุในตาราง จะต้องหาค่า  $G_{p,u}$  และ  $G_{p,l}$  ซึ่งแทนค่า  $G_p$  ของอัตราส่วนค่าขอบเขตบนและล่างของช่วง ตามลำดับ จากนั้นประมาณในช่วงโดยวิธีในภาคผนวก



รูปที่ 3.3 ขนาดของโครงสร้างที่มีรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาวและรับความดัน

ตัวอย่างผลเฉลย  $K_I$  ของภาชนะความดันทรงกระบอกที่มีรัศมีภายในและภายนอกเท่ากับ  $R_i$  และ  $R_o$  ตามลำดับ มีรอยร้าวผิวด้านในรูปครึ่งวงรีลึก  $a$  และยาว  $2c$  วางตัวตามแนวยาวของท่อ และรับความดัน ( $p$ ) (ดังรูปที่ 3.4) ที่มาตรฐาน API 579 ระบุไว้ คือ

$$K_I = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left( \frac{a}{R_i} \right) \left[ \left( 2G_0 - 2G_1 \left( \frac{a}{R_i} \right) + 3G_2 \left( \frac{a}{R_i} \right)^2 - 4G_3 \left( \frac{a}{R_i} \right)^3 + 5G_4 \left( \frac{a}{R_i} \right)^4 \right) \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6$  (3.6)

$$G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta + A_{2,1}\beta^2 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6 \quad (3.7)$$

$$\beta = \frac{2\phi}{\pi} \quad (3.8)$$

$$Q = \begin{cases} 1.0 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65} & ; \frac{a}{c} \leq 1.0 \\ 1.0 + 1.464 \left( \frac{c}{a} \right)^{1.65} & ; \frac{a}{c} > 1.0 \end{cases} \quad (3.9)$$

ตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าว  $\phi$  เท่ากับ  $\frac{\pi}{2}$

$$G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right) \quad (3.10)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right) \quad (3.11)$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{256}{315} + \frac{1}{5}M_1 + \frac{256}{3465}M_2 + \frac{1}{30}M_3 \right) \quad (3.12)$$

$$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5} \quad (3.13)$$

$$M_2 = 3 \quad (3.14)$$

$$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}} (G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5} \quad (3.15)$$

ตำแหน่งผิวของรอยร้าว  $\phi$  เท่ากับ ศูนย์

$$G_2 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{5} + \frac{2}{3}N_1 + \frac{4}{7}N_2 + \frac{1}{2}N_3 \right) \quad (3.16)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{7} + \frac{1}{2}N_1 + \frac{4}{9}N_2 + \frac{2}{5}N_3 \right) \quad (3.17)$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{9} + \frac{2}{5}N_1 + \frac{4}{11}N_2 + \frac{1}{3}N_3 \right) \quad (3.18)$$

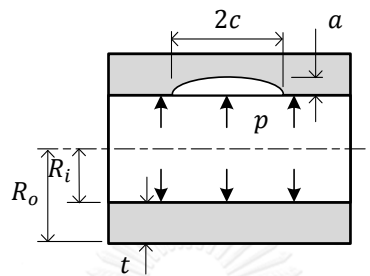
$$N_1 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (2G_0 - 5G_1) - 8 \quad (3.19)$$

$$N_2 = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}} (3G_1 - G_0) + 15 \quad (3.20)$$

$$N_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (3G_0 - 10G_1) - 8 \quad (3.21)$$

เมื่อ  $A_i$  คือ ค่าคงที่ และ  $i = 0, 1, \dots, 6$  จากตาราง C.12 ค่า  $A_i$  ขึ้นกับ 1) อัตราส่วนของความหนาและรัศมีภายในของท่อ, 2) อัตราส่วนระหว่างความลึกต่อครึ่งความยาวของรอยร้าว และ 3) อัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยร้าวต่อความหนาของท่อ หากต้องการประเมินการคงสภาพเมื่อ

ค่าอัตราส่วนต่าง ๆ อยู่ระหว่างค่าที่ระบุในตาราง จะต้องหาค่า  $G_{i,u}$  และ  $G_{i,l}$  ซึ่งแทนค่า  $G_i$  ของอัตราส่วนค่าขอบเขตบนและล่างของช่วง ตามลำดับ จากนั้นประมาณในช่วงโดยวิธีในภาคผนวก



รูปที่ 3.4 ขนาดของโครงสร้างที่มีรอยร้าวผิว วางตัวตามแนวยาวและรับความดัน

2) ผลเฉลย  $K_I$  อยู่ในรูป Influence Method

วิธีนี้เหมาะกับภาวะที่มีลักษณะเป็นโปรไฟล์ความเค้นที่กระทำบนพื้นผิวรอยร้าวตามแนวความหนา มาตรฐาน API 579 แทนโปรไฟล์ดังกล่าวด้วยสมการพหุนามอันดับสี่ ดังสมการ 3.22

$$\sigma\left(\frac{x}{t}\right) = \sigma_0 + \sigma_1\left(\frac{x}{t}\right) + \sigma_2\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \sigma_3\left(\frac{x}{t}\right)^3 + \sigma_4\left(\frac{x}{t}\right)^4 \quad (3.22)$$

เมื่อ  $\sigma_i$  คือ สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับสี่ของการกระจายตัวของความเค้น  
 $x$  คือ ระยะจากผิวโครงสร้าง  
 $t$  คือ ความหนาของโครงสร้าง

มาตรฐานแนะนำผลเฉลย  $K_I$  ในรูป influence coefficient ที่ดังสมการ 3.23

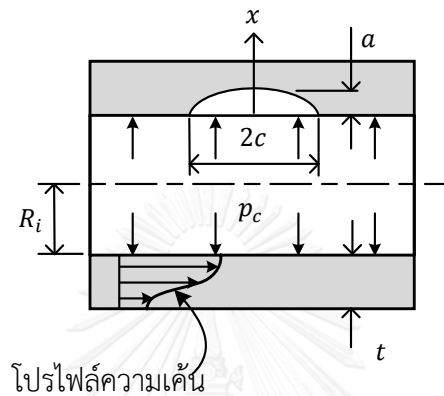
$$K_I = G_0\sigma_0 + G_1\sigma_1\left(\frac{a}{t}\right) + G_2\sigma_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + G_3\sigma_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4\sigma_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (3.23)$$

เมื่อ  $G_i$  คือ influence coefficients มีวิธีการประมาณค่านี้อยู่ในผนวก  
 $a$  คือ ความลึกของรอยร้าว

ตัวอย่างผลเฉลย  $K_I$  ของภาวะความดันทรงกระบอกที่มีรัศมีภายในและภายนอกเท่ากับ  $R_i$  และ  $R_o$  ตามลำดับ รอยร้าวผิวด้านในรูปครึ่งวงรีวางตัวตามแนวยาว ลึก  $a$  และยาว  $2c$  รับความเค้นในรูปโปรไฟล์พหุนามอันดับสี่ มีสัมประสิทธิ์ของสมการคือ  $\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_4$  (ดังรูปที่ 3.5) ที่มาตรฐาน API 579 ระบุไว้คือ

$$K_I = \left[ G_0(\sigma_0 + p_c) + G_1\sigma_1 \left(\frac{a}{R_i}\right) + G_2\sigma_2 \left(\frac{a}{R_i}\right)^2 + G_3\sigma_3 \left(\frac{a}{R_i}\right)^3 + G_4\sigma_4 \left(\frac{a}{R_i}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (3.24)$$

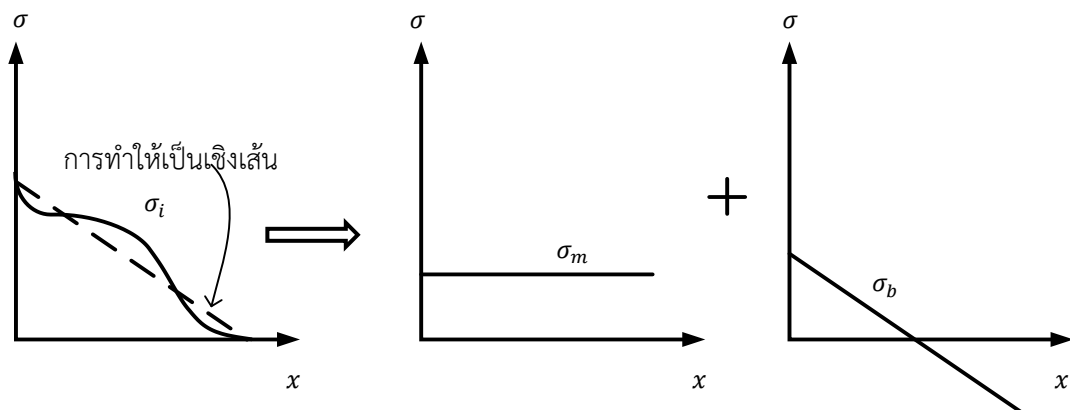
เมื่อ  $p_c$  คือ ความดันหน้าปลายรอยร้าว



รูปที่ 3.5 ขนาดของโครงสร้างที่มีรอยร้าวผิว วางตัวตามแนวยาวและรับโปรไฟล์ความเค้น

3) ผลเฉลย  $K_I$  อยู่ในรูปความเค้นเชิงเส้น

การทำความเค้นให้เป็นเชิงเส้น (stress linearization) คือ การแทนโปรไฟล์ความเค้นที่ซับซ้อนด้วยโปรไฟล์เชิงเส้นที่สมมูลสถิตยกับโปรไฟล์เดิม ความเค้นเชิงเส้นประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ คือ ความเค้นเมมเบรน (membrane stress,  $\sigma_m$ ), ความเค้นดัด (bending stress,  $\sigma_b$ )  
รูปที่ 3.6 แสดงการเปลี่ยนความเค้นให้อยู่ในรูปผลบวกของ  $\sigma_m$  และ  $\sigma_b$



รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนความเค้นให้อยู่ในรูปผลบวกของ  $\sigma_m$  และ  $\sigma_b$

การหาผลเฉลย  $K_I$  ด้วยวิธีนี้ อาจคำนวณได้จากภาวระระบุ หรือ โปรไฟล์ความเค้นก็ได้ ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือได้ผลเฉลยง่ายและรวดเร็ว อีกทั้งยังให้ผลเฉลยเบื้องต้นได้นำพอใจ [41] ผลเฉลย  $K_I$  เป็นฟังก์ชันของ  $\sigma_m$  และ  $\sigma_b$  ดังสมการ 3.25

$$K_I = f(G_i, \sigma_m, \sigma_b) \quad (3.25)$$

เมื่อ  $G_i$  คือ influence coefficients มีวิธีการประมาณค่านี้อยู่ในผนวก หากภาวระอยู่ในรูปโปรไฟล์ความเค้น สามารถหา  $\sigma_m$  และ  $\sigma_b$  จากสมการ 3.26 และ 3.27 ตามลำดับ

$$\sigma_m = \sigma_0 + \frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_2}{3} + \frac{\sigma_3}{4} + \frac{\sigma_4}{5} \quad (3.26)$$

$$\sigma_b = -\frac{\sigma_1}{2} - \frac{\sigma_2}{2} - \frac{9\sigma_3}{20} - \frac{6\sigma_4}{15} \quad (3.27)$$

ตัวอย่างการหาค่า  $K_I$  ของ ภาชนะความดันทรงกระบอก มีรัศมีภายในและภายนอกเท่ากับ  $R_i$  และ  $R_o$  ตามลำดับ มีรอยร้าวผิวด้านใน ลึก  $a$  และยาว  $2c$  วางตัวตั้งฉากแนวแกน รับภาวระระบุ ได้แก่ ความดัน ( $p$ ) และแรงดึงแนวแกน ( $F$ ) สามารถคำนวณ  $\sigma_m$  และ  $\sigma_b$  ได้จากสมการ 3.28 และ 3.29 ตามลำดับ

$$\sigma_m = \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad (3.28)$$

$$\sigma_b = 0.0 \quad (3.29)$$

ผลเฉลย  $K_I$  อยู่ในรูปแบบที่แนะนำตามมาตรฐาน API 579 คือ

$$K_I = [(\sigma_m + p_c)G_0 + \sigma_b(G_0 - 2G_1)]\sqrt{\pi c} \quad (3.30)$$

เมื่อ  $p_c$  คือ ความดันที่กระทำบนหน้ารอยร้าว

ในบางครั้งการใช้ผลเฉลย  $K_I$  ด้วยวิธีข้างต้นก็ไม่เพียงพอ เพราะ การประมาณด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับสี่ หรือการทำความเค้นให้เป็นเชิงเส้น มีความแม่นยำไม่เพียงพอต่อลักษณะการกระจายตัวของความเค้นในโครงสร้างที่มีรูปร่างซับซ้อน ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีอื่นในการหาผลเฉลย  $K_I$

4) ผลเฉลย  $K_I$  อยู่ในรูปฟังก์ชันน้ำหนักร

วิธีหาผลเฉลย  $K_I$  ด้วยฟังก์ชันน้ำหนักร รองรับลักษณะการกระจายตัวของความเค้นในรูปแบบใด ๆ ผลเฉลย  $K_I$  ที่หาด้วยวิธีฟังก์ชันน้ำหนักร คือ

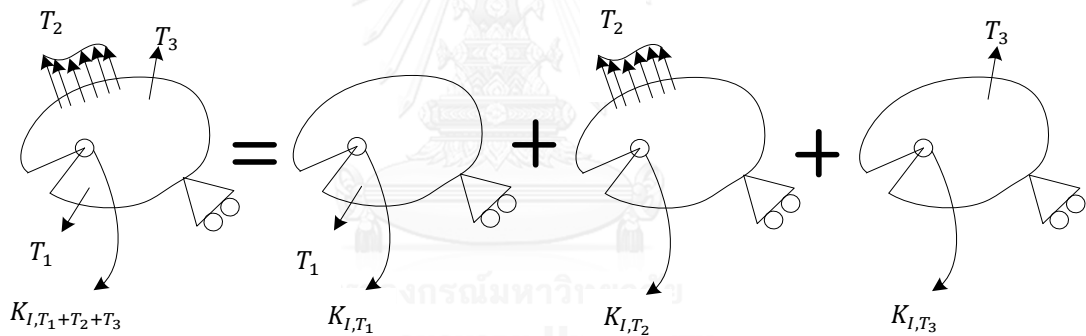
$$K_I = \int_0^a \sigma(x)m(x, a)dx \quad (3.31)$$



เมื่อ  $\sigma(x)$  คือ การกระจายตัวของความเค้นเป็นฟังก์ชันใด ๆ ขึ้นกับตำแหน่งบนวัตถุในทิศทางความหนาของโครงสร้าง  
 $m(x, a)$  คือ ฟังก์ชันน้ำหนัก  
 $a$  คือ ความลึกของรอยร้าว  
 $x$  คือ ระยะจากผิวโครงสร้าง

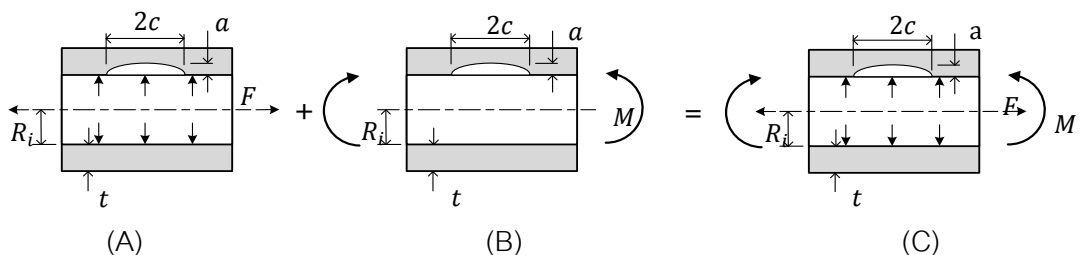
จากเนื้อหาข้างต้น ผลเฉลย  $K_I$  ขึ้นกับโครงสร้าง, ภาระและรอยร้าว ด้วยเหตุนี้ผลเฉลยจึงมีจำนวนไม่จำกัด ผลเฉลย  $K_I$  จากคู่มือจึงไม่ครอบคลุมปัญหาทุกรูปแบบ การประยุกต์หลักการซ้อนทับ (superposition principle) เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้สามารถใช้ผลเฉลยกับปัญหาได้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น หลักการของวิธีนี้คือการแยกปัญหาที่สนใจและยังไม่ทราบผลเฉลย  $K_I$  ออกเป็นปัญหาย่อย ๆ ที่ทราบผลเฉลย  $K_I$  จากนั้นรวมผลเฉลย  $K_I$  ของปัญหาย่อย ๆ เพื่อให้ได้ผลเฉลยของปัญหาที่สนใจดังรูปที่ 3.7

แนวคิดของหลักการซ้อนทับเป็นรากฐานของการหาผลเฉลย  $K_I$  ด้วยวิธีฟังก์ชันของกรีน และวิธี influence coefficient



รูปที่ 3.7 แนวคิดหลักการทับซ้อน เพื่อหาค่าผลเฉลย  $K_I$

ตัวอย่างการใช้การประยุกต์หลักการซ้อนทับของโครงสร้าง ภาชนะความดันทรงกระบอก มีรัศมีภายในและภายนอกเท่ากับ  $R_i$  และ  $R_o$  ตามลำดับ มีรอยร้าวผิวด้านใน ลึก  $a$  และยาว  $2c$  รอยร้าวเป็นรูปครึ่งวงรี วางตัวตั้งฉากแนวแกน รับภาระระบุดัดแก่ ความดัน ( $p$ ) แรงดึงแนวแกน ( $F$ ) และ โมเมนต์ดัด ( $M$ )



## รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการใช้หลักการซ้อนทับของโครงสร้าง

ผลเฉลย  $K_I$  ของปัญหาย่อยจากรูปที่ 3.8 (A), (B) และ (C) แสดงดังสมการ 3.32 - 3.34 ตามลำดับ

$$K_{I,A} = \left[ G_0 \left( \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \right) \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (3.32)$$

$$K_{I,B} = (G_5 \sigma_5) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (3.33)$$

$$K_{I,C} = \left[ G_0 \left( \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \right) + G_5 \sigma_5 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (3.34)$$

เมื่อ  $G_0, G_5$  คือ influence coefficients วิธีการประมาณค่านี้อยู่ในผนวก

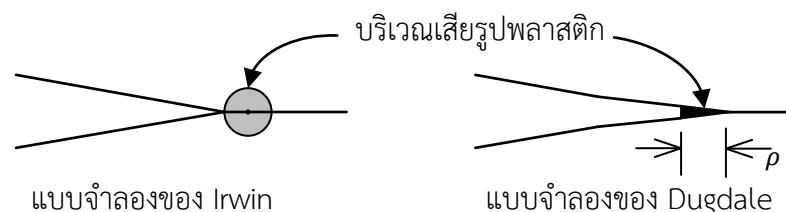
$Q$  คือ ค่าคงตัวขึ้นกับความลึกและความยาวของรอยร้าว (สมการ 3.9)

$\sigma_5$  คือ ความเค้นดัดสูงสุด ได้จากสมการ 3.35

$$\sigma_5 = \frac{MR_o}{0.25\pi(R_o^4 - R_i^4)} \quad (3.35)$$

ในความเป็นจริงบริเวณปลายรอยร้าวจะมีการเสียรูปพลาสติก (plastic zone) หรือบริเวณการคราก (yield zone) หากบริเวณที่มีการเสียรูปแบบพลาสติกใหญ่มากพอจะทำให้การวิเคราะห์ปลายรอยร้าวด้วย LEFM ไม่สมจริง Irwin จึงเสนอให้ชดเชยผลของบริเวณเสียรูปพลาสติกต่อผลเฉลย  $K_I$  ผลเฉลยหลังการปรับแก้ คือ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวอีลาสติก-พลาสติก (elastic-plastic crack tip parameter,  $K_{eff}$ )

การคำนวณขนาดบริเวณเสียรูปพลาสติกมีหลายวิธี แต่จะกล่าวถึงเพียง 2 วิธีเท่านั้น ดังรูปที่ 3.9 คือ ก) แบบจำลองของ Irwin ที่พิจารณาบริเวณเสียรูปพลาสติกเป็นวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่บนระนาบรอยร้าว สามารถใช้ได้กับการแตกหักที่มีการครากขนาดเล็กที่ปลายร้าวรอย (small scale yielding, SSY) และ ข) แบบจำลองของ Dugdale ที่พิจารณาบริเวณเสียรูปพลาสติกเป็นแบบแถบคราก (strip yield) ลักษณะเรียวยาวต่อจากปลายรอยร้าวยาว  $\rho$  พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุเป็นแบบพลาสติกสมบูรณ์ (fully plastic deformation)



### รูปที่ 3.9 บริเวณเสียหายรูปพลาสติกตามแบบจำลองของ Irwin และ Dugdale

การศึกษาวิธีหาผลเฉลย  $K_{eff}$  ของ Dugdale ในปัญหาแผ่นแบนขนาดอนันต์ มีรอยร้าวทะลุ ความหนาตรงกลาง มีความเค้นดึงกระจายสม่ำเสมอ  $\sigma$  ในสถานะความเค้นระนาบ รอยร้าวยาว  $2c$  ได้ผลเฉลย  $K_{eff}$  คือ

$$K_{eff} = \sigma \sqrt{2\pi(c + \rho)} \quad (3.36)$$

โดย

$$\rho = \frac{\pi^2 \sigma^2 c}{8\sigma_y^2} \quad (3.37)$$

$$K_{eff} = \sigma \sqrt{2\pi \left( c + \frac{\pi^2 \sigma^2 c}{8\sigma_y^2} \right)} \quad (3.38)$$

หลังจากปรับแก้ผลเฉลย  $K_I$  เป็น  $K_{eff}$  โดยการคำนึงผลของบริเวณเสียหายรูปพลาสติก ผลเฉลย  $K_{eff}$  ของทั้ง 2 วิธีมีผลใกล้เคียงกัน [42] แต่ผลเฉลยได้กับทฤษฎีความเสียหายแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น และการเสียหายแบบ SSY เท่านั้น ความรู้เกี่ยวกับผลเฉลย  $K_{eff}$  จะถูกนำไปใช้ในหัวข้อ 4.5

### 3.2.2 สมบัติวัสดุ

สมบัติของวัสดุเป็นอีกหนึ่งข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการประเมินการคงสภาพของทุกโครงสร้าง สมบัติของวัสดุแบ่งได้หลายประเภท เช่น สมบัติทางกายภาพ, สมบัติแรงดึง, ความต้านทานการแตกหัก และอัตราการเติบโตของรอยร้าว

#### 3.2.2.1 สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficient of thermal expansion), ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity), ค่าการถ่ายเทความร้อน (thermal diffusivity) และ ความหนาแน่นของวัสดุ (density)

#### 3.2.2.2 สมบัติแรงดึง

สมบัติแรงดึงของวัสดุ เช่น ความเค้นคราก (yield strength,  $\sigma_y$ ), ความเค้นดึงสูงสุด (ultimate tensile strength,  $\sigma_u$ ), ความเค้นไหล (flow-stress,  $\sigma_f$ ), ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus,  $E_y$ ), อัตราส่วนปัวร์ซอง (Poisson's ratio,  $\nu$ ), ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ (stress-strain relation)

ค่า  $\sigma_y$  และ  $\sigma_u$  ของวัสดุสำหรับท่อและแผ่นแบนสามารถหาได้โดยตรงจากการทดสอบ ASTM A370 หรือ ASTM E8 หรืออาจประมาณจากความแข็งแรงครากต่ำสุด (specified minimum yield strength, *SMYS*) และ ความต้านทานแรงดึงต่ำสุด (specified minimum tensile strength, *SMTS*) นอกจากนี้  $\sigma_u$  ยังอาจประมาณได้จากความแข็ง (hardness) [13]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ นิยมเขียนในรูปสมการของ Ramberg-Osgood (สมการ 3.38) ซึ่งมีพารามิเตอร์  $H_{RO}$  และ  $n_{RO}$  เป็นค่าคงที่ในสมการ ค่าทั้งสองหาจากการปรับเส้นกราฟให้เหมาะสม (Curve fitting) กับข้อมูลการทดลอง

$$\varepsilon_{ts} = \frac{\sigma_t}{E_y} + \left(\frac{\sigma_t}{H_{RO}}\right)^{\frac{1}{n_{RO}}} \quad (3.39)$$

เมื่อความเค้นจริง ( $\sigma_t$ ) และความเครียดจริง ( $\varepsilon_{ts}$ ) หาได้จาก

$$\sigma_t = (1 + \varepsilon_{es})\sigma_{es} \quad (3.40)$$

$$\varepsilon_{ts} = \ln(1 + \varepsilon_{es}) \quad (3.41)$$

เมื่อ  $\sigma_{es}$  คือ ความเค้นทางวิศวกรรม

$\varepsilon_{es}$  คือ ความเครียดทางวิศวกรรม

หากผู้ใช้ทราบเพียงโปรไฟล์การกระจายตัวของอุณหภูมิ ( $T_{profile}$ ) เท่านั้น สามารถคำนวณความเค้นเนื่องจากความต่างของอุณหภูมิโดยใช้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน, ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และโปรไฟล์การกระจายตัวของอุณหภูมิ ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงเนื่องจากอุณหภูมิ ( $P_T$ ) คำนวณดังสมการ

$$P_T = \frac{\alpha E_y}{(1-\nu)(x+R_i)^2} \left[ \frac{(x+R_i)^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \int_0^t T_{profile}(x)(x+R_i)dx + \int_0^x T_{profile}(x)(x+R_i)dx - T_{profile}(x)(x+R_i)^2 \right] \quad (3.42)$$

### 3.2.2.3 ความต้านทานการแตกหัก

ความต้านทานการแตกหัก คือความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเติบโตของรอยร้าวจากที่มีอยู่เดิม ความต้านทานการแตกหักขึ้นกับอุณหภูมิ การเปรียบเทียบความต้านทานการแตกหักกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเป็นแนวคิดหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ในวิชากลศาสตร์การแตกหัก [43] ความต้านทานการแตกหักของ LEFM คือค่าวิกฤติของพารามิเตอร์  $K_I$  (critical fracture mechanic parameter,  $K_c$ )

การเสียรูปโหมดที่ 1 มีแนวโน้มรุนแรงกว่าโหมดอื่น [44] อีกทั้งในสถานะความเครียดระนาบ ความต้านทานการแตกหักจะมีค่าต่ำสุด หากใช้ความต้านทานการแตกหักที่สถานะนี้ การคำนวณจะมีแนวโน้มไปในทางปลอดภัย ในการพิจารณาการแตกหักจึงใช้ค่าวิกฤติของพารามิเตอร์  $K_I$  ของการเสียรูปโหมดที่ 1 หรือ ค่า Initiation fracture criteria ( $K_{Ic}$ ) [45] เป็นเกณฑ์ เมื่อค่า  $K_I$  เท่ากับ  $K_{Ic}$  รอยร้าวจะเริ่มโตขึ้นจากเดิมที่มีอยู่ เราสามารถทำนายการแตกหักได้จากสมการ 3.44

$$K_I = K_{Ic} \quad (3.43)$$

ขั้นตอนการทดสอบหา  $K_{Ic}$  สามารถศึกษาได้จากมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM), มาตรฐานของ British Standards institute (BSI) หรือ มาตรฐานของ International Organization for Standardization (ISO) [44] อย่างไรก็ตาม ค่า  $K_{Ic}$  อาจประมาณได้หลายวิธี [46] เช่น การประมาณจากเส้นโค้งขอบเขตล่างของ ASME, การประมาณจากค่าชาร์ปี (Charpy-V notch data) และการประมาณโดยใช้ Master Curve เป็นต้น

#### 3.2.2.4 อัตราการเติบโตของรอยร้าว

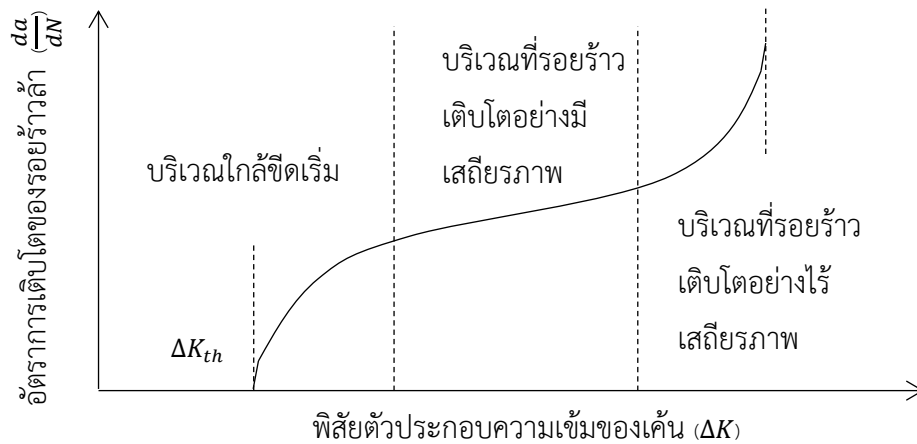
การเติบโตของรอยร้าวเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความล้า, ความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน, การคืบที่อุณหภูมิสูง ความเสียหายที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการล้า [47] การล้า คือ การเสื่อมสภาพเมื่อวัฏจักรภาระที่เปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร (cyclic loading) จนวัฏจักรเสียหายในที่สุด การล้าเกิดขึ้นได้แม้ระดับความเค้นวงรอบที่กระทำอาจต่ำกว่า  $\sigma_y$  หรือต่ำกว่า  $\sigma_u$  รอยร้าวจะเกิดขึ้น และเติบโตเมื่อจำนวนรอบของภาระเพิ่มขึ้น

พฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวล้า ในที่นี้หมายถึง อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า (fatigue crack growth rate,  $da/dN$ ) ซึ่งพบว่าสัมพันธ์กับพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor range,  $\Delta K$ )

ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น คือ ผลต่างของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสูงสุดหรือ  $K_{max}$  ซึ่งเกิดจากภาระสูงสุด และค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นต่ำสุดหรือ  $K_{min}$  ซึ่งเกิดจากภาระต่ำสุดตามสมการ 3.44

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (3.44)$$

เมื่อพล็อตกราฟ  $da/dN - \Delta K$  จะได้กราฟลักษณะดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลักษณะเส้นโค้ง  $da/dN - \Delta K$  ที่พบทั่วไป

บริเวณแรกในรูปที่ 3.10 คือบริเวณใกล้ขีดเริ่ม รอยร้าวขยายขนาดช้ามากหรือแทบจะไม่ขยายตัวเลย พารามิเตอร์สำคัญในบริเวณนี้คือพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นขีดเริ่ม (threshold value of stress intensity factor,  $\Delta K_{th}$ ) ซึ่งหมายถึง  $\Delta K$  สูงสุดที่ไม่ทำให้รอยร้าวเติบโต (ประมาณ  $10^{-7} \text{ mm} / \text{รอบภาระ}$ )

บริเวณที่สองในรูปที่ 3.10 คือบริเวณที่รอยร้าวเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ เส้นกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงบนสเกล ล็อก-ล็อก

บริเวณสุดท้ายในรูปที่ 3.10 คือบริเวณที่รอยร้าวเติบโตอย่างรวดเร็วเสถียรภาพ อัตราการขยายตัวของรอยร้าวมากกว่า  $0.01 \text{ mm} / \text{รอบภาระ}$

ใน LEFM มักเขียนสหสัมพันธ์ ในรูปที่ 3.10 เป็นฟังก์ชันของ  $\Delta K$  ดังสมการ 3.45

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (3.45)$$

ตัวอย่างสมการ 3.46 ได้แก่ สมการของ Paris ซึ่งใช้ได้กับบริเวณที่สอง แสดงดังสมการ 3.46 เมื่อ  $C$  และ  $m$  คือค่าคงที่จากการทดลอง

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (3.46)$$

หรือสมการของ Walker ใช้ในบริเวณที่สอง แต่รวมผลของอัตราส่วนภาระด้วย (ดังสมการ 3.47) ใช้เมื่ออัตราส่วนระหว่างภาระต่ำสุดต่อภาระสูงสุด ( $R$ ) มีค่ามากกว่าศูนย์

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \frac{\Delta K}{(1-R)^\gamma} \right]^m \quad (3.47)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ ค่าคงที่จากการทดลอง

อย่างไรก็ตามมีผู้เสนอสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าอีกหลายคน เช่น Foreman, Klesnil-Lukas, Saxena และ Collipriest [48-50] สมการดังกล่าวมีรูปแบบต่างกันขึ้นกับบริเวณใช้งาน แต่หลักการคำนวณอายุการเติบโตของรอยร้าวล้าจากสมการเหล่านี้ไม่แตกต่างกัน

อัตราการเติบโตของรอยร้าวใช้สำหรับคำนวณอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้างที่ผ่านการประเมินการคงสภาพ การทราบอายุใช้งานที่เหลือช่วยให้สามารถจัดกำหนดการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม อายุการเติบโตของรอยร้าวจากขนาดเริ่มต้น ( $a_i$ ) จนถึงขนาดสิ้นสุด ( $a_f$ ) ได้โดยการอินทิเกรตสมการ 3.48 ซึ่งจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\int_0^{N_p} dN = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{f(\Delta K)} da \quad (3.48)$$

เมื่อ  $N_p$  คือ อายุการเติบโตของรอยร้าวล้า



#### 4. การประเมินการคงสภาพของโครงสร้างที่มีรอยร้าวตามมาตรฐาน API 579

ในบทนี้จะสรุปรายละเอียดสำคัญของมาตรฐาน API 579 ประกอบด้วย ขั้นตอนการประเมินการคงสภาพ, ขั้นตอนการประเมินอายุใช้งานที่เหลือ และขั้นตอนการประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก การประเมินการคงสภาพจำเป็นต้องใช้ข้อมูลรอยร้าวซึ่งผ่านการระบุลักษณะรอยร้าวแล้ว, ข้อมูลการะซึ่งรวมถึงความเค้นตกค้างโดยวิธีการที่ใช้คำนวณความเค้นตกค้าง หลังจากจัดการข้อมูลแล้วจึงเริ่มทำการประเมินการคงสภาพ

##### 4.1 การระบุลักษณะรอยร้าว

รอยร้าวที่พบในโครงสร้าง อาจมีจำนวนรอยร้าวมากกว่าหนึ่งรอยอยู่ใกล้กัน หรือมีขอบหน้าของรอยร้าวไม่เป็นรูปเรขาคณิตพื้นฐาน เช่น เส้นตรงหรือเส้นโค้ง กรณีเหล่านี้ทำให้ไม่มีผลเฉลย  $K$  จากการสำรวจพบว่าการประเมินการคงสภาพทุกมาตรฐานต้องมีการระบุลักษณะของรอยร้าวก่อนทำการประเมินการคงสภาพของรอยร้าวเสมอ

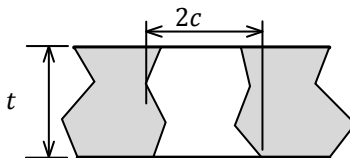
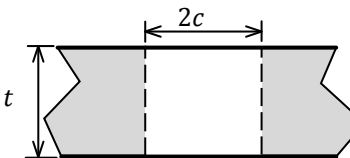
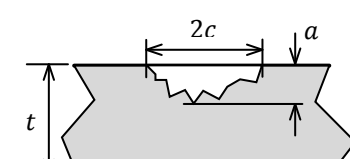
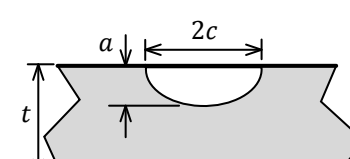
การระบุลักษณะรอยร้าวที่มาตรฐานแนะนำ ประกอบด้วย การระบุลักษณะของรอยร้าวอุดมคติ (flaw idealization), การเปลี่ยนแนวการวางตัวของรอยร้าว, การพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าว (crack interaction) และการเปลี่ยนชนิดรอยร้าว (crack re-characterization)

##### 4.1.1 การระบุลักษณะรอยร้าวอุดมคติ

สิ่งที่ทำคือการล้อมรอบรูปร่างจริงของขอบหน้ารอยร้าวด้วยรูปร่างอุดมคติ ขนาดของรอยร้าวอุดมคติจึงใหญ่กว่ารอยร้าวจริง ผลการประเมินฯ จึงมีแนวโน้มปลอดภัยมากขึ้น การล้อมกรอบขอบหน้ารอยร้าวด้วยรูปครึ่งวงรี และรูปวงรี ในรอยร้าวทะลุความหนาและรอยร้าวฝัง ตามลำดับ เป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับและถูกจำลองในการคำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวที่ได้รับความนิยมมาก [41] มาตรฐาน API 579 แนะนำการระบุลักษณะรอยร้าวอุดมคติตามตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบรอยร้าวที่พบกับรอยร้าวในอุดมคติจำแนกตามชนิดของรอยร้าว

ชนิดรอยร้าว	รอยร้าวที่พบ	รอยร้าวอุดมคติ
รอยร้าวทะลุความหนา		
รอยร้าวผิว		

#### 4.1.2 การเปลี่ยนแนวการวางตัวของรอยร้าว

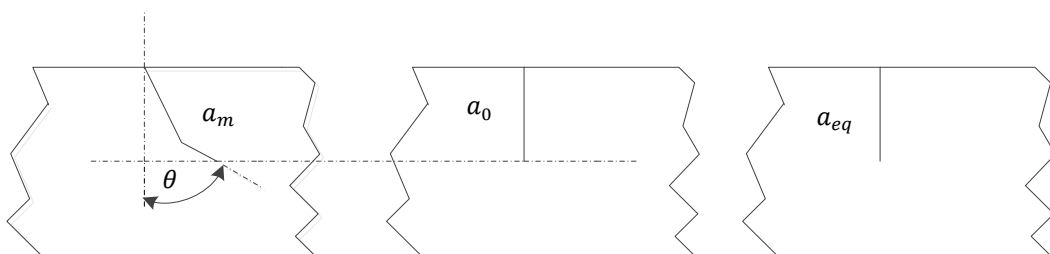
สิ่งที่ทำคือการเปลี่ยนวางตัวของรอยร้าวเฉียงให้อยู่ในลักษณะการเสีรูปร่างหน้าปลายรอยร้าวเป็นโหมดที่ 1 เพราะมีผลเฉลย  $K$  รองรับมากที่สุด

มาตรฐาน API RP 579 แนะนำให้เปลี่ยนแนวการวางตัวของรอยร้าวไปตั้งฉากกับทิศของความเค้นหลัก ความลึกและความยาวของรอยร้าวที่เปลี่ยนแนวแล้ว จะเรียกว่าความลึกรอยร้าวสมมูล (equivalent crack depth,  $a_{eq}$ ) และความยาวรอยร้าวสมมูล (equivalent crack length,  $2c_{eq}$ ) ความลึกรอยร้าวสมมูล คำนวณตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 หาความลึกบนระนาบหลัก ( $a_0$ ) ตามสมการ 4.1

$$a_0 = a_m \cos \theta \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\theta$  คือมุมเอียง [องศา]  
 $a_m$  คือความลึกรอยร้าวดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การหาความลึกรอยร้าวสมมูล

ขั้นที่ 2 หาตัวประกอบความลึก ( $W$ ) ตามสมการ 4.2

$$W = \max[W_\theta, 1] \quad (4.2)$$

เมื่อ  $W_\theta = \sum_{i=0}^7 W_i \theta^i$  (4.3)

$$\begin{aligned} W_0 &= 0.9999 & W_1 &= 1.0481 \times 10^{-5} \\ W_2 &= 1.5471 \times 10^{-4} & W_3 &= 3.4141 \times 10^{-5} \\ W_4 &= -2.0688 \times 10^{-6} & W_5 &= 4.4977 \times 10^{-8} \\ W_6 &= 4.5751 \times 10^{-10} & W_7 &= 1.8220 \times 10^{-12} \end{aligned}$$

ขั้นที่ 3 คำนวณความถี่รอยร้าวสมมูล ( $a_{eq}$ ) ตามสมการ 4.4

$$a_{eq} = a_0 W \quad (4.4)$$

รูปที่ 4.2

ขั้นที่ 1 หาอัตราส่วนความเค้นหลัก (biaxial ratio,  $B$ ) ตามสมการ 4.5

$$B = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $0 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$

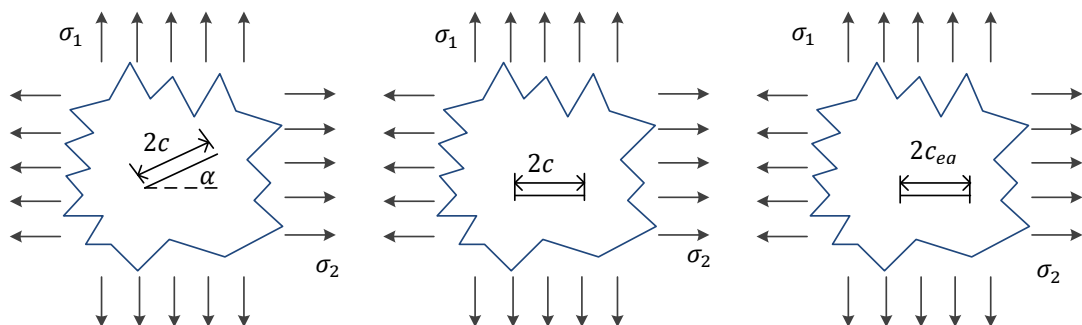
ขั้นที่ 2 หาความยาวรอยร้าวสมมูล  $2c_{eq}$  ตามสมการ 4.6 หรือ 4.7

เมื่อ  $\alpha \leq 45^\circ$  ใช้สมการ 4.6 และให้รอยร้าวอยู่บนระนาบ  $\sigma_1$

$$\frac{c_{eq}}{c} = \cos^2 \alpha + \frac{(1-B) \sin \alpha \cos \alpha}{2} + B^2 \sin^2 \alpha \quad (4.6)$$

เมื่อ  $\alpha > 45^\circ$  ใช้สมการ 4.7 และให้รอยร้าวอยู่บนระนาบ  $\sigma_2$

$$\frac{c_{eq}}{c} = \frac{\cos^2 \alpha}{B^2} + \frac{(1-B) \sin \alpha \cos \alpha}{2B^2} + \sin^2 \alpha \quad (4.7)$$



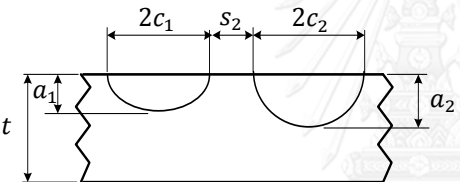
## รูปที่ 4.2 การหาความยาวรอยร้าวสมมูล

### 4.1.3 การพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าว

เมื่อรอยร้าวตั้งแต่ 2 รอยขึ้นไปอยู่ใกล้กัน สันนามความเค้น ณ ปลายรอยร้าวหนึ่งจะได้รับผลกระทบจากปลายรอยร้าวอีกรอย [22] ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าว

มาตรฐาน API 579 แนะนำว่า หากรอยร้าวไม่มีปฏิสัมพันธ์กัน ให้พิจารณารอยร้าวแต่ละรอยแยกจากกัน แต่ถ้ามีปฏิสัมพันธ์กันควรรวมเป็นรอยร้าวเดียว ซึ่งมีแนวโน้มทำให้การประเมินปลอดภัยขึ้น การคิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าวมีเงื่อนไขและรูปแบบของรอยร้าวแสดงในตารางที่ 4.2

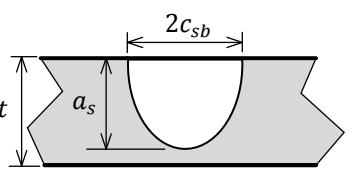
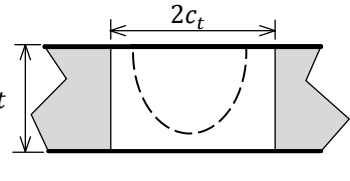
ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างเงื่อนไขปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าวและข้อแนะนำของการรวมรอยร้าว

รอยร้าวก่อนพิจารณา	เงื่อนไขปฏิสัมพันธ์	รอยร้าวที่รวมแล้ว
	$c_1 + c_2 \geq s_2$	เป็นรอยร้าวรูปครึ่งวงรี: $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_2$ $a = \max[a_1, a_2]$

### 4.1.4 การเปลี่ยนชนิดของรอยร้าว

เนื่องจากผลเฉลย  $K$  ที่มาตรฐานเตรียมไว้มีขอบเขตการใช้งานถึงความยาวของส่วนที่ยังไม่แตกหักบนระนาบรอยร้าว (uncrack ligament) มากกว่าหรือเท่ากับ 20% นอกจากนี้ผลเฉลยภาระขีดจำกัดกรณีส่วนที่เหลือนบนระนาบรอยร้าวเหลือน้อยกว่า 20% ก็มักจะให้ผลลัพธ์ปลอดภัยเกินไป มาตรฐานจึงแนะนำให้เปลี่ยนชนิดรอยร้าว ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แนะนำการเปลี่ยนชนิดของรอยร้าว

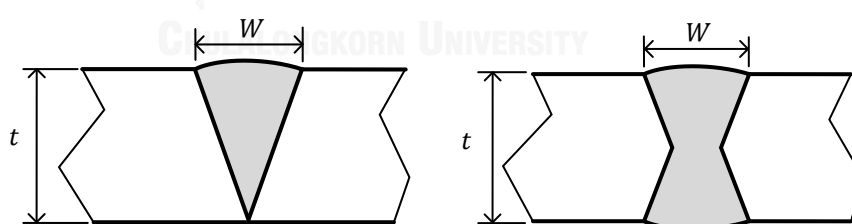
รอยร้าวที่พบจริง	รอยร้าวหลังเปลี่ยนชนิด
 <p>เงื่อนไข : <math>\frac{a_s}{t} &gt; 0.8</math></p>	 <p>มิติหลังระบุ : <math>2c_t = 2c_{sb} + 2(t - a_s)</math></p>

อย่างไรก็ตาม คำแนะนำดังกล่าว แนะนำโดยมาตรฐาน API 579 เท่านั้น ยังมีอีกหลายมาตรฐานที่พิจารณาผลของการเปลี่ยนชนิดของรอยร้าว เช่น R6, BS7910, FITNET, FKM, RSE-M, HPIS Z101, A16, WES 2805 แต่ละมาตรฐานมีเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงชนิดของรอยร้าวต่างกัน ซึ่งไม่มีค่ากำหนดแน่นอนตายตัว อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงชนิดของรอยร้าวมักเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนขนาดของรอยร้าว [42]

#### 4.2 โพรไฟล์ความเค้นตกค้าง

ความเค้นตกค้างเป็นอีกส่วนสำคัญที่มีผลกับการประเมินการคงสภาพ [9] มาตรฐาน API 579 แนะนำว่าโพรไฟล์ความเค้นตกค้างมี 2 ส่วน คือ โพรไฟล์ความเค้นตกค้างที่ผิว (surface residual stress distribute) และ โพรไฟล์ความเค้นตกค้างตามแนวความหนา (through-thickness residual stress distribute) ทิศทางของโพรไฟล์ความเค้นทั้งสองจะอยู่ในทิศที่มีผลต่อความเสียหายของรอยร้าวในโหมด 1 เท่านั้น

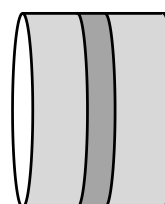
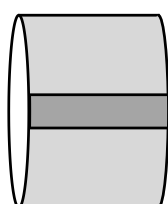
ความเค้นตกค้าง คือ ความเค้นที่มีอยู่ในวัสดุหรือโครงสร้างหลังจากการผลิต, การผ่านกระบวนการทางวัสดุ มาตรฐาน API 579 แนะนำว่าขนาดของโพรไฟล์ความเค้นตกค้างจะขึ้นกับขนาดของรอยเชื่อม ( $W$ ), ประเภทของรอยเชื่อม (เป็นแบบ single V-groove weld ดังรูปที่ 4.3 ตารางที่ 4.3 (A) หรือ แบบ double V-groove weld ดังรูปที่ 4.3 (B)), แนวรอยเชื่อม (เป็นแบบ seam weld หรือ girth weld) และ รอยเชื่อมผ่านกรรมวิธี Post Weld Heat Treatment หรือไม่ เป็นต้น

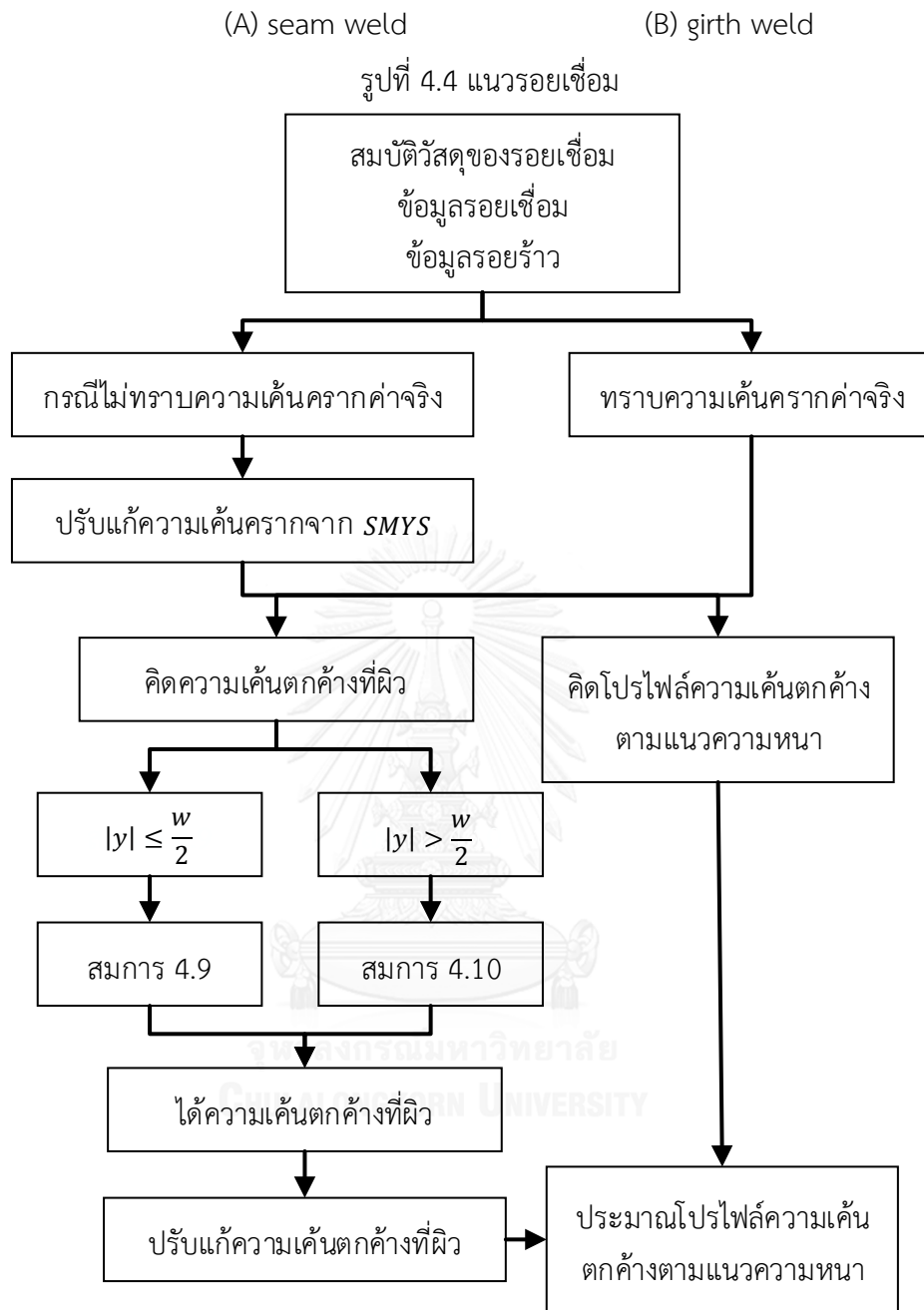


(A) single V-groove weld

(B) double V-groove weld

รูปที่ 4.3 ประเภทของรอยเชื่อม





รูปที่ 4.5 ภาพรวมการหาความเค้นตกค้าง

หากทราบความเค้นครากค่าจริงให้ใช้ความเค้นครากนั้นในการคำนวณเพื่อหาความเค้นตกค้าง แต่หากไม่ทราบความเค้นครากค่าจริงมาตรฐานแนะนำให้ประมาณจาก SMYS ผลที่ได้จากการประเมินจะมีแนวโน้มไปในทางปลอดภัย ในมาตรฐานการประเมินหลายมาตรฐานมีแนะนำการ

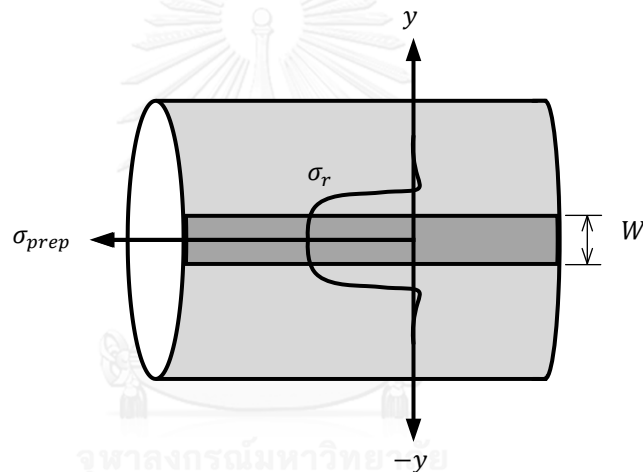
ปรับแก้ต่างกันไป แต่ค่าแนะนำจากมาตรฐาน API 579 มีแนวโน้มไปในทางปลอดภัยสูงสุด [9, 51] มีวิธีดังสมการ 4.8

$$\sigma_y^r = \sigma_y + \Delta\sigma_y \quad (4.8)$$

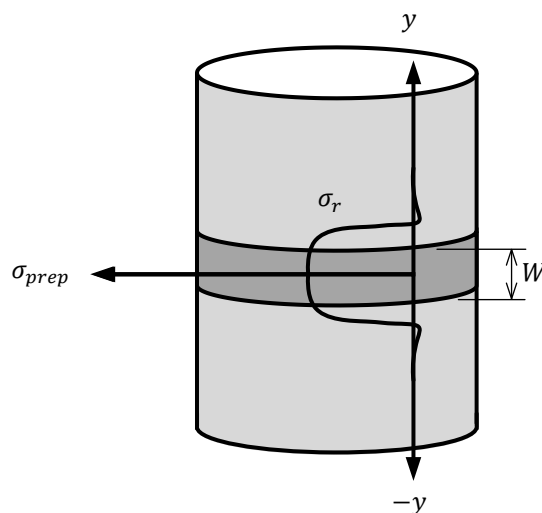
เมื่อ  $\Delta\sigma_y$  คือ ค่าปรับแก้ความเค้นครากของวัสดุ เท่ากับ  $69 \text{ MPa}$   
 $y$  คือ ระยะตั้งฉากจากศูนย์กลางแนวรอยเชื่อม

#### 4.2.1 โปรไฟล์ความเค้นตกค้างที่ผิว

มาตรฐาน API 579 แนะนำโปรไฟล์ความเค้นตกค้างที่ผิวว่า ความเค้นตกค้างจะสูงสุดที่แนวรอยเชื่อม และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อห่างจากแนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4.6



(A) แนวรอยเชื่อมวางตัวตามแนวยาว



(B) แนวนรอยเชื่อมวางตัวตามแนวเส้นรอบวง

รูปที่ 4.6 ความเค้นตกค้างที่ผิวในโครงสร้างท่อในทิศตั้งฉากกับรอยเชื่อม

หาความเค้นตกค้างที่ผิว แบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

$$\sigma^r(y) = \sigma_y^r R_r \quad ; |y| \leq \frac{w}{2} \quad (4.9)$$

$$\sigma^r(y) = \left\{ \begin{array}{l} 1 - \left( \frac{|y| - \frac{w}{2}}{c} \right)^2 \\ 1 + \left( \frac{|y| - \frac{w}{2}}{c} \right)^{2n} \end{array} \right\} \sigma_y^r R_r \quad ; |y| > \frac{w}{2} \quad (4.10)$$

เมื่อ ค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการ 4.9 และ 4.10 ถูกกำหนดตามเงื่อนไขในตารางที่ 4.4

$$T_p = \left( \frac{\sigma_{mct}}{\sigma_y} \right) \cdot 100 \quad (4.11)$$

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขในการแทนค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาความเค้นตกค้างที่ผิว

พารามิเตอร์		ทิศทางรอยเชื่อมและทิศทางรอยรั่ว	
		ตามแนวแกน	ตามแนวเส้นรอบวง
$n$		5	5
$c$		$2\sqrt{rt}$	$2\sqrt{rt}$
$R_r$	$T_p < 75\%$	1	1
	$75\% \leq T_p \leq 110\%$	สมการ 4.12	สมการ 4.13
	$T_p > 110\%$	0.3	0.506
Effect of PWTH		0.2	0.2

เมื่อ

$$R_r = \frac{168.5063 - 2.26770 T_p + 9.16852 \times 10^{-3} T_p^2}{100} \quad (4.12)$$

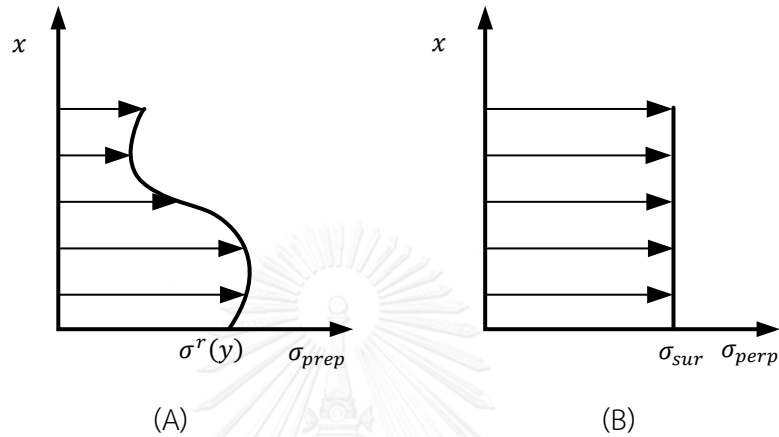
$$R_r = \frac{190.67 - 2.4501 T_p + 1.07 \times 10^{-3} T_p^2}{100} \quad (4.13)$$

ปรับแก้ความเค้นตกค้างที่ผิว ในกรณีที่พิจารณาผลจาก PWHT ใช้สมการ 4.14

$$\sigma^r(y) = 0.2 \sigma_y^r \quad (4.14)$$

#### 4.2.2 โพรไฟล์ความเค้นตกค้างตามแนวความหนา

วิธีฟังก์ชันน้ำหนักสามารถประยุกต์ใช้หาผลเฉลี่ย  $K$  ในกรณีที่อยู่ความเค้นตกค้างตามแนวความหนาซึ่งโพรไฟล์ซับซ้อน ดังรูปที่ 4.7 (A) ในงานวิจัยนี้จะประมาณโพรไฟล์ความเค้นตกค้างตามแนวความหนาเป็นค่าคงตัวเท่ากับความเค้นตกค้างที่ผิวที่ระยะห่างจากกึ่งกลางของรอยเชื่อมถึงรอยร้าว ดังรูปที่ 4.7 (B) ด้วยแนวคิดนี้การประเมินจะมีแนวโน้มไปในทางปลอดภัย



รูปที่ 4.7 รูปแบบโพรไฟล์ความเค้นตามแนวยาว (A) การจัดการโพรไฟล์ตามมาตรฐาน API 579, (B) การจัดการโพรไฟล์เท่ากับค่าคงตัวเท่ากับความเค้นตกค้าง

#### 4.3 สมบัติแรงดึง

หากไม่ทราบค่าพารามิเตอร์  $H_{RO}$  และ  $n_{RO}$  มาตรฐาน API 579 แนะนำให้หาพารามิเตอร์ทั้งสอง โดยใช้ค่า  $\sigma_y$  และ  $\sigma_u$  ของวัสดุ สมการที่ใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์  $H_{RO}$  และ  $n_{RO}$  แสดงในสมการ 4.15 - 4.16 [13]

$$n_{RO} = \frac{1+1.3495\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}\right)-5.3117\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}\right)^2+2.9643\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}\right)^3}{1.1249+11.0097\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}\right)-11.7464\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u}\right)^2} \quad (4.15)$$

$$H_{RO} = \frac{\sigma_u \exp(n_{RO})}{n_{RO}^{n_{RO}}} \quad (4.16)$$

ค่า  $\sigma_f$  หรือในบางเอกสารเรียกว่า ค่าความแข็งแรงครากประสิทธิผล (effective yield strength) [38] มักถูกใช้กับวัสดุที่รู้เพียงค่า SMYS แต่ไม่รู้ค่า  $\sigma_y$  และ  $\sigma_u$  ที่แท้จริง วิธีการประมาณค่า  $\sigma_f$  มีหลายวิธี เช่น

- 1) คำนวณจากค่าเฉลี่ยของค่า  $\sigma_y$  และ  $\sigma_u$  วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม

$$\sigma_f = \frac{(\sigma_y + \sigma_u)}{2} \quad (4.17)$$



2) คำนวณจากค่าปรับแก้ค่า  $\sigma_y$

$$\sigma_f = \sigma_y + 69 \text{ MPa} \quad (4.18)$$

3) คำนวณจากตัวคูณค่าปรับแก้จากค่าเฉลี่ยของค่า  $\sigma_y$  และ  $\sigma_u$  ใช้ในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (austenitic stainless steel)

$$\sigma_f = \frac{1.15 (\sigma_y + \sigma_u)}{2} \quad (4.19)$$

4) คำนวณจากตัวคูณค่าปรับแก้จากค่าความเครียดสูงสุดที่ยอมรับได้ (maximum allowable stress,  $S_m$ ) ซึ่ง  $S_m$  ถูกระบุไว้ใน มาตรฐาน ASME, section VIII, Division 2 โดยตัวคูณมีค่าขึ้นกับวัสดุ

$$\sigma_f = 2.4 S_m \quad \text{สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (ferritic steel)} \quad (4.20)$$

$$\sigma_f = 3.0 S_m \quad \text{สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก} \quad (4.21)$$

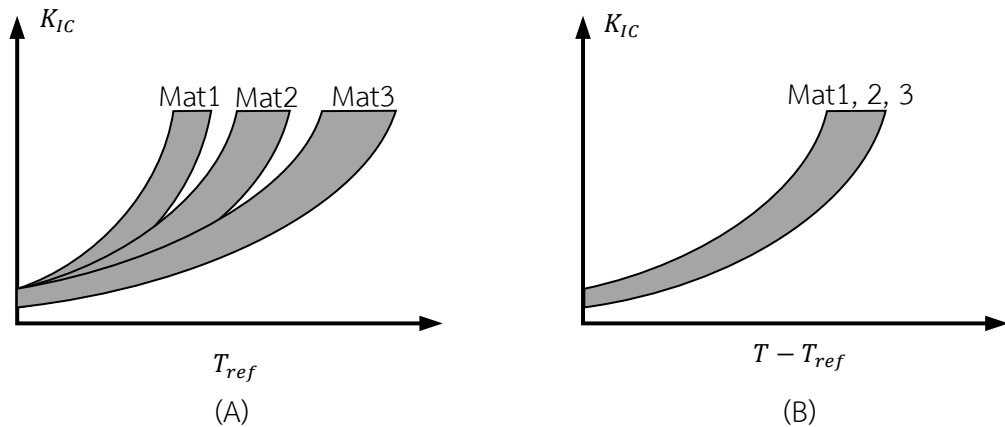
5) ประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองของ Ramberg-Osgood ด้วยสมการ 4.22

$$\sigma_f = \frac{\sigma_y}{2} + \left( 1 + \frac{(\frac{n_{RO}}{0.002})^{n_{RO}}}{\exp(n_{RO})} \right) \quad (4.22)$$

#### 4.4 ความต้านทานการแตกหัก

##### 4.4.1 การประมาณจากเส้นโค้งขอบเขตล่าง

ค่า  $K_{IC}$  ในช่วง ductile-brittle fracture transition region จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิ วัสดุต่างชนิดจะมีขอบเขตความต้านทานการแตกหักที่เป็นไปได้ต่างกันดังรูปที่ 4.8 (A) เพื่อลดความยุ่งยากของความแตกต่างของพฤติกรรมจึงเกิดแนวคิดการใช้อุณหภูมิอ้างอิง (temperature reference,  $T_{ref}$ ) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด มาตรฐาน API 579 แนะนำวิธีประมาณค่า  $T_{ref}$  ในตาราง 9.2 [13] เมื่อนำ  $T_{ref}$  ของวัสดุมาใช้จะสามารถรวบรวมพฤติกรรมที่ต่างกันของวัสดุได้ดังรูปที่ 4.8 (B) แนวคิดนี้จะช่วยให้อุณหภูมิ ( $T$ ) เป็นปัจจัยเดียวที่มีผลกับค่า  $K_{IC}$



รูปที่ 4.8 แนวคิดการใช้ค่า  $T_{ref}$  ปรับแก้ความต่างของวัสดุ

The American Society of Mechanical Engineering (ASME) ทดสอบหาค่า  $K_{IC}$  ของ ภาชนะความดันจำนวนหนึ่ง จากนั้นหาขอบเขตล่างของความต้านทานการแตกหักที่เป็นไปได้ดัง สมการ 4.23

$$K_{IC} = 36.5 + 3.084 \exp(T - T_{ref} + 56) \quad (4.23)$$

ก่อนจะนำค่า  $K_{IC}$  ที่ได้จากวิธีนี้ไปใช้ ต้องปรับแก้เป็นความต้านทานการแตกหักค่ากลาง ( $K_{mat}^{mean}$ ) เพื่อให้ผลการประเมินมีแนวโน้มปลอดภัยไม่มากเกินไป การปรับแก้ใช้สมการ 4.24 เมื่อ  $K_{IC}$  คำนวณได้จาก สมการ 4.23,  $\Delta T$  คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิใช้งานกับอุณหภูมิอ้างอิงในหน่วย °F, SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความต้านทานการแตกหักขอบเขตล่าง และ  $B_i$  คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้ซึ่ง หาได้จากตารางที่ 4.5

$$\frac{K_{mat}^{mean}}{K_{IC}} = \left( \frac{1.0}{B_0 + B_1 \Delta T + B_2 \Delta T^2 + B_3 \Delta T^3 + B_4 \Delta T^4 + B_5 \Delta T^5} \right) \quad (4.24)$$

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์ปรับแก้เพื่อหาความต้านทานการแตกหักค่ากลาง

SD	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$
0	0.4992	-1.21E-04	1.79E-05	3.8 6E-08	4.66E-11	2.98E-13
1	0.61401	2.21E-04	2.11E-05	5.93E-08	8.31E-11	2.95E-13
2	0.74203	7.65E-04	2.49E-05	8.58E-08	1.39E-10	2.80E-13
3	0.87961	1.54E-04	2.99E-05	1.18E-07	2.16E-10	2.80E-13

#### 4.4.2 การประมาณจากค่าชาร์ปี

เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่า Charpy-V notch ( $E_{CVN}$ ) กับ อุณหภูมิ ได้จากการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ upper shelf, transition และ lower shelf ซึ่งแสดงค่า  $E_{CVN}$  ของวัสดุที่อุณหภูมิสูง, ปานกลาง และต่ำ ตามลำดับ ค่า  $K_{IC}$  ประมาณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $K_{IC}$  กับค่า  $E_{CVN}$

ช่วง upper shelf ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $K_{IC}$  กับค่า  $E_{CVN}$  มาจาก empirical formula มักอยู่ในรูปแบบสมการ 4.25

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = \alpha \left(\frac{E_{CVN}}{\sigma_y}\right) - \beta \quad (4.25)$$

เช่น สมการที่เสนอโดย Barsom และ Rolfe [52] แทนช่วงเส้นโค้ง upper shelf สำหรับเหล็กที่  $\sigma_y$  อยู่ในช่วง 760-1,700 MPa ตามสมการ 4.26

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = 0.64 \left(\frac{E_{CVN}}{\sigma_y}\right) - 0.01 \quad (4.26)$$

ช่วง transition ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_{CVN}$  กับอุณหภูมิ จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว API 579 เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $K_{IC}$  กับค่า  $E_{CVN}$  ของ Sailors-Corton [52] ตามสมการ 4.27

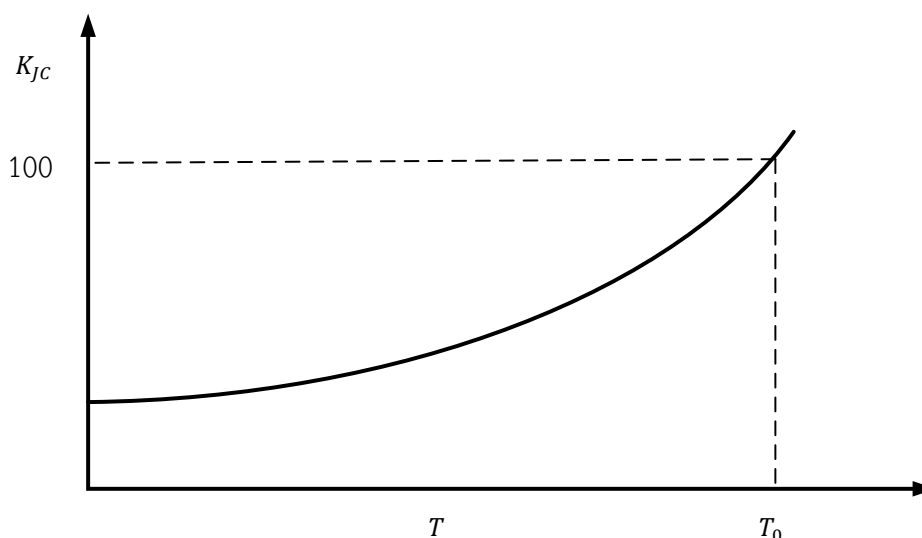
$$K_{IC} = 14.6 (E_{CVN})^{0.5} \quad (4.27)$$

อย่างไรก็ดี ค่า  $K_{IC}$  ที่ได้จากการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $K_{IC}$  กับค่า  $E_{CVN}$  จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากวิธีการอื่น [46]

#### 4.4.3 การประมาณโดยใช้ Master Curve

วิธีหาค่า  $K_{Jc}$  ในช่วง ductile-brittle fracture transition ด้วย Master curve ถูกเสนอโดย Wallin [52] ค่า  $K_{Jc}$  ของวิธีนี้ขึ้นกับค่าอุณหภูมิอ้างอิง ( $T_0$ ) เท่านั้น เมื่อ  $T_0$  เป็นอุณหภูมิของชิ้นงานมาตรฐานหนา 1 นิ้วที่ทำให้ค่า  $K_{Jc}$  เท่ากับ 100 MPa $\sqrt{m}$  ค่า  $K_{Jc}$  ในสมการ 4.28 คือค่ามาตรฐานของ  $K_{Jc}$  ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.9 แสดงพฤติกรรมของ Master Curve

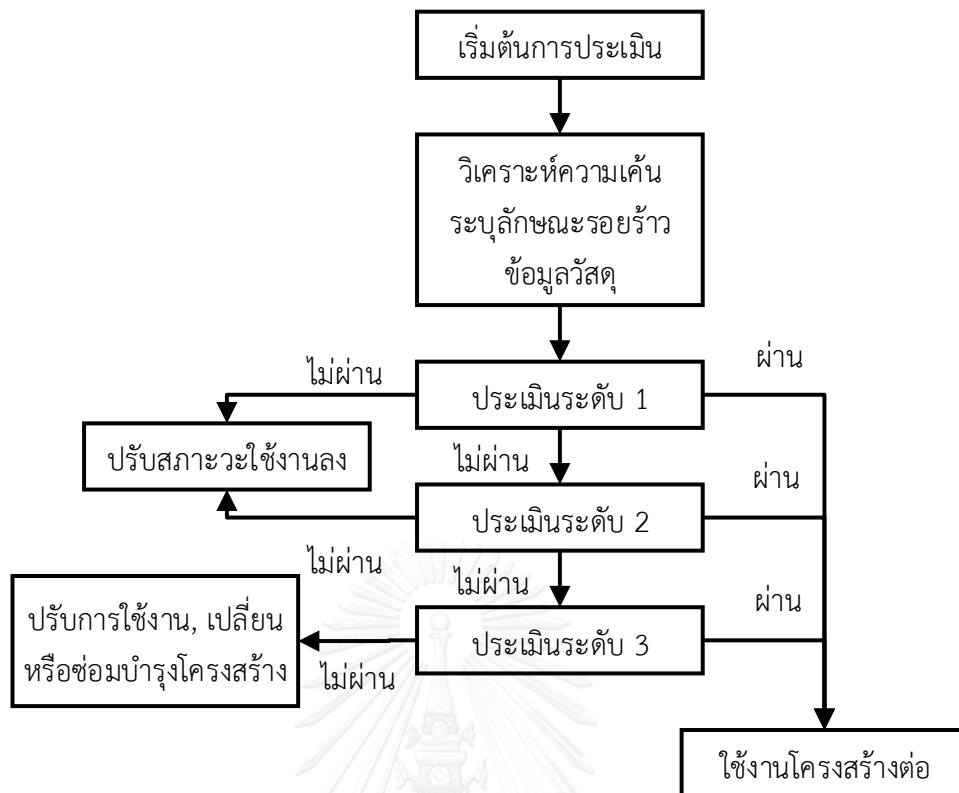
$$K_{Jc} = 30 + 70 \exp(0.019 - (T - T_0)) \quad (4.28)$$



รูปที่ 4.9 พฤติกรรมของ Master Curve

#### 4.5 การประเมินการคงสภาพ

การประเมินการคงสภาพโครงสร้าง คือการวิเคราะห์ว่าโครงสร้างนั้น ๆ ยังสามารถใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพ และปลอดภัยหรือไม่ มาตรฐาน API 579 แบ่งการประเมินเป็น 3 ระดับ แสดง ดังรูปที่ 4.10 แสดงภาพรวมของการประเมินการคงสภาพ หลังจากวิเคราะห์ความเค้น และระบุ ลักษณะของรอยร้าวแล้ว จึงประเมินระดับ 1 (screening curve) หากผลการประเมินคือผ่านก็ สามารถใช้งานโครงสร้างต่อไปได้อย่างปลอดภัย หากผลการประเมินระดับที่ 1 ไม่ผ่าน มาตรฐาน แนะนำให้ปรับสภาวะการทำงานให้ลดลง หรือประเมินระดับ 2 (general curve) ต่อไป หากผลการ ประเมินการคงสภาพระดับที่ 2 ผ่านก็สามารถใช้งานโครงสร้างต่อไปได้ หากผลการประเมินไม่ผ่านให้ ประเมินในระดับที่ 3 (specific curve) หรือลดสภาวะการทำงานให้เบาลง หากผลการประเมินการคง สภาพระดับที่ 3 ผ่าน ก็สามารถใช้งานได้ต่อไป หากไม่ผ่านมาตรฐานแนะนำให้ปรับสภาพการทำงาน ให้ลดลง, ซ่อมแซม หรือเปลี่ยนโครงสร้างขึ้นนี้ หลังจากนั้นจึงประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ และ ประเมินการรั่วก่อนการแตกหัก



รูปที่ 4.10 ภาพรวมของการประเมินการคงสภาพ

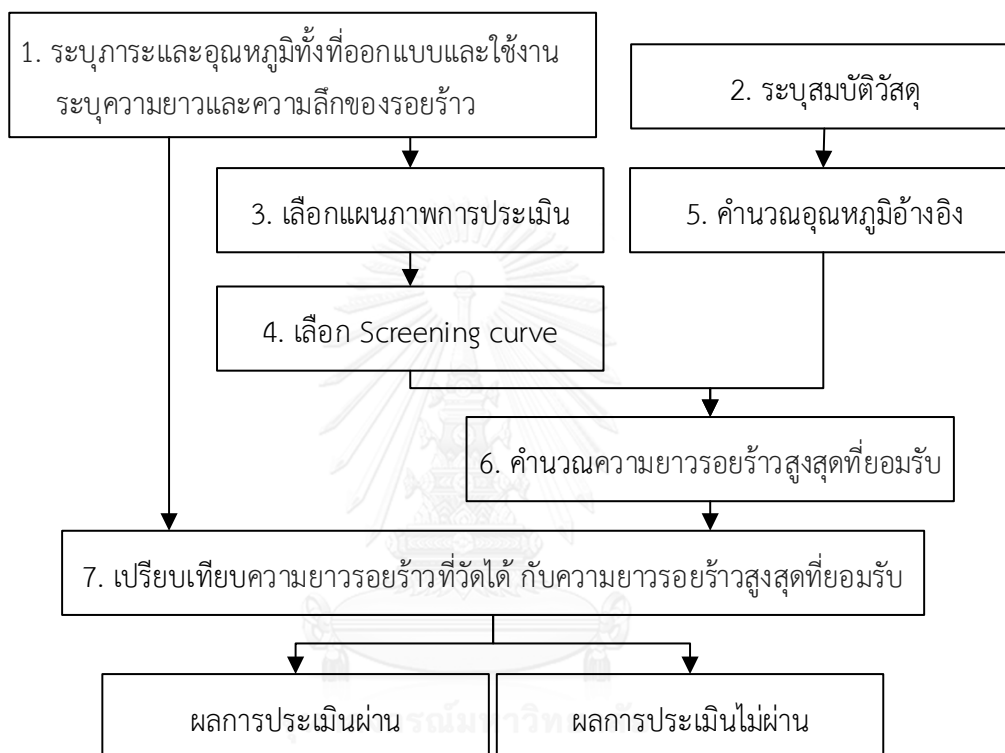
#### 4.5.1 การประเมินระดับ 1 Screening Curve

การประเมินการคงสภาพระดับนี้ ใช้หลักการเปรียบเทียบความยาวรอยร้าวที่พบกับความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้ การประเมินในระดับนี้ มีข้อจำกัดในแง่มุม ชนิดของโครงสร้าง, มิติของโครงสร้าง, ภาระที่รองรับ และสมบัติวัสดุ ตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ข้อจำกัดการประเมินระดับ 1

	มีข้อจำกัด
ชนิดโครงสร้าง	- แผ่นแบน (flat plate), ทรงกระบอก, ทรงกลม (sphere)
มิติของ โครงสร้าง	- ตำแหน่งที่พบรอยร้าวจะต้องมีความหนาของโครงสร้างไม่เกิน 38 mm - โครงสร้างทรงกระบอก และภาชนะทรงกลมต้องมีขนาดรัศมีภายในมากกว่าหรือเท่ากับ 5 เท่าของความหนา
ภาระ	- รับความดัน
สมบัติวัสดุ	- มีความเค้นยอมรับ (allowable stress) ไม่เกิน 172 MPa, มี SMYS ไม่น้อยกว่า 276 MPa, มี SMTS ไม่น้อยกว่า 483 MPa

การประเมินจะทำได้หากข้อมูลของโครงสร้างอยู่ภายใต้ข้อจำกัดการประเมินระดับ 1 แล้วจะเริ่มประเมินได้ การประเมินระดับ 1 มีขั้นตอนโดยสรุปดังรูปที่ 4.11 เริ่มจากระบุภาระและอุณหภูมิทั้งที่การออกแบบและใช้งาน, ระบุความยาวและความลึกของรอยร้าว, ระบุสมบัติวัสดุ จากนั้น เลือกแผนภาพที่สอดคล้องกับ ชนิดของโครงสร้าง และแนวการวางตัวของรอยร้าวเทียบกับรอยเชื่อมตามเงื่อนไขในตารางที่ 4.7 รูปที่ 4.12 แสดงแผนภาพ 9.13

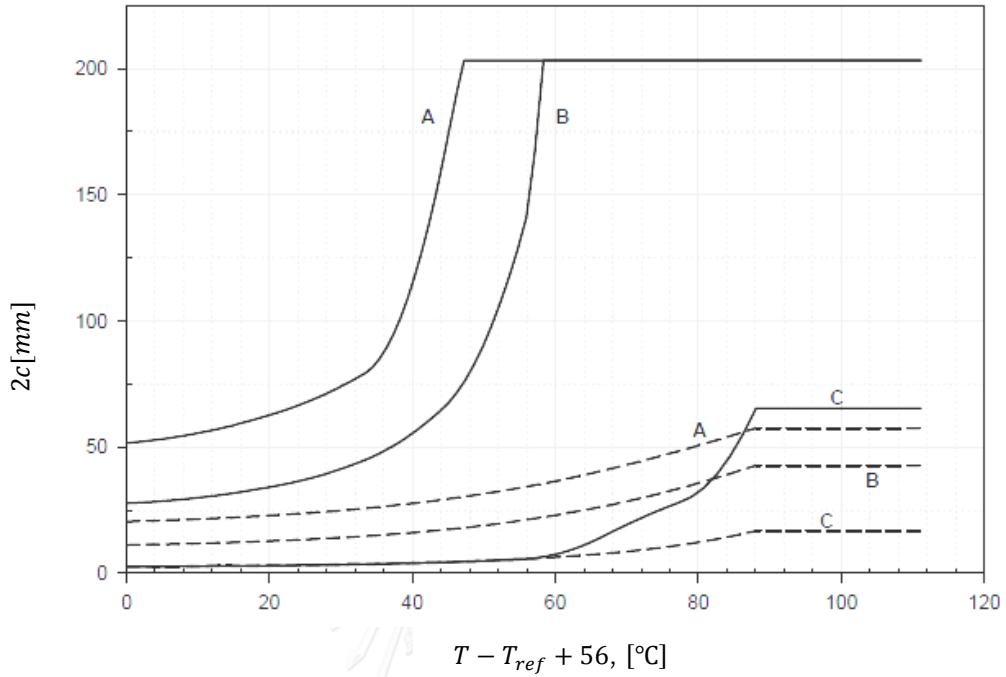


รูปที่ 4.11 ภาพรวมของการการประเมินการคงสภาพระดับ 1

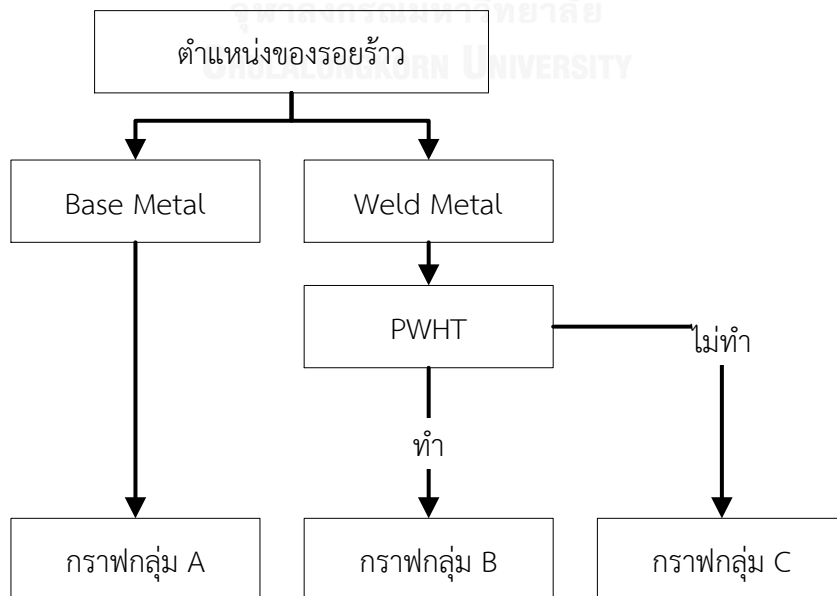
ตารางที่ 4.7 เงื่อนไขที่ใช้เลือกแผนภาพประเมินระดับ 1 ในโครงสร้างทรงกระบอก

แนวรอยเชื่อม	แนวรอยร้าวเทียบกับแนวรอยเชื่อม	แผนภาพที่ใช้
ตามยาว	ขนาน	9.13
	ตั้งฉาก	9.14
ตามแนวเส้นรอบวง	ขนาน	9.15
	ตั้งฉาก	9.16

ถัดมาเลือก screening curve โดยพิจารณาจากตำแหน่งของรอยร้าวว่าอยู่ที่รอยเชื่อม (weld metal) หรือห่างจากรอยเชื่อม (base metal), รอยเชื่อมผ่านกรรมวิธี Post Weld Heat Treatment (PWHT) หรือไม่ ขั้นตอนดังรูปที่ 4.13

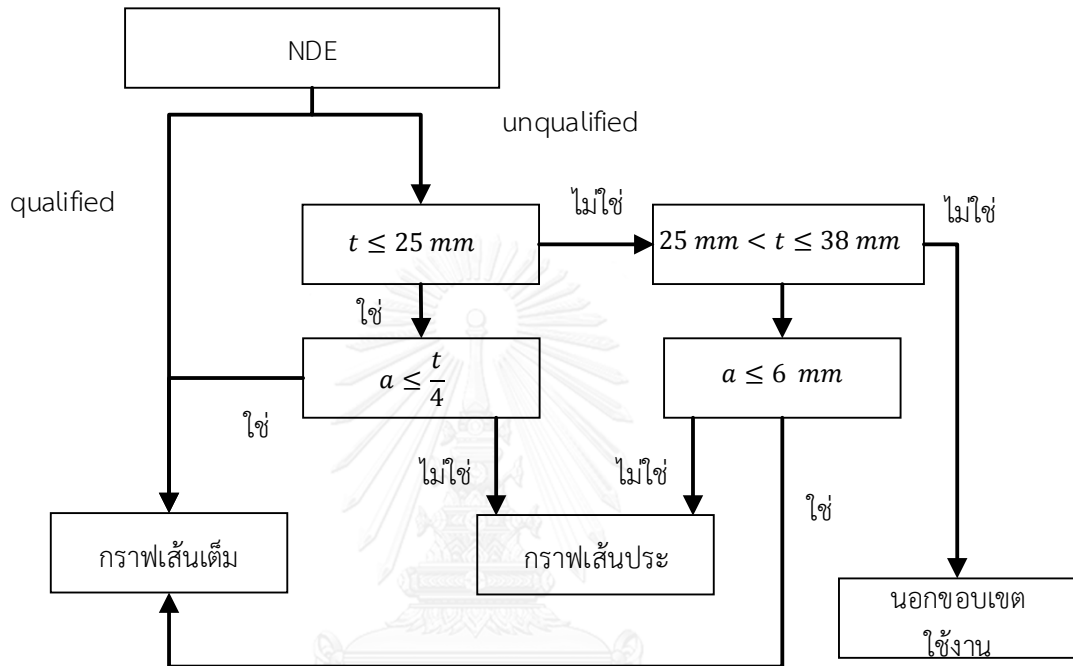


รูปที่ 4.12 ตัวอย่างแผนภาพสำหรับประเมินสภาพโครงสร้างทรงกระบอกมีรอยเชื่อมตามยาวและมีรอยร้าวขนานกับรอยเชื่อม (แผนภาพ 9.13)



รูปที่ 4.13 เกณฑ์ตัดสินใจเลือก screening curve

หลังจากเลือก screening curve แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การเลือก screening curve ของกราฟกลุ่มที่เลือก (A, B หรือ C) โดยการพิจารณา การตรวจวัดรอยร้าวด้วยวิธี NDE ผ่านมาตรฐานรับรองหรือไม่ นอกจากนี้ยังพิจารณาความหนาของโครงสร้าง และความลึกของรอยร้าว ตามเงื่อนไขในรูปแบบที่ 4.14 ตัวอย่างแผนภาพ 9.13 (ดังรูปที่ 4.12) แสดงเส้นใน screening curve เส้นเต็มและเส้นประ



รูปที่ 4.14 เกณฑ์ตัดสินใจเลือกเส้นใน screening curve

จากนั้น ระบุ material temperature exemption curve จากชนิดของวัสดุและหาอุณหภูมิอ้างอิง  $T_{ref}$  โดยใช้ข้อมูล exemption curve และ SMYS สำหรับ carbon steel และ low alloy steel สามารถหา  $T_{ref}$  ได้จากตาราง 9.2 [13] หาความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้ จาก  $T_{ref}$  และเส้นกราฟ ถัดไป เปรียบเทียบความยาวรอยร้าวที่วัดได้กับความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้ ( $2c_{allow}$ ) ถ้าความยาวรอยร้าวที่วัดได้น้อยกว่า  $2c_{allow}$  ก็สามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย หากไม่ใช่จะถือว่าโครงสร้างไม่ผ่านการประเมิน อาจต้องปรับสภาวะการทำงานให้ลดลงหรือประเมินการคงสภาพระดับ 2 ต่อไป

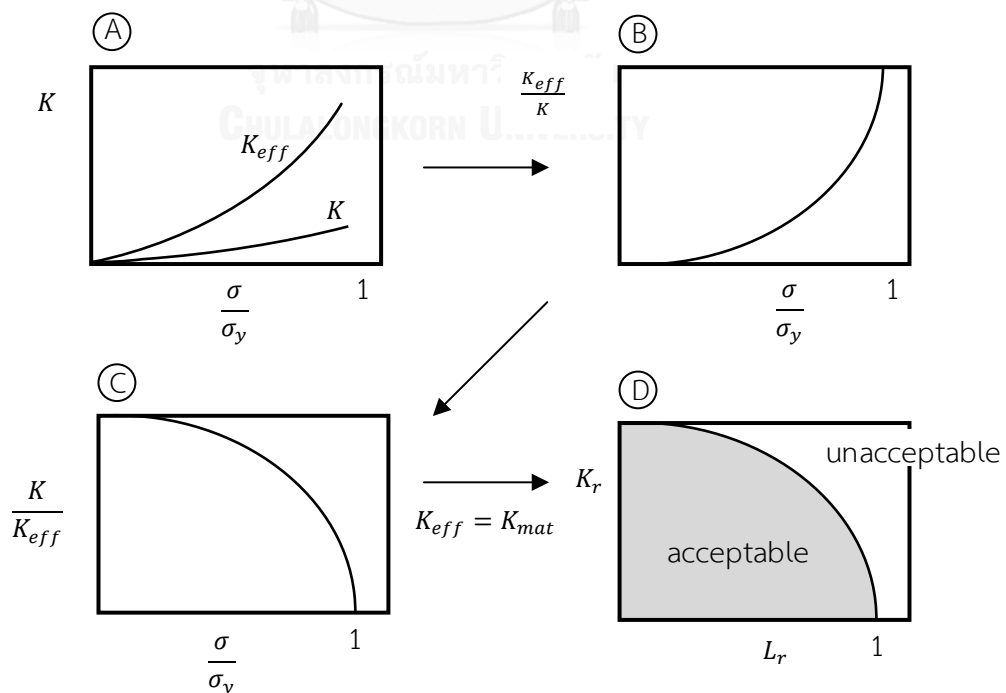


#### 4.5.2 แผนภาพประเมินความเสียหาย

ในปี ค.ศ. 1975 Dowling และ Townley [39] เสนอว่าความเสียหายของโครงสร้างที่มีรอยร้าวมี 2 รูปแบบ คือการแตกหัก (fracture) และการครากทั้งหน้าตัด การแตกหัก หมายถึงการที่รอยร้าวโตขึ้นจากเดิม การครากทั้งหน้าตัด หมายถึงการที่หน้าตัดที่เหลือนับระยะรอยร้าวรับความเค้นถึงความเค้นคราก สำหรับชิ้นส่วนที่ทำด้วยวัสดุความแข็งแรงต่ำ (low strength material) วัสดุมีค่าความเค้นครากน้อยแต่ความต้านทานการแตกหักมาก ดังนั้นชิ้นส่วนจึงมีโอกาสเสียหายจากการครากทั้งหน้าตัดมากกว่าการแตกหัก

การแตกหัก แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) และ การแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture) การแตกหักแบบเปราะจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อค่า  $K_I$  เท่ากับ  $K_{Ic}$  รอยร้าวจะโตขึ้นจากเดิมอย่างไร้เสถียรภาพ แต่หากรอยร้าวโตอย่างมีเสถียรภาพจากเดิมไประยะหนึ่งก่อนการโตอย่างไร้เสถียรภาพจะเริ่มขึ้น จะเรียกการแตกหักเช่นนี้ว่า การแตกหักแบบเหนียว เกณฑ์การแตกหักสำหรับการแตกหักเปราะและเหนียว มีชื่อเรียกว่า เกณฑ์กำหนดรอยร้าวและเกณฑ์รอยร้าวเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ ตามลำดับ การสร้างเส้นโค้งความเสียหาย (FAC) นั้นจะใช้เกณฑ์การกำหนดรอยร้าว

Harrison และคณะ [53] ได้นำแนวคิดการปรับแก้บริเวณเสียรูปพลาสติก (plastic zone correction) ของ Dugdale มาพัฒนา FAC แนวคิดการพัฒนาเส้นโค้งความเสียหายแสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.15 แนวคิดการพัฒนาเส้นโค้งความเสียหาย [43]

เขียนสมการ 3.37 ในรูปฟังก์ชันของ ความเค้นที่กระทำกับโครงสร้าง ( $\sigma$ ) และความเค้นคราก ( $\sigma_y$ ) ดังนี้

$$K_{eff} = K \cdot f_1\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right) \quad (4.29)$$

เมื่อ  $K_{eff}$  คือ ค่า  $K$  เมื่อพิจารณาบริเวณปลายรอยร้าวมีบริเวณเสีรูปพลาสติก

จัดรูปสมการ 4.30 จะได้

$$\frac{K}{K_{eff}} = \left(f_1\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)\right)^{-1} \quad (4.30)$$

รูปที่ 4.15 (D) การแตกหักเกิดขึ้นเมื่อ ค่า  $K_{eff}$  มีค่าเท่ากับค่า initiation fracture toughness ใช้สัญลักษณ์  $K_{mat}$  แทน

$$K_{eff} = K_{mat} \quad (4.31)$$

แทนค่า  $K_{eff}$  จากสมการ 4.29 ในสมการ 4.31

$$\frac{K}{K_{mat}} = \left(f_1\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)\right)^{-1} \quad (4.32)$$

เนื่องจาก  $\frac{\sigma}{\sigma_{mat}}$  แปรผันตาม  $\frac{F}{F_L}$  โดย  $F$  คือภาระที่กระทำกับโครงสร้าง และ  $F_L$  คือภาระขณะที่หน้าตัดที่มีรอยร้าวรับความเค้นถึงความเค้นคราก ดังนั้นสมการ 4.32 จึงเขียนได้ในรูป

$$\frac{K}{K_{mat}} = \left(f_1\left(\frac{F}{F_L}\right)\right)^{-1} \quad (4.33)$$

Harrison นิยามตัวแปรไร้หน่วย  $K_r$  และ  $L_r$  สำหรับบ่งชี้โอกาสที่โครงสร้างจะเสียหายจากการแตกหักและการครากทั้งหน้าตัด [54] โดย

$$K_r = \frac{K}{K_{mat}} \quad (4.34)$$

สำหรับ  $L_r$  มีนิยามดังนี้

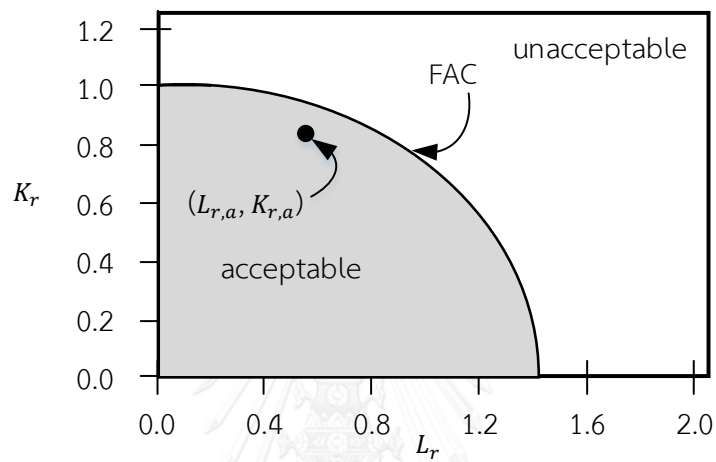
$$L_r = \frac{F}{F_L} \quad (4.35)$$

ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_r$  และ  $L_r$  ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งเขียนได้ตามสมการ 4.36

$$K_r = (f_1(L_r))^{-1} \quad (4.36)$$

สมการดังกล่าวถูกใช้ในแผนภาพประเมินความเสียหาย (Failure Assessment Diagram, FAD) พื้นที่ของแผนภาพถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือบริเวณปลอดภัยอยู่ใต้ FAC และบริเวณเสียหายเหนือ FAC

รูปที่ 4.16 แสดง ค่า  $L_{r,a}$  และ  $K_{r,a}$  คือค่า  $L_r$  และ  $K_r$  ณ สภาวะที่ประเมิน หากพล็อตจุด  $(L_{r,a}, K_{r,a})$  ใน FAD แล้วจุดดังกล่าวอยู่ใต้ FAC จะถือว่าชิ้นส่วนปลอดภัยจากความเสียหาย แต่หากจุดประเมินอยู่เหนือ FAC จะถือว่าชิ้นส่วนเสียหาย



รูปที่ 4.16 แผนภาพประเมินความเสียหาย

โครงสร้างจะเกิดความเสียหายจากการครากทั้งหน้าตัด หากค่า  $L_r$  เป็นไปตามสมการ [54]

$$L_r \geq L_{r,max} \quad (4.37)$$

เมื่อ  $L_{r,max}$  คือ ค่า  $L_r$  ที่ทำให้โครงสร้างเริ่มเกิดความเสียหายจากการครากทั้งหน้าตัด ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ

FAC ที่ได้จากสมการ 4.33 ได้จากการวิเคราะห์แผ่นแบนขนาดอนันต์ มีรอยร้าวตรงกลาง สมมุติให้บริเวณที่เสียรูปพลาสติกเป็นแบบแถบคราก มีพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุเป็นแบบพลาสติกสมบูรณ์ แต่หากวัสดุมีพฤติกรรมแบบอื่น FAC ก็จะเปลี่ยนไป ถ้า FAC ถูกกำหนดจากเส้นขอบเขตล่างของ FAC ของวัสดุต่าง ๆ [38] จะเป็นไปตามสมการ

$$K_r = [1 - 0.14(L_r^p)^2] \{0.3 + 0.7 \exp[-0.65(L_r^p)^6]\} : L_r^p \leq L_{r,max}^p \quad (4.38)$$

เมื่อ  $L_{r,max}^p$  คือ อัตราส่วนภาระสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้โดยไม่เกิดการคราก แตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ เช่น

- 1)  $L_{r,max}^P$  มีค่าเท่ากับ 1.00 เมื่อ strain hardening exponent มีค่ามากกว่า 15
- 2)  $L_{r,max}^P$  มีค่าเท่ากับ 1.25 ในเหล็ก ASTM A508 และเหล็ก C- Mn
- 3)  $L_{r,max}^P$  มีค่าเท่ากับ 1.80 ในเหล็กกล้าไร้สนิม
- 4)  $L_{r,max}^P$  มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่าง  $\sigma_f$  และ  $\sigma_y$

ประเมินด้วยระดับ 3 มี FAC ถูกกำหนดขึ้นกับที่มาของเส้นโค้งความเสียหายกำหนด

ลักษณะเฉพาะของ FAC ไว้ดังนี้

ทางเลือก A ใช้เส้นโค้งความเสียหายจากการวิเคราะห์แบบ probabilistic

ทางเลือก B ใช้เส้นโค้งความเสียหายที่ขึ้นกับสมบัติวัสดุ

ทางเลือก C ใช้เส้นโค้งความเสียหายที่ขึ้นกับตำแหน่งและชนิดของภาวะ สมบัติวัสดุ ชนิดโครงสร้าง

ทางเลือก D ใช้เส้นโค้งความเสียหายมาจากการประยุกต์การเติบโตของรอยร้าวอย่างมีเสถียรภาพ ในการวิเคราะห์

ทางเลือก E ใช้เส้นโค้งความเสียหายมาจากคำแนะนำของมาตรฐานอื่น ๆ

กรณีวัสดุแสดงพฤติกรรม strain hardening บริเวณเสียรูปพลาสติกมีขนาดใหญ่ การใช้  $K$  เป็นพารามิเตอร์ไม่เพียงพอที่จะสะท้อนพฤติกรรมของวัสดุ ดังนั้นจึงต้องใช้พารามิเตอร์  $J$ - อินทิกรัล ในการคำนวณ เมื่อ  $J_{el}$ ,  $J_{pl}$  คือ องค์ประกอบยืดหยุ่น และองค์ประกอบพลาสติก ตามลำดับ และวิธี ประมาณค่า  $J$ - อินทิกรัลของ EPRI [39] คือ

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (4.39)$$

สมการ FAC ถูกพิจารณาพฤติกรรม strain hardening จะได้

$$J = J_{el} \cdot f(L_r) \quad (4.40)$$

$$\frac{J}{J_{el}} = f(L_r) \quad (4.41)$$

จากขั้นตอนการสร้างสมการสำหรับค่า  $J$ - อินทิกรัล ด้วยวิธีความเค้นอ้างอิง [39] จะได้

$$\frac{J}{J_{el}} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right) \left( \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} \right)^{-1} \quad (4.42)$$

$$\frac{J}{J_{el}} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right)^2 \left( \frac{\sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \right) \quad (4.43)$$

$$\frac{J}{J_{el}} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{ref}^3}{\sigma_y^2} \right) \left( \frac{1}{E\varepsilon_{ref}} \right) \quad (4.44)$$

$$\sigma_{ref} = \sigma_y L_r \quad (4.45)$$

$$\frac{J}{J_{el}} = \frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_y L_r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_y L_r^3}{E \varepsilon_{ref}} \right) \quad (4.46)$$

ประยุกต์ใช้กับ สมการ 4.41

$$\frac{J}{J_{el}} = f(L_r) = \frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_y L_r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_y L_r^3}{E \varepsilon_{ref}} \right) \quad (4.47)$$

$$\frac{J_{el}}{J} = [f(L_r)]^{-1} = \left[ \frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_y L_r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_y L_r^3}{E \varepsilon_{ref}} \right) \right]^{-1} \quad (4.48)$$

$$J_{el} = \frac{K^2}{E'} \quad (4.49)$$

เมื่อ  $E' = E$  ในความเค้นระนาบ และ  $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$  ในความเครียดระนาบ

$E$  คือ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น

$\nu$  คือ ค่าอัตราส่วนปัวร์ซอง

จะได้

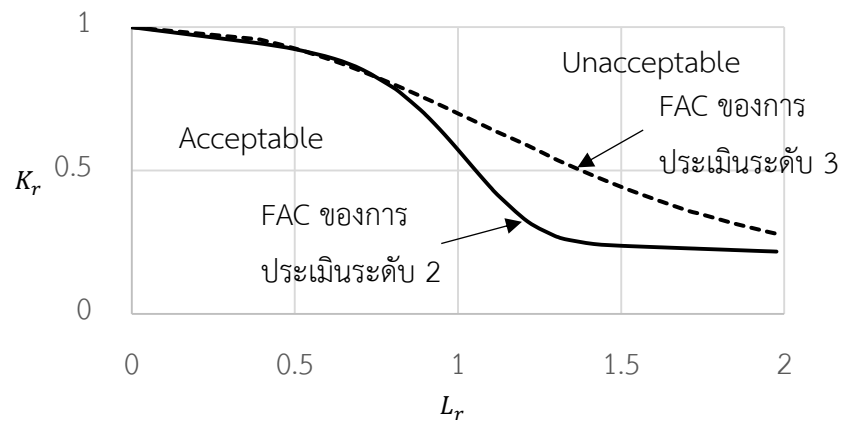
$$\frac{\frac{K^2}{E'}}{\frac{K_{mat}^2}{E'}} = [f(L_r)]^{-1} = \left[ \frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_y L_r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_y L_r^3}{E \varepsilon_{ref}} \right) \right]^{-1} \quad (4.50)$$

$$\frac{K}{K_{mat}} = [f(L_r)]^{-\frac{1}{2}} = \left[ \frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_y L_r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_y L_r^3}{E \varepsilon_{ref}} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.51)$$

จากสมการ 4.34

$$K_r = \left[ \frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_y L_r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_y L_r^3}{E \varepsilon_{ref}} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.52)$$

สมการ 3.65 เป็นที่มาของ FAC ของการประเมินระดับ 3 ทางเลือก B ของ API 579 ซึ่งการประเมินระดับนี้ประยุกต์ใช้กับ Initiation fracture criteria เท่านั้น ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แผนภาพประเมินความเสียหายระดับ 3B

#### 4.5.2.1 การประเมินระดับ 2

การประเมินระดับ 2 มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ระบุสถานะใช้งาน ได้แก่ ความดัน, อุณหภูมิ และภาระอื่น ๆ

ขั้นที่ 2 คำนวณความเค้นที่ตำแหน่งของรอยร้าว

ขั้นที่ 3 ระบุสมบัติของวัสดุ เช่น ความแข็งแรงคราก, ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการแตกหัก

ขั้นที่ 4 ระบุขนาดรอยร้าว

ขั้นที่ 5 ระบุตัวประกอบความปลอดภัย ปรับแก้ความเค้นเมมเบรนปฐมภูมิ (primary membrane stress :  $P_m$ ) และความเค้นดัดปฐมภูมิ (primary bending stress:  $P_b$ ), ความต้านทานการแตกหักของวัสดุ และขนาดของรอยร้าวด้วยตัวประกอบความปลอดภัยย่อย (partial safety factor) ตามสมการ 4.43 ถึง 4.7 ตามลำดับ

$$P_m = PSF_s \times P_m \quad (4.53)$$

$$P_b = PSF_s \times P_b \quad (4.54)$$

$$K_{mat} = \frac{K_{mat}}{PSF_k} \quad (4.55)$$

$$a = PSF_a \times a \quad (4.56)$$

$$2c = PSF_a \times 2c \quad (4.57)$$

เมื่อ  $PSF_s$ ,  $PSF_k$  และ  $PSF_a$  คือ ตัวประกอบความปลอดภัยย่อยของความเค้น, ความต้านทานการแตกหัก และของรอยร้าว ตามลำดับ

ขั้นที่ 6 คำนวณความเค้นอ้างอิงปฐมภูมิ (primary reference stress,  $\sigma_{ref}^P$ )

ขั้นที่ 7 คำนวณอัตราส่วนภาระปฐมภูมิ,  $L_r^P$  จากสมการ 4.6

$$L_r^P = \frac{\sigma_{ref}^P}{\sigma_y} \quad (4.58)$$

เมื่อ  $\sigma_y$  คือความเค้นคราก

ขั้นที่ 8 คำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเนื่องจากภาระปฐมภูมิ  $K_I^P$  ถ้า  $K_I^P$  ถ้าได้ค่าติดลบให้ปรับเป็นศูนย์

ขั้นที่ 9 คำนวณความเค้นอ้างอิงเนื่องจากภาระทุติยภูมิและความเค้นตกค้าง (reference stress based on the secondary and residual stress,  $\sigma_{ref}^{SR}$ )

ขั้นที่ 10 คำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเนื่องจากความเค้นทุติยภูมิและความเค้นตกค้าง  $K_I^{SR}$  ถ้า  $K_I^{SR}$  ได้ค่าติดลบให้ปรับเป็นศูนย์

ขั้นที่ 11 คำนวณ plasticity interaction factor ( $\phi$ ) โดย ถ้า  $K_I^{SR} = 0$  ให้  $\phi = 1.0$  ถ้า  $K_I^{SR} > 0$  ให้คำนวณ  $\phi$  จากขั้นตอนย่อยต่อไปนี้

ขั้นที่ 11.1 หาอัตราส่วนภาระเนื่องจากความเค้นทุติยภูมิและความเค้นตกค้าง  $L_I^{SR}$  จาก

$$L_I^{SR} = \frac{\sigma_{ref}^{SR}}{\sigma_y} \quad (4.59)$$

ขั้นที่ 11.2 คำนวณค่า  $\phi$  และ  $\psi$  จากตาราง 9.4 [13]

ขั้นที่ 11.3 คำนวณ  $\phi_0$  จากเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\phi_0 = \begin{cases} 1 & ; 0 < L_r^{SR} \leq 4 \\ \frac{K_I^{SR}}{K_I^{SR}} & ; L_r^{SR} > 4 \end{cases} \quad (4.60)$$

จากนั้นคำนวณ  $\phi$  จาก

$$\phi = \phi_0 \left( 1 + \frac{\psi}{\phi} \right) \quad (4.61)$$

ขั้นที่ 12 คำนวณ  $K_r$  จากสมการ

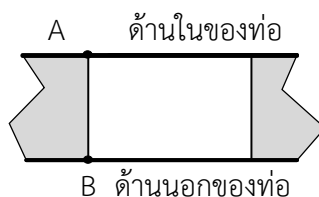
$$K_r = \frac{K_I^P + \phi K_I^{SR}}{K_{mat}} \quad (4.62)$$

ขั้นที่ 13 พล็อตจุดประเมิน ( $L_r$ ,  $K_r$ ) บน FAD

ขั้นที่ 14 วาดเส้นโค้งความเสียหายตามสมการ 4.38

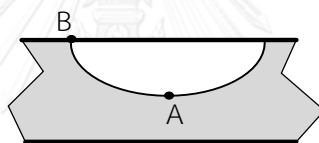
หากผลการประเมินการคงสภาพระดับที่ 2 ผ่าน สามารถใช้งานโครงสร้างต่อไปได้ หากผลการประเมินไม่ผ่านก็ประเมินในระดับที่ 3 ต่อไป หรือปรับสภาวะการทำงานให้ลดลง โดยปกติตำแหน่งที่ประเมินจะมี 2 จุด ดังนี้

กรณีรอยร้าวทะลุความหนา (รูปที่ 4.18) มีจุดประเมิน คือ จุดปลายรอยร้าวที่ผิวด้านใน (จุด A) และผิวด้านนอก (จุด B) ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งประเมินของรอยร้าวทะลุความหนา

กรณีรอยร้าวผิว (รูปที่ 4.19) มีจุดประเมิน คือ จุดปลายรอยร้าวที่ผิว (จุด A) และ แทนจุดลึกที่สุด (จุด B)



รูปที่ 4.19 ตำแหน่งประเมินของรอยร้าวผิว

#### 4.5.2.2 การประเมินระดับ 3

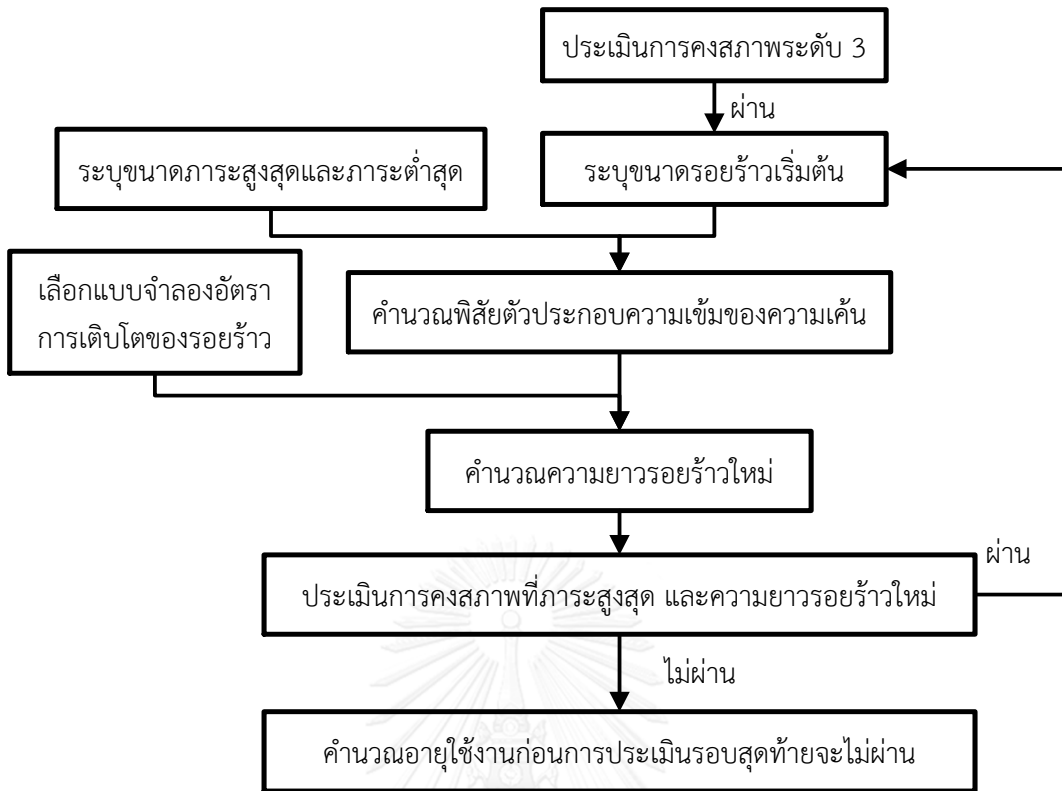
การประเมินระดับที่ 3 มีขั้นตอนที่ 1- 13 เหมือนกับการประเมินระดับ 2 แต่ขั้นตอนที่ 14 ต่างกัน โดยใช้เส้นโค้งความเสียหายที่แทนด้วยสมการ 4.52

#### 4.6 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ

ขั้นตอนการประเมินอายุใช้งานที่เหลือสรุปได้ดัง

รูปที่ 4.20



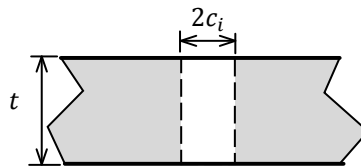


รูปที่ 4.20 ภาพรวมของการประเมินอายุใช้งานที่เหลือ

รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ประเมินการคงสภาพของโครงสร้างระดับ 3 ถ้าผ่านการประเมิน

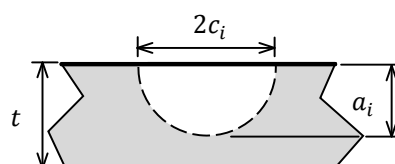
กรณีรอยร้าวทะลุความหนา ระบุความยาวรอยร้าวเริ่มต้น ( $2c_i$ ), ความลึก ( $t$ ) ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ขนาดเริ่มต้นของรอยร้าวทะลุความหนา

กรณีรอยร้าวครึ่งวงรีที่ผิว ระบุความยาวรอยร้าวเริ่มต้น ( $2c_i$ ) และความลึกเริ่มต้น ( $a_i$ )

เท่ากับความยาวและความลึกของรอยร้าว ดังรูปที่ 4.22



## รูปที่ 4.22 ขนาดเริ่มต้นของรอยร้าวผิว

ขั้นที่ 2 เลือกแบบจำลองอัตราการเติบโตของรอยร้าว และระบุค่าคงในแบบจำลองให้ครบ

ขั้นที่ 3 ระบุภาระสูงสุด และภาระต่ำสุดที่กระทำกับโครงสร้าง

ขั้นที่ 4 คำนวณ  $\Delta K_A$  และ  $\Delta K_B$  ด้วยสมการ 3.51 เมื่อ  $K_{A,max}$  และ  $K_{A,min}$  คือค่า  $K$  ที่ตำแหน่ง A รับภาระสูงสุดและภาระต่ำสุด,  $K_{B,max}$  และ  $K_{B,min}$  คือ  $K$  ที่ตำแหน่ง B รับภาระสูงสุดและภาระต่ำสุด

ขั้นที่ 5 คำนวณการเติบโตของรอยร้าว

กรณีรอยร้าวทะลุความหนา

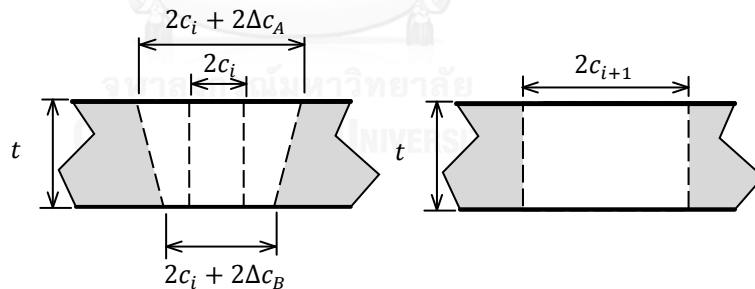
ขั้นที่ 5.1 เมื่อภาระกระทำผ่านไป  $N$  รอบ หาขนาดของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น ณ จุด A และ B เท่ากับ  $\Delta c_A$  และ  $\Delta c_B$  ตามลำดับ ด้วยสมการ 4.63 และ 4.64

$$\frac{d(2c_A)}{dN} = f(\Delta K_A) \quad (4.63)$$

$$\frac{d(2c_B)}{dN} = f(\Delta K_B) \quad (4.64)$$

ขั้นที่ 5.2 เลือกขนาดของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น ( $2\Delta c$ ) จากค่ามากระหว่าง  $2\Delta c_A$  และ  $2\Delta c_B$

ขั้นที่ 5.3 ปรับขนาดรอยร้าวใหม่ ( $2c_{i+1}$ ) เมื่อความยาวรอยร้าวใหม่ เท่ากับผลบวกของความยาวรอยร้าวเดิม ( $2c_i$ ) กับความยาวรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น ( $2\Delta c$ ) ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ขนาดใหม่ของรอยร้าวทะลุความหนา

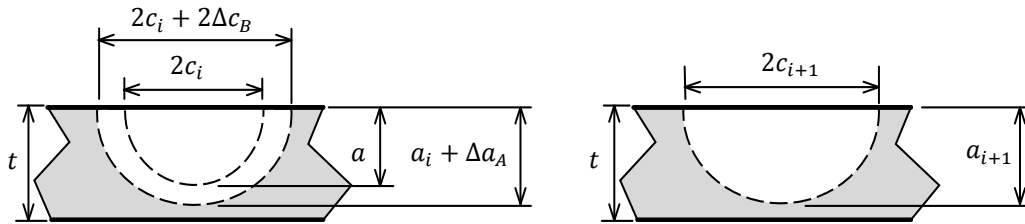
กรณีรอยร้าวผิว

ขั้นที่ 5.1 เมื่อภาระกระทำผ่านไป  $N$  รอบ หาขนาดของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น ณ จุด A และ B เท่ากับ  $2\Delta c_B$ ,  $\Delta a_A$  ตามลำดับ ด้วยสมการ 4.65 และ 4.66

$$\frac{d(2c_B)}{dN} = f(\Delta K_B) \quad (4.65)$$

$$\frac{d(a_A)}{dN} = f(\Delta K_A) \quad (4.66)$$

ขั้นที่ 5.2 คำนวณความยาวใหม่ของรอยร้าว ( $2c_{i+1}$ ) เมื่อความยาวใหม่ของรอยร้าวเท่ากับผลบวกของความยาวรอยร้าวเดิม ( $2c_i$ ) กับความยาวรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น ( $2\Delta c_B$ ) และคำนวณความลึกใหม่ของรอยร้าว ( $a_{i+1}$ ) เมื่อความลึกใหม่ของรอยร้าวเท่ากับผลบวกของความลึกรอยร้าวเดิม ( $a_i$ ) กับความลึกรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta a_A$ ) ดังรูปที่ 4.24 แนวคิดการจำลองการโตของรอยร้าวแบบนี้ให้ผลใกล้เคียงกับการโตของรอยร้าวที่ได้จากการทดลอง [55]



รูปที่ 4.24 ขนาดใหม่ของรอยร้าวผิว

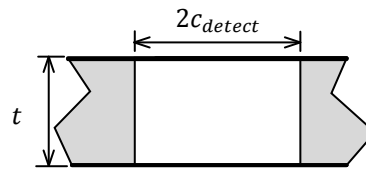
ขั้นที่ 6 ประเมินการคงสภาพของโครงสร้างที่สถานะรับภาระสูงสุดและใช้ความยาวรอยร้าวใหม่ ถ้าผลการประเมินผ่าน (ปลอดภัย) จะเริ่มทำตั้งแต่ขั้นที่ 4 อีกครั้งด้วยความยาวรอยร้าวใหม่ หากผลการประเมินไม่ผ่าน จะคำนวณจำนวนรอบทั้งหมดก่อนที่ผลการประเมินในรอบนี้จะไม่ผ่าน และถื่อนั้นคืออายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง

#### 4.7 การประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก

การประเมินนี้จำเป็นสำหรับภาวะความดัน การรื้อจะช่วยลดความดันในภาชนะ ทำให้เติบโตของรอยร้าวช้าลง การรื้อก่อนการแตกหักจะเกิดขึ้นเมื่อรอยร้าวที่พบได้เล็กกว่ารอยร้าววิกฤติ (รอยร้าววิกฤติ ในที่นี้หมายถึงขนาดรอยร้าวที่ทำให้แตกหัก) หากผลการประเมินโครงสร้างพบว่าเกิดการรื้อก่อนการแตกหัก ผู้ประเมินจะมั่นใจได้ว่าจะตรวจพบการรื้อและทำการซ่อมบำรุงโครงสร้างก่อนที่โครงสร้างจะเกิดความเสียหาย มาตรฐาน API 579 กำหนดว่าการประเมิน LBB สามารถทำควบคู่กับการประเมินการคงสภาพระดับ 2 และระดับ 3 รายละเอียดการประเมิน LBB แบ่งได้ 2 กรณี คือ

- 1) กรณีพิจารณาความยาวรอยร้าว ณ อัตราการรื้อที่ตรวจพบได้

วิธีประเมินการรื้อก่อนการแตกหักทำได้โดย ประยุกต์ใช้การประเมินการคงสภาพของโครงสร้างโดยใช้ความยาวรอยร้าว ณ อัตราการรื้อที่ตรวจพบได้ (Detectable crack length,  $2c_{detect}$ ) (รูปที่ 4.25)

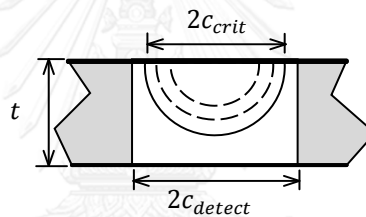


รูปที่ 4.25 ความยาวรอยร้าวที่ตรวจพบเท่ากับความยาวรอยร้าวทะเลาะความหนา

2) กรณีพิจารณาจากความยาวรอยร้าว ณ อัตราการร้าวที่ตรวจพบได้ควบคุมกับการพิจารณาการเติบโตของรอยร้าว

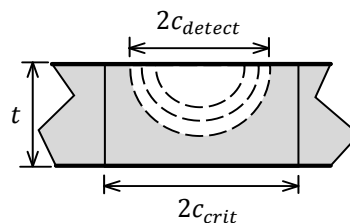
หลังจากการประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้างแล้ว ผู้ประเมินสามารถตรวจสอบการร้าวของโครงสร้างที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ได้ ความยาวรอยร้าววิกฤติ ( $2c_{crit}$ ) คือ ความยาวรอยร้าวสุดท้ายที่ผลการประเมินผ่าน

หาก  $2c_{detect}$  มีค่ามากกว่า  $2c_{crit}$  (รูปที่ 4.26) แสดงว่า ความยาวรอยร้าวที่สามารถตรวจสอบไม่เพียงพอในการตรวจสอบก่อนที่จะเกิดการแตกหัก



รูปที่ 4.26 ความยาวรอยร้าวที่สามารถตรวจพบมีค่ามากกว่าความยาวรอยร้าววิกฤติ

หาก  $2c_{detect}$  มีค่าน้อยกว่า  $2c_{crit}$  (รูปที่ 4.27) แสดงว่า การตรวจสอบรอยร้าวของโครงสร้างด้วย ความยาวรอยร้าวที่สามารถตรวจสอบนี้ เพียงพอที่ตรวจพบก่อนเกิดการแตกหักของโครงสร้าง



รูปที่ 4.27 ความยาวรอยร้าววิกฤติมีค่ามากกว่าความยาวรอยร้าวที่สามารถตรวจพบ

## 5. การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ

ในบทนี้จะกล่าวถึงในการเขียนโปรแกรมแบบต่าง ๆ , คำจำกัดความของคลาสและวัตถุ รวมทั้งแนวทางในการออกแบบโปรแกรม

### 5.1 แนวคิดการเขียนโปรแกรม

การเขียนโปรแกรมแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือการเขียนโปรแกรมเชิงกระบวนการ (procedural programming) และการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object-Oriented Programming, OOP) [56]

โครงสร้างของโปรแกรมเชิงกระบวนการ มักจะแบ่งได้ 2 ส่วน คือ ส่วนโปรแกรมหลัก (main program) ซึ่งประกาศตัวแปรสำหรับใช้ทั่วทั้งโปรแกรม (global variable) และ ส่วนโปรแกรมน้อย (procedure หรือ function) ใช้ค่าของตัวแปรในโปรแกรมหลักมาแก้ปัญหา วิธีนี้ไม่เหมาะกับการเขียนโปรแกรมขนาดใหญ่ เพราะเมื่อผู้เขียนแก้ไขโปรแกรมอาจจะเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยไม่เจตนา และอาจส่งผลให้คำตอบผิดพลาดได้

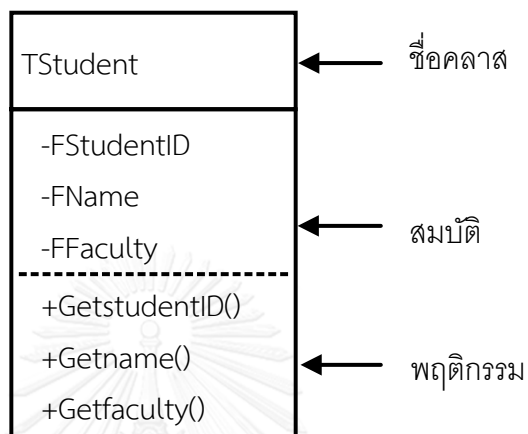
หลักการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุมีแนวคิดคือ การพิจารณาทุก ๆ สิ่งเป็นออบเจกต์ [57] ซึ่งประกาศใช้สมบัติ (attribute หรือ property) เฉพาะในแต่ละออบเจกต์ (object) เท่านั้น (ไม่ประกาศใช้ทั่วทั้งโปรแกรม) จะเข้าถึงสมบัติของออบเจกต์ผ่านทางพฤติกรรม (behavior หรือ method) ที่เฉพาะเจาะจงเท่านั้น การทำงานของโปรแกรมคือ การสื่อสารระหว่างออบเจกต์ผ่านพฤติกรรมที่กำหนด การเขียนโปรแกรมแบบนี้จะช่วยลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสมบัติภายในออบเจกต์โดยไม่ได้รับอนุญาต ทำให้การแก้ไขโปรแกรมในภายหลังทำได้สะดวกขึ้น เหมาะกับการพัฒนาโปรแกรมขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนสูง Mickie, Dubios-Pelerin [58] แสดงข้อดีของการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุในแง่ความง่ายต่อการเพิ่มความสามารถของโปรแกรม และ ความเร็วในการคำนวณของโปรแกรม

### 5.2 คลาสและวัตถุ

ออบเจกต์ที่มีลักษณะเหมือนกันถูกสร้างจากคลาส (class) เดียวกัน หรืออาจกล่าวได้ว่า คลาสเปรียบเหมือนแม่แบบ (template) ของออบเจกต์

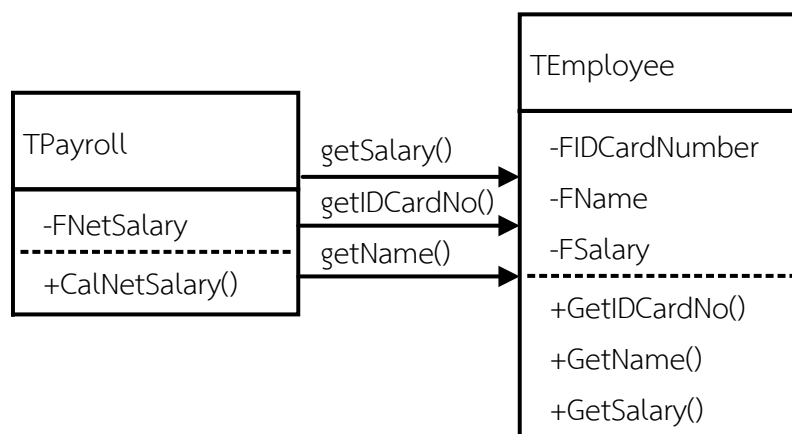
เครื่องมือที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของออบเจกต์หรือคลาส คือ แบบจำลองการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ เรียกว่า แผนภาพ (diagram) แผนภาพตามมาตรฐานของภาษาในการสร้างแบบจำลองเชิงวัตถุ (Unified Modeling Language หรือ UML) [26, 36] เรียกว่า คลาสไดอะแกรม

(class diagram) สัญลักษณ์ของคลาสแสดงด้วยกรอบสี่เหลี่ยมแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังคลาส TStudent ในรูปที่ 5.1 ส่วนบนแสดงชื่อคลาส ส่วนตรงกลางแสดงสมบัติของคลาส และส่วนล่างของสี่เหลี่ยมแสดงพฤติกรรม ออบเจกต์จะมีสมบัติและพฤติกรรมตามคลาส คลาสหนึ่งคลาสสร้างออบเจกต์ได้หลายออบเจกต์ แต่ละออบเจกต์อาจมีสมบัติที่ต่างกันซึ่งบอกเอกลักษณ์ของตัวมันเอง เช่น ออบเจกต์ Student (สร้างจากคลาส TStudent) จะมี ID ซึ่งเป็นสมบัติต่างกันออกไป



รูปที่ 5.1 สัญลักษณ์ของคลาส TStudent

การสื่อสารระหว่างออบเจกต์ สามารถทำได้ผ่านพฤติกรรม วิธีนี้ทำให้ไม่มีโอกาสแก้ไขข้อมูลใด ๆ โดยไม่เจตนา เช่น ตัวอย่างในรูปที่ 5.2 ถ้าออบเจกต์ Payroll (สร้างจากคลาส TPayroll) ต้องการคำนวณเงินเดือน calNetSalary() ซึ่งพฤติกรรมนี้ต้องการสมบัติ Salary, IdCardNo และ Name ออบเจกต์ Payroll ก็จะต้องเรียกสมบัติดังกล่าวผ่านทางพฤติกรรม ชื่อ getSalary, getIdCard(), getName() จากออบเจกต์ Employee (สร้างจากคลาส TEmployee)



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการส่งข้อความเรียกใช้พฤติกรรมระหว่างคลาส

### 5.3 เอกลักษณ์ของแนวคิดเชิงวัตถุ

เอกลักษณ์ที่ทำให้การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุต่างจากการเขียนโปรแกรมเชิงกระบวนการ คือ หลักการห่อหุ้มข้อมูล (data encapsulation), หลักการสืบทอด (inheritance), หลักการประกอบรวมกันของออบเจกต์เพื่อทำงาน (composition) และหลักการเปลี่ยนรูป (polymorphism) [26, 59]

#### 5.3.1 หลักการห่อหุ้มข้อมูล

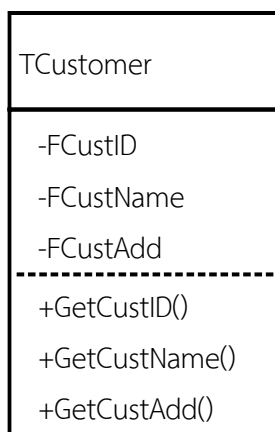
หลักการนี้ คือ การควบคุมการเข้าถึงสมบัติที่เป็นรายละเอียดของออบเจกต์นั้นด้วยการห่อหุ้มข้อมูลช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงข้อมูลจากออบเจกต์อื่นโดยไม่ตั้งใจ

หลักการห่อหุ้มข้อมูลมีระดับการเข้าถึง 3 ระดับ คือ 1) ระดับสาธารณะ (public) ใช้สำหรับกรณียอมให้ออบเจกต์ใด ๆ เข้าถึงสมบัติและพฤติกรรมของออบเจกต์ได้ ระดับนี้เป็นช่องทางที่ออบเจกต์ใช้สื่อสารกัน มีสัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับสาธารณะคือ เครื่องหมายบวก (+) ในรูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างการมองเห็นพฤติกรรมในระดับสาธารณะ, 2) ระดับป้องกัน (protected) ใช้สำหรับป้องกันออบเจกต์อื่นยกเว้นออบเจกต์จากคลาสลูกเข้าถึงข้อมูล สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับป้องกันคือ เครื่องหมายสี่เหลี่ยม (#) และ 3) ระดับเฉพาะที่ (private) ใช้สำหรับป้องกันออบเจกต์อื่นไม่ให้เข้าถึงข้อมูลของอีกออบเจกต์หนึ่ง สัญลักษณ์แสดงระดับเฉพาะที่คือ เครื่องหมายลบ (-) ในรูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างการมองเห็นคุณลักษณะในระดับเฉพาะที่

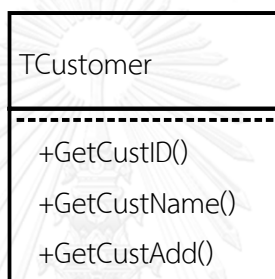
หลักการห่อหุ้มข้อมูลก่อให้เกิดการมองออบเจกต์ได้ 2 มุม คือ มองออบเจกต์จากภายในและมองออบเจกต์จากภายนอก ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบมุมมองการเข้าถึงข้อมูลระดับต่าง ๆ รูปที่ 5.3 และ รูปที่ 5.4 แสดงตัวอย่างระดับการมองเห็นรายละเอียดต่าง ๆ เมื่อมองออบเจกต์จากภายในและภายนอกตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบมุมมองการเข้าถึงระดับข้อมูล

ระดับการเข้าถึง	มองออบเจกต์จากภายใน	มองออบเจกต์จากภายนอก
ระดับเฉพาะที่	เข้าถึงได้	เข้าถึงไม่ได้
ระดับป้องกัน	เข้าถึงได้	เข้าถึงได้เมื่อเป็นออบเจกต์ที่สืบทอด
ระดับสาธารณะ	เข้าถึงได้	เข้าถึงได้



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างระดับการมองเห็นรายละเอียดต่าง ๆ เมื่อมองออบเจกต์จากภายใน



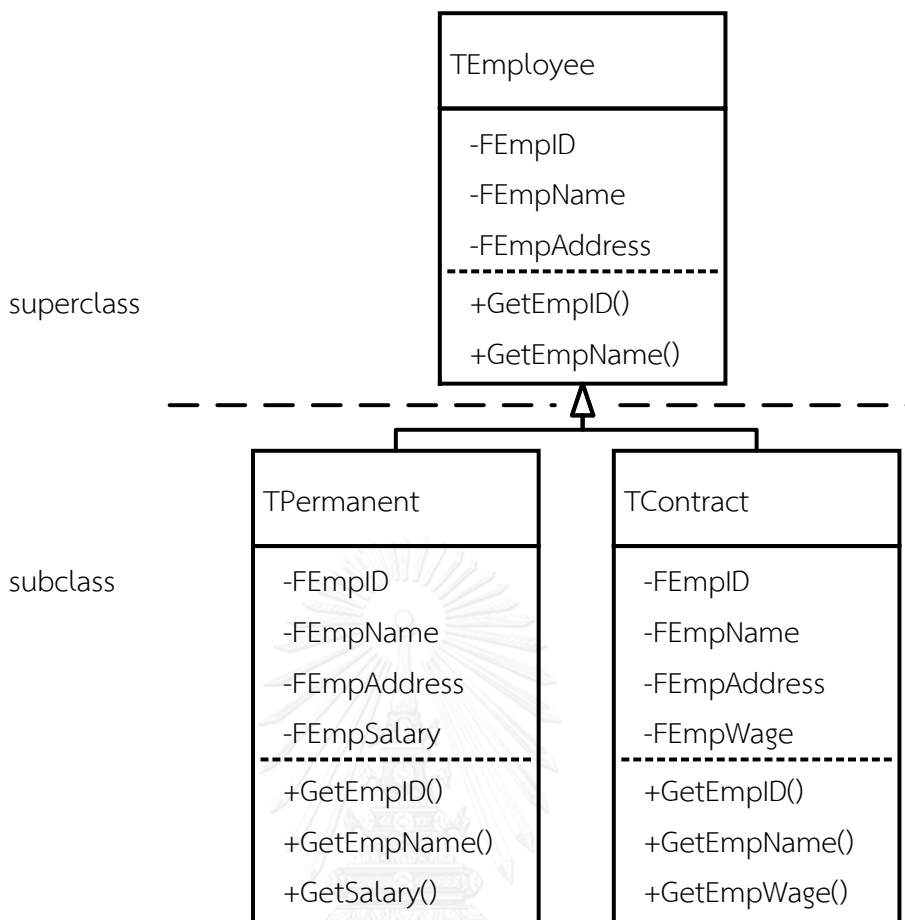
รูปที่ 5.4 ตัวอย่างระดับการมองเห็นรายละเอียดต่าง ๆ เมื่อมองออบเจกต์จากภายนอก

### 5.3.2 หลักการสืบทอด

หลักการนี้ คือ การนำโปรแกรมที่เขียนไว้แล้วกลับมาใช้ใหม่ (reuse) เพื่อลดระยะเวลาในการเขียนโค้ด แต่ก็สามารถแก้ไขหรือเพิ่มเติมคุณลักษณะและพฤติกรรมได้ ความสัมพันธ์ระหว่างคลาสทั้งสองเรียกว่า “Is-A Relationship” คลาสลูก (subclass) เป็นประเภทหนึ่งของคลาสแม่ (superclasee) รูปที่ 5.5 แสดงการสืบทอด คลาส TPermanent และคลาส TContract จากคลาส TEmployee จะเห็นว่าคลาสลูกทั้งสองเหมือนคลาสแม่ทุกประการ แต่คลาส TPermanent เพิ่มเติมสมบัติ FEmpSalary และพฤติกรรม GetSalary ด้วย เป็นต้น

ข้อดีของหลักการสืบทอดคือ 1) ประหยัดเวลาในการเขียนโปรแกรม เพราะไม่ต้องมีการประกาศสมบัติและพฤติกรรมซ้ำ 2) ถ้าแก้ไขหรือปรับปรุงความสามารถของคลาส จะส่งผลถึงคลาสลูกเลย ไม่จำเป็นต้องแก้ไขในทุก ๆ คลาส 3) เป็นประโยชน์ต่อหลักการเปลี่ยนรูปซึ่งจะกล่าวต่อไป อย่างไรก็ตาม หลักการนี้ก็ยังมีข้อเสียของหลักการสืบทอดคือ ทำให้การควบคุมการเข้าถึงสมบัติมีข้อบกพร่อง [56]





รูปที่ 5.5 ตัวอย่างแผนภาพจำลองการสืบทอดของคลาส

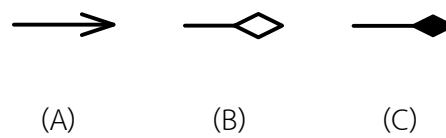
### 5.3.3 การทำงานร่วมกันของออบเจกต์

หลักการนี้มองความสัมพันธ์ระหว่างคลาสหรือออบเจกต์ในลักษณะของการเป็นส่วนประกอบ มีความสัมพันธ์แบบ “Has-A Relationship” ความสัมพันธ์แบ่งเป็น 3 แบบ คือ 1) แบบเกี่ยวข้งกัน (association), 2) แบบมีส่วนร่วม (aggregation) และ 3) แบบส่วนประกอบ (composition)

การเกี่ยวข้งกัน คือ ความสัมพันธ์ระหว่างคลาสหรือออบเจกต์ที่อยู่ในระดับเดียวกัน ไม่มีคลาสใดเป็นองค์ประกอบของคลาสใด ใช้สัญลักษณ์เส้นตรงมีหัวลูกศรดังรูปที่ 5.6 (A)

การมีส่วนร่วม คือ ความสัมพันธ์ระหว่างคลาสหรือออบเจกต์ที่อยู่ในต่างระดับกัน คลาสหนึ่งเป็นองค์ประกอบของอีกคลาสหนึ่ง ใช้สัญลักษณ์เส้นตรงหัวข้างแหลมตัดโปรงดังรูปที่ 5.6 (B)

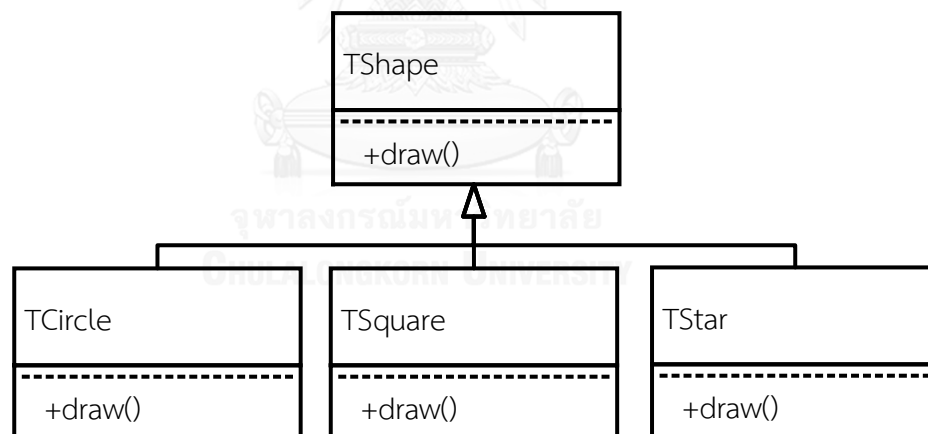
การมีส่วนประกอบ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างคลาสหรือออบเจกต์ที่มีระดับขึ้นแก่กัน หากคลาสหลักถูกทำลาย คลาสย่อยก็จะถูกทำลายไปด้วย ใช้สัญลักษณ์เส้นตรงหัวข้างแหลมตัดทึบดังรูปที่ 5.6 (C)



รูปที่ 5.6 สัญลักษณ์ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลาสหรือออบเจกต์

### 5.3.4 หลักการเปลี่ยนรูป

หลักการนี้หมายถึง การที่วัตถุสามารถแสดงพฤติกรรมแตกต่างภายใต้ชื่อพฤติกรรมเดียวกัน หลักการเปลี่ยนรูปอาศัยหลักการทำงานของการสืบทอด ตัวอย่างดังรูปที่ 5.7 คลาส TShape เป็นคลาสแม่สืบทอดสมบัติระดับป้องกันและระดับสาธารณะไปยังคลาสลูก ทั้งคลาส TCircle, คลาส TSquare และคลาส TStar คลาสลูกทั้งสามมีชื่อพฤติกรรม draw เหมือนกัน การเรียกใช้งานผ่านทางพฤติกรรม draw() และ ระบุคลาสลูกที่จะใช้งานผ่านพารามิเตอร์ที่ต่างกัน เช่น คำสั่ง draw() ในคลาส TCircle ต้องการพารามิเตอร์รัศมีเป็นข้อมูลขาเข้า ในขณะที่ ในคลาส TSquare ต้องการค่าความยาวและความสูงของสี่เหลี่ยม



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างหลักการเปลี่ยนรูป

## 6. การออกแบบซอฟต์แวร์

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโปรแกรม เริ่มจาก เขียนรายละเอียดของปัญหา, รายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้, ออกแบบโครงสร้างโปรแกรม และผลการออกแบบ

### 6.1 การกำหนดขีดความสามารถของซอฟต์แวร์

วิทยานิพนธ์นี้จะพัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพของโครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอกที่มีรอยร้าวเท่านั้น ซอฟต์แวร์รองรับการระบุภูมิที่ตั้ง

ตารางที่ 6.1 รองรับภาระทุติยภูมิ ได้แก่ ความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิและความเค้นตกค้าง ในรูปของโปรไฟล์ความเค้น (ในทิศความหนาของภาชนะ) ซึ่งกระจายด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับสี่

ซอฟต์แวร์รองรับการประเมินการคงสภาพของโครงสร้าง, การประเมินอายุใช้งานที่เหลือและการประเมินร้าวก่อนแตกหักได้ การประเมินแต่ละชนิดขึ้นกับระดับของการประเมินดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 ภาระภูมิที่ตั้งที่ซอฟต์แวร์รองรับ

แนวรอยร้าว	ชนิดรอยร้าว		ภาระภูมิที่ตั้ง			
	ทะลุความหนา	ผิว*	ความดัน	แรงดึงแนวแกน	โมเมนต์ดัด	โปรไฟล์ความเค้น**
ตามแนวยาว	○	-	○	-	-	-
	-	○	○	-	-	-
	-	○	-	-	-	○
ตามแนวเส้นรอบวง	○	-	○	○	○	-
	-	○	○	○	-	-
	-	○	-	-	-	○

\* ครอบคลุมรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีที่เกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกและผิวด้านใน

\*\* โปรไฟล์ความเค้น แทนด้วยโพลีโนเมียลอันดับสี่

○ ซอฟต์แวร์สามารถประเมินได้

- ซอฟต์แวร์สามารถประเมินได้

ตารางที่ 6.2 ชนิดของการวิเคราะห์ในการประเมินแต่ละระดับ

ชนิดของการวิเคราะห์	ระดับการประเมิน		
	1	2	3B
ประเมินการคงสภาพ	○	○	○
ประเมินการรื้อก่อนแตกหัก	-	○	○
ประเมินอายุใช้งานที่เหลือ	-	-	○

## 6.2 เครื่องมือ

การพัฒนาซอฟต์แวร์จะใช้ภาษา Delphi คอมไพเลอร์ชั้น XE6 ของบริษัท Embarcadero ทำงานบน Microsoft Windows 8.1 32 bit, ข้อมูลจำเพาะของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ดำเนินการ คือ CPU Intel Core i5 M460, RAM 2 GB

เหตุผลที่เลือก Delphi เป็นเครื่องมือพัฒนา เพราะเป็นโปรแกรมชนิด visual programming ผู้ใช้โปรแกรมไม่จำเป็นต้องมีความรู้เรื่องโค้ดก็สามารถใช้งานได้ มีข้อดีคือ โปรแกรมนี้รองรับการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ และแนวทางการเขียนโปรแกรมแบบ Event Driven คือ การเขียนคำสั่งต่าง ๆ เพื่อรองรับเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นกับโปรแกรม

## 6.3 การออกแบบโครงสร้างโปรแกรม

เนื่องจากการทำงานของโปรแกรมเชิงวัตถุ เกิดจากการประสานงานระหว่างคลาส ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมจึงต้องเริ่มจากการระบุคลาส และระบุการประสานงานระหว่างคลาส ผลลัพธ์สามารถแสดงในรูปของแผนภาพคลาส

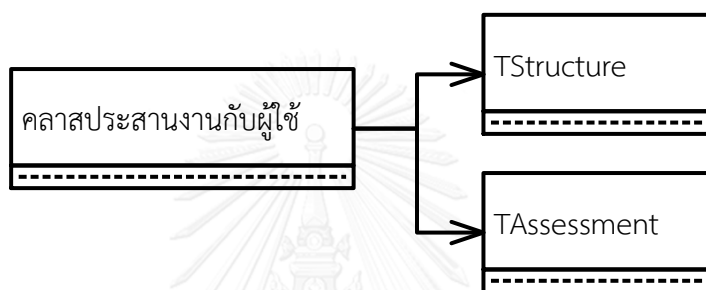
การระบุคลาสจะเริ่มจากคลาสหลักซึ่งครอบคลุมกว้างก่อน จากนั้นจึงระบุคลาสที่เจาะจงยิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะเชื่อมโยงกันด้วยแนวคิดของการสืบทอด การเป็นส่วนประกอบ และการมีส่วนร่วม

ถัดไป จะระบุสมบัติและพฤติกรรมของแต่ละคลาส โดยระหว่างนี้อาจมีการปรับเปลี่ยนคลาสหรือความสัมพันธ์ระหว่างคลาส กระบวนการนี้จะวนซ้ำจนกระทั่งแน่ใจว่าแผนภาพคลาสสามารถทำงานที่กำหนดได้

สุดท้ายคือ การตรวจสอบความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มขีดความสามารถของโปรแกรม เช่นเดียวกันในขั้นตอนนี้อาจทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนคลาส หรือความสัมพันธ์ระหว่างคลาส เช่นกัน กระบวนการนี้จะวนซ้ำจนแน่ใจว่าแผนภาพคลาสสามารถรองรับการเพิ่มขีดความสามารถได้ในระดับที่น่าพอใจ

### 6.3.1 การระบุคลาสหลัก

คลาสหลักของโปรแกรมมี 3 คลาส คือ 1) คลาสสำหรับต่อประสานงานกับผู้ใช้ (Graphical User Interface, TGUI), 2) คลาส TStructure และ 3) คลาส TAssessment ซึ่งสัมพันธ์กันดังรูปที่ 6.1 คลาส TGUI จะต่อประสานกับผู้ใช้ เพื่อรับข้อมูล รับคำสั่ง และแสดงผล คลาส TStructure จะจัดเก็บข้อมูล และคำนวณสถานะการรับภาระของโครงสร้าง สุดท้ายคลาส TAssessment จะนำข้อมูลของโครงสร้างมาประมวลตามลำดับขั้นที่แนะนำในมาตรฐาน API 579 ออบเจกต์ของคลาส TGUI จะใช้งานออบเจกต์ของคลาส TStructure และ คลาส TAssessment ตามรายละเอียดการประเมินที่ผู้ใช้กำหนด รายละเอียดของแต่ละส่วนหลักจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อถัดจากนี้

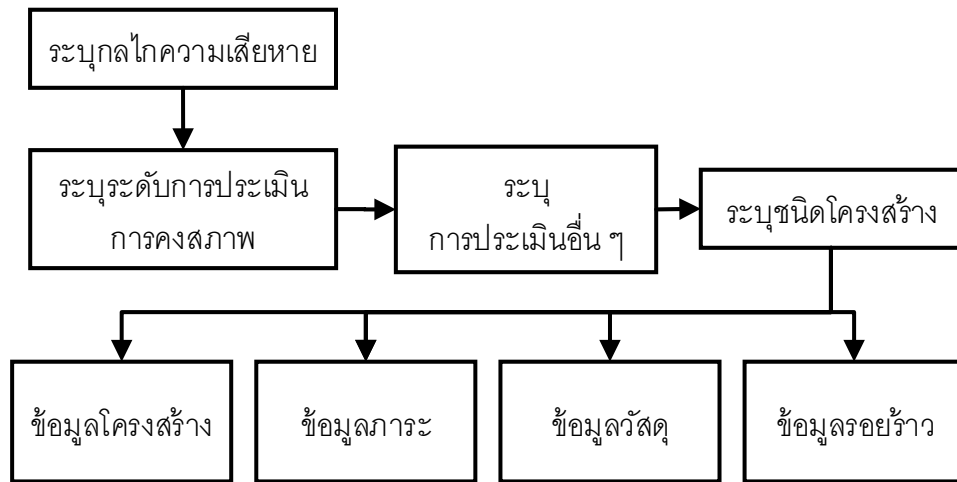


รูปที่ 6.1 คลาสหลักของโปรแกรม

### 6.3.2 คลาสต่อประสานงานกับผู้ใช้

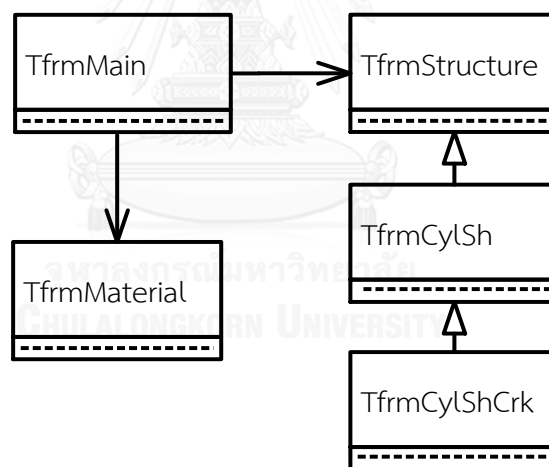
มาตรฐาน API 579 ความเสียหายจากหลากหลายกลไก กลไกความเสียหายที่ต่างกันมีระดับการประเมินที่ทำได้ต่างกัน การประเมินการคงสภาพของแต่ละระดับต้องใช้รายละเอียดของข้อมูลที่ต่างกัน ดังนั้น ลำดับการระบุข้อมูลจะเริ่มจาก ระบุกลไกความเสียหาย แล้วจึงระบุระดับการประเมินการคงสภาพ

เนื่องจากโปรแกรมนี้ต้องสามารถประเมินการคงสภาพ, ประเมินอายุใช้งานที่เหลือ และประเมินร่วก่อนแตกหัก การประเมินแต่ละประเภทต้องการข้อมูลต่างกัน เช่น การประเมินการคงสภาพต้องการข้อมูลภาระใช้งานปัจจุบัน, การประเมินอายุใช้งานที่เหลือต้องการข้อมูลภาระที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ขณะที่การประเมินการร่วก่อนแตกหักต้องการข้อมูลความยาวรอยร้าวที่สามารถตรวจพบได้ ดังนั้น ควรระบุประเภทของการประเมินก่อน จากนั้นจึงระบุรายละเอียดของข้อมูลตามลำดับในรูปที่ 6.2 เริ่มจากระบุกลไกความเสียหาย ซึ่งในที่นี้พิจารณาเฉพาะรอยร้าว, ระดับการประเมินการคงสภาพ และระบุข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ข้อมูลโครงสร้าง, ภาระ, วัสดุ และรอยร้าว



รูปที่ 6.2 ลำดับการระบุข้อมูลของโปรแกรม

วิทยานิพนธ์นี้คลาสสำหรับต่อประสานงานกับผู้ใช้แบ่งเป็น 3 คลาสย่อย ได้แก่ คลาส TfrmMain, TfrmStructure และ TfrmMaterial ซึ่งสัมพันธ์กันดังรูปที่ 6.3 จากรูปมีการสืบทอดคลาส TfrmCylSh และ TfrmCylShCrk

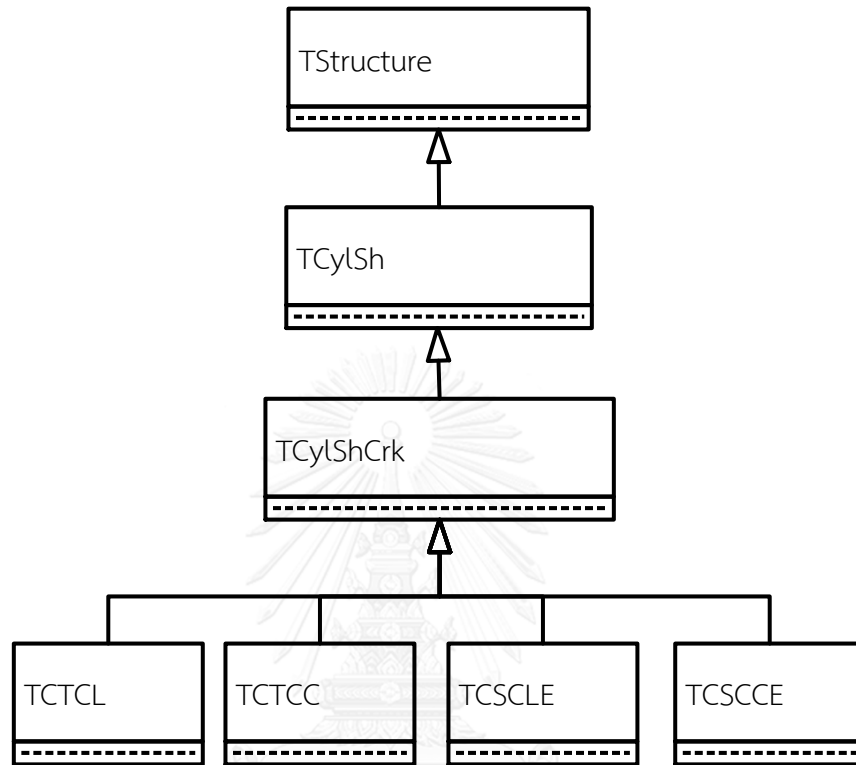


รูปที่ 6.3 คลาสเกี่ยวกับการต่อประสานกับผู้ใช้

### 6.3.3 คลาส TStructure

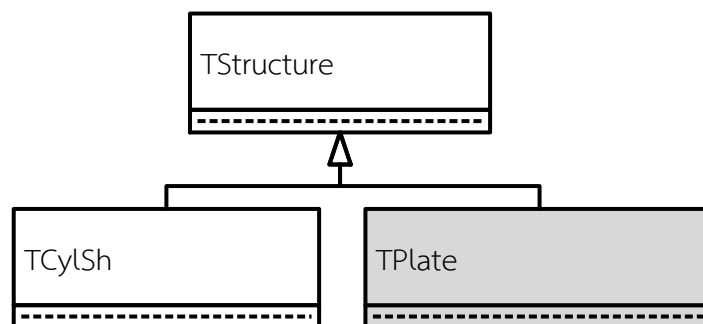
คลาส TStructure มีหน้าที่เก็บข้อมูลของโครงสร้าง วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาโครงสร้างรูปทรงกระบอกเท่านั้น จึงสืบทอดคลาสภาชนะทรงกระบอก (TCylSh) จากคลาส TStructure นอกจากนี้ยังสนใจเพียงภาชนะทรงกระบอกที่มีรอยร้าว จึงสืบทอดคลาสทรงกระบอกมีรอยร้าว (TCylShCrack) จากคลาส TCylSh นอกจากนี้ยังเพิ่มคลาส TCTCL, TCTCC, TCSCLE และ TCSCCE สำหรับกรณีรอยร้าวทะเลความหนาว่างตัวตามแนวยาว, รอยร้าวทะเลความหนาว่างตัวตาม

แนวเส้นรอบวง, รอยร้าวผิววางตัวตามแนวยาว และรอยร้าวผิววางตัวตามแนวเส้นรอบวง ตามลำดับ โดยคลาสทั้งสี่นี้ สืบทอดจากคลาส TCylShCrack การดำเนินการในคลาสเกี่ยวข้องกับการคำนวณ  $K$ , ความเค้นเมมเบรน, ความเค้นดัด และความเค้นอ้างอิง แผนภาพคลาสจึงมีลักษณะดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แผนภาพคลาส TStructure เมื่อพิจารณาเรื่องรูปร่าง และตำหนิ

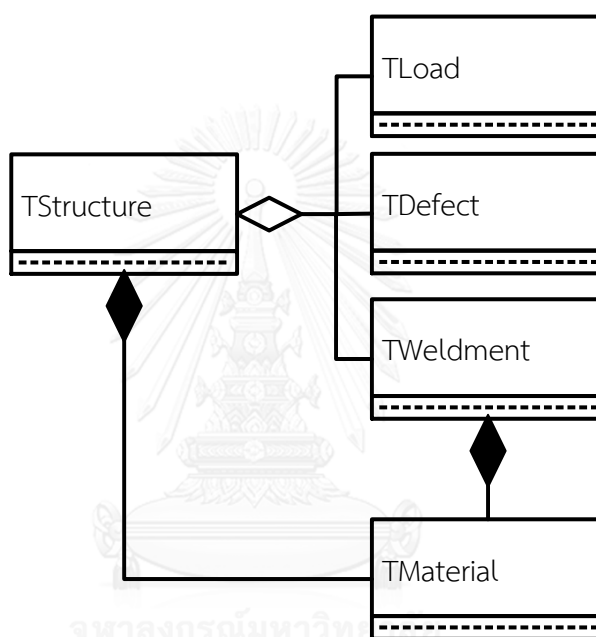
โครงสร้างคลาสในรูปที่ 6.4 สามารถรองรับโครงสร้างอื่น ๆ ได้ โดยสืบทอดโครงสร้างชนิดใหม่ จากคลาส TStructure ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 แผนภาพปรับคลาส TStructure ที่มีคลาสสืบทอด TPlate

พิจารณาคلاس TStructure อีกครั้ง ถึงแม้ว่าคลาสนี้จะไม่ได้เจาะจงว่าเป็นโครงสร้างรูปร่างหรือชนิดใด แต่ทุกโครงสร้างต้องทำจากวัสดุเสมอ ดังนั้นจึงเพิ่มคลาสวัสดุ (TMaterial) ให้เป็นส่วนประกอบคลาสด TStructure

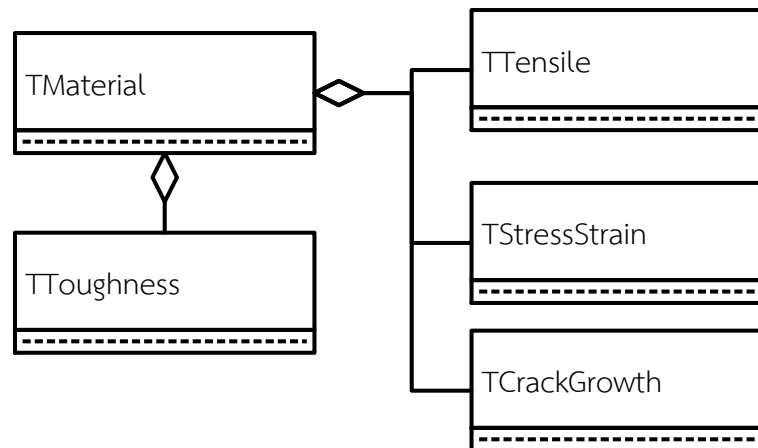
อย่างไรก็ดี โครงสร้างอาจจะรับภาระ มีรอยบกพร่อง หรือมีรอยเชื่อม หรือไม่ได้ ดังนั้นจึงเพิ่มคลาสภาระ (TLoad) คลาสตำหนิ (TDefect) และคลาสรอยเชื่อม (TWeldment) ให้สัมพันธ์กับคลาสด TStructure ในแบบมีส่วนร่วมนอกจากนี้ รอยเชื่อมก็เป็นวัสดุชนิดหนึ่ง ดังนั้นจึงมีคลาส TMaterial เป็นส่วนประกอบ แผนภาพคลาสดที่ได้จึงมีลักษณะดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 แผนภาพคลาสด TStructure เมื่อเพิ่มการพิจารณาเรื่องวัสดุ ภาระ ตำหนิ และรอยเชื่อม

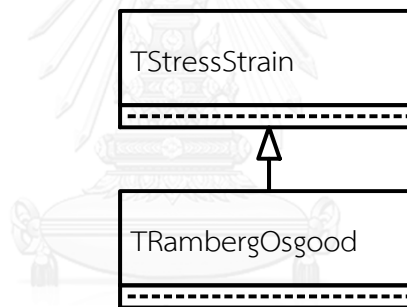
คลาสด TMaterial ทำหน้าที่เก็บข้อมูลสมบัติของวัสดุ ซึ่งหลัก ๆ แล้วประกอบด้วย สมบัติแรงดึง ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด ความต้านทานการแตกหัก และการเติบโตของรอยร้าว ดังนั้นจึงเพิ่มคลาส TTensile, TStressStrain, TToughness และ TCrackGrowth สำหรับกรณีทั้งสิ้นตามลำดับ คลาสดทั้งสี่ถูกกำหนดให้เป็นส่วนร่วมของคลาสด TMaterial ดังรูปที่ 6.7





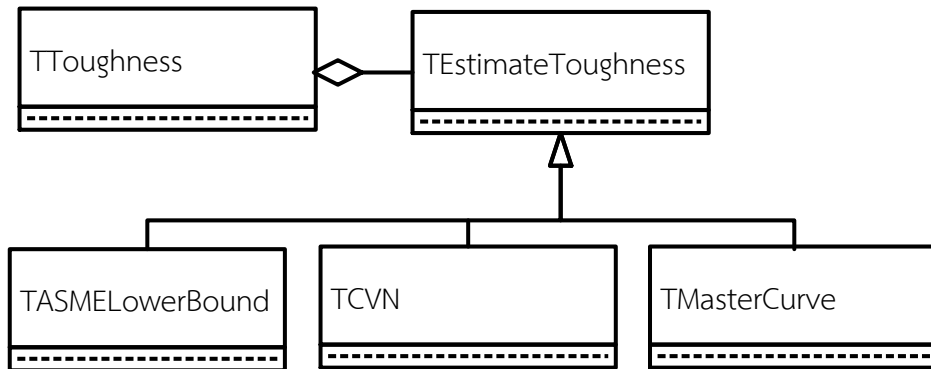
รูปที่ 6.7 แผนภาพคลาส TMaterial เมื่อพิจารณาประเภทของสมบัติของวัสดุ

ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด อาจอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของ Ramberg-Osgood ดังนั้นจึงเพิ่มคลาส TRambergOsgood ให้สืบทอดจากคลาส TStressStrain ดังรูปที่ 6.8



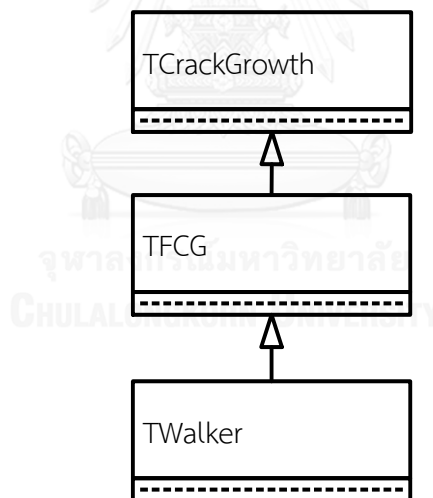
รูปที่ 6.8 แผนภาพคลาส TStressStrain ที่มีคลาสสืบทอด

ความต้านทานการแตกหัก อาจหาได้โดยตรงจากการทดลอง หรือประมาณจากค่าอื่น เช่น การประมาณจากเส้นโค้งขอบเขตล่างของ ASME, การประมาณจากค่าชาร์ปี และ การประมาณโดยใช้ Master Curve ดังนั้นจึงเพิ่มคลาส TASMELowerBound ,TCVN และ TMasterCurve สำหรับกรณีทั้งสาม ตามลำดับ ให้สืบทอดจากคลาส TEstimateToughness ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคลาส TToughness แบบมีส่วนร่วม ดังรูปที่ 6.9



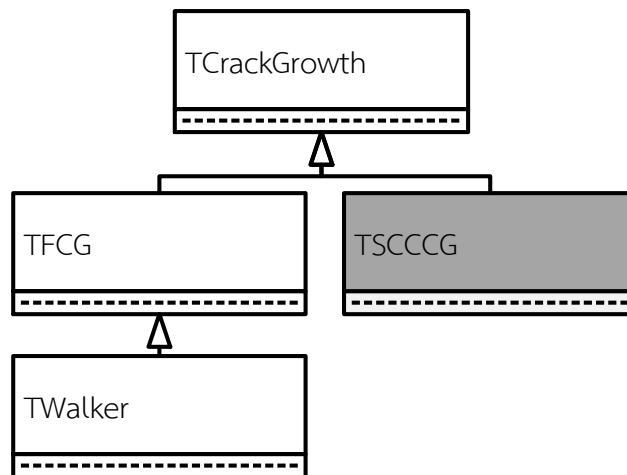
รูปที่ 6.9 แผนภาพคลาส TToughness และ TEstimateToughness ที่มีคลาสสืบทอด

รอยร้าวสามารถเติบโตได้จากหลายสาเหตุ วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเหล่านั้น ดังนั้นจึงเพิ่มคลาส TFCG ให้สืบทอดจากคลาส TCrackGrowth อัตราการเติบโตของรอยร้าวถ้าอาจอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของ Walker ดังนั้นจึงเพิ่มคลาส TWalker ให้สืบทอดจากคลาส TFCG ดังรูปที่ 6.10



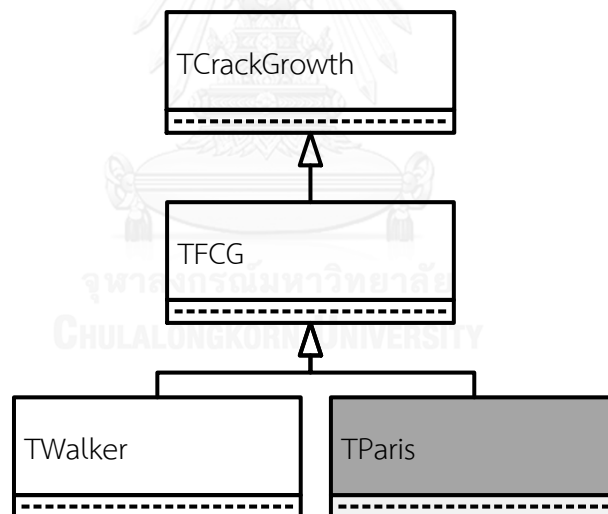
รูปที่ 6.10 แผนภาพคลาส TCrackGrowth ที่มีคลาสสืบทอด

โครงสร้างคลาสใน รูปที่ 6.10 สามารถรองรับสาเหตุการโตของรอยร้าวความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนได้ โดยสืบทอดคลาส TSCCG จากคลาส TCrackGrowth ดังรูปที่ 6.11



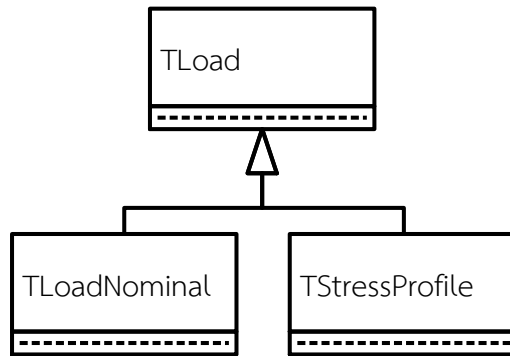
รูปที่ 6.11 แผนภาพปรับคลาส TCrackGrowth ที่มีคลาสสืบทอด TSCCCG

โครงสร้างคลาสใน รูปที่ 6.10 สามารถรองรับสมการจำลองการโตของรอยร้าวของ Paris ได้ โดยสืบทอดคลาส TParis จากคลาส TFCG ดังรูปที่ 6.12



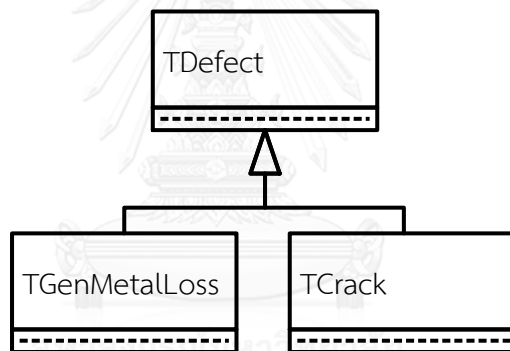
รูปที่ 6.12 แผนภาพปรับคลาส TCrackGrowth ที่มีคลาสสืบทอด TParis

ภาระที่กระทำกับโครงสร้างอาคารระบุในรูปของภาระระบุ เช่น แรงแนวแกน โมเมนต์ ความดัน หรือในรูปของโปรไฟล์ความเค้น (ในทิศความหนาของภาชนะ) ดังนั้นจึงเพิ่มคลาส TLoadNominal และคลาส TStressProfile สำหรับกรณีทั้งสอง ตามลำดับ และให้สืบทอดจากคลาส TLoad ดังใน รูปที่ 6.13



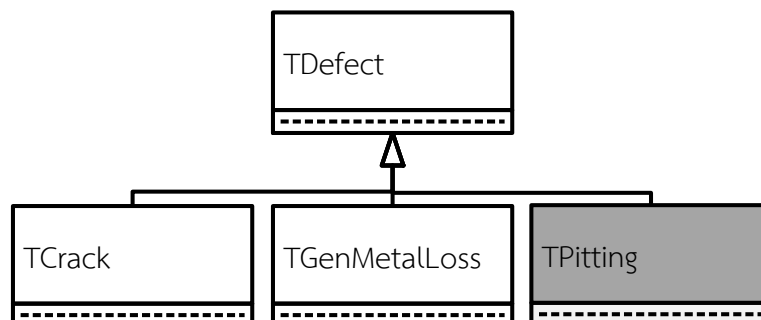
รูปที่ 6.13 แผนภาพคลาส TLoad ที่มีคลาสสืบทอด

ตำหนิในโครงสร้างอาจอยู่ในรูปของการผุกร่อนสม่ำเสมอ (uniform metal loss) หรือรอยร้าว ดังนั้นจึงเพิ่มคลาส TGenMetalLoss และคลาส TCrack สำหรับกรณีทั้งสอง ตามลำดับ และให้สืบทอดจากคลาส TDefect ดังรูปที่ 6.14



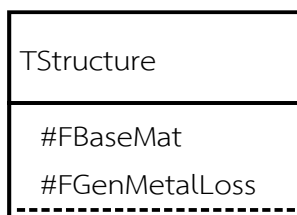
รูปที่ 6.14 แผนภาพคลาส TDefect ที่มีคลาสสืบทอด

หากพิจารณาการเพิ่มขีดความสามารถของโปรแกรมให้ประเมินกลไกความเสียหายแบบรูเข็มทำได้โดยเพิ่มคลาส TPitting ให้สืบทอดจากคลาส TDefect ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 แผนภาพปรับคลาส TDefect ที่มีคลาสสืบทอด TPitting

ข้อมูลที่อยู่ในคลาส TStructure เป็นข้อมูลทั่วไปที่ไม่ขึ้นกับชนิดโครงสร้าง เช่น ข้อมูลวัสดุหลักของโครงสร้าง และข้อมูลการผูกเงื่อนไขเสมอ คลาสนี้จึงสร้างออบเจกต์ FBaseMat และ FGenMetalLoss จากคลาส TMaterial และ TGenMetalLoss ตามลำดับ เพื่อใช้เก็บข้อมูลดังกล่าว คลาส TStructure แสดงได้ดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 สมบัติในคลาส TStructure

ข้อมูลวัสดุที่ถูกกำหนดได้ทันทีโดยไม่จำเป็นต้องรู้ระดับการ ได้แก่ ชื่อเฉพาะ, หมายเลขกลุ่ม, คลาส, P-No., Exemption curve และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุ ส่วนข้อมูลวัสดุอื่น ๆ เช่น สมบัติแรงดึง สมบัติความต้านทานการแตกหัก และสมบัติการเติบโตของรอยร้าวจะถูกระบุหากต้องการใช้เท่านั้น

การประเมินแต่ละระดับต้องการข้อมูลวัสดุต่างกัน โดยออบเจกต์ FBaseMat ดำเนินการตามระดับการประเมิน เช่น หากประเมินการคงสภาพระดับ 3B ข้อมูลวัสดุที่ต้องใช้ คือ ข้อมูลสมบัติแรงดึง และสมบัติความต้านทานการแตกหัก ออบเจกต์ FBaseMat จะสร้างออบเจกต์ FTensile จากคลาส TTensile, สร้างออบเจกต์ FToughness จากคลาส TToughness วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดในรูปแบบความสัมพันธ์ของ Ramberg-Osgood เท่านั้น ออบเจกต์ FBaseMat จะสร้างออบเจกต์ FStressStrain จากคลาส TRambergOsgood แต่หากมีการประเมินอายุใช้งานที่เหลือนด้วย วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาอัตราการเติบโตของรอยร้าวในรูปแบบความสัมพันธ์ของ Walker ออบเจกต์ FCrackGrowth จะถูกสร้างจากคลาส TWalker กรณีประเมินการคงสภาพในระดับ 1 และ 2 ก็เป็นไปในทำนองเดียวกัน ซึ่งสรุปดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ออบเจกต์จากคลาสที่เกี่ยวข้องกับคลาส TMaterial

ออบเจกต์ถูกสร้าง จากคลาส	ออบเจกต์ในประเมนการกรณีต่างๆ			
	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3B	ประเมินอายุใช้งานที่เหลือ
TTensile	FTensile	FTensile	FTensile	FTensile
TToughness	-	FToughness	FToughness	FToughness
TRambergOsgood	-	-	FStressStrain	FStressStrain
TWalker	-	-	-	FCrackGrowth

กรณีที่ออบเจกต์ FToughness ถูกสร้างขึ้น ออบเจกต์นี้มีสมบัติเก็บค่าความต้านทานการแตกหัก (FValue) หากค่าความต้านทานการแตกหักหาได้จากการทดลองโดยตรง ค่า FValue จะถูกกำหนดค่าได้ทันที แต่หากค่าความต้านทานการแตกหักหาได้จากการประมาณ ออบเจกต์ FToughness จะสร้างออบเจกต์ FToughnessEst จากคลาสใดคลาสหนึ่งที่สืบทอดจากคลาส TEstimateToughness ซึ่งคือ TASMELowerBound , TCVN หรือ TMasterCurve หลังจาก FToughnessEst ถูกสร้างและกำหนดค่าต่าง ๆ แล้ว จะมีพฤติกรรมคำนวณค่าความต้านทานการแตกหัก จากนั้นจึงนำไปกำหนดค่าให้กับ FValue ของออบเจกต์ FToughness

คลาส TCylSh สืบทอดจากคลาส TStructure แต่คลาสนี้จะเพิ่มการระบุข้อมูลขนาดของโครงสร้าง เช่น พารามิเตอร์รัศมีในของท่อ (FRi) และพารามิเตอร์ความหนาของท่อ (Ft), ข้อมูลรอยเชื่อมและข้อมูลภาวะ คลาสนี้จึงสร้างออบเจกต์ FWeld จากคลาส TWeldment ดังรูปที่ 6.17

TCylSh
#FRi
#Ft
#FWeld
#ออบเจกต์ในตารางที่ 6.5

รูปที่ 6.17 สมบัติในคลาส TCylSh

กรณีประเมินการคงสภาพของโครงสร้างที่ภาระปัจจุบัน หากผู้ใช้กรอกข้อมูลภาวะระบุ คลาส TCylSh ออบเจกต์สำหรับเก็บข้อมูล ความดัน, แรงดึงแนวแกน และ โมเมนต์ดัด สร้างจาก

คลาส TLoadNominal ความเค้นจากภาระทางกลและความเค้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิ จะถูกสร้างจากคลาส TStressProfile ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ออบเจกต์ที่เกี่ยวข้องกับภาระ

ชนิดภาระ	ออบเจกต์ของภาระปัจจุบัน	ออบเจกต์ของภาระล้า	
		สถานะต่ำสุด	สถานะสูงสุด
ความดัน	FPressure	FMinPressure	FMaxPressure
แรงดึง แนวแกน	FAxialForce	FMinAxialForce	FMaxAxialForce
โมเมนต์ดัด	FBendingMoment	FMinBendingMoment	FMaxBendingMoment
ความเค้นจาก ภาระทางกล	FMechStrProfile	FMinMechStrProfile	FMaxMechStrProfile
ความเค้นจาก ความแตกต่าง ของอุณหภูมิ	FThmStrProfile	FMinThmStrProfile	FMaxThmStrProfile

คลาส TCylShCrk สืบทอดจากคลาส TCylSh คลาสนี้ต้องการระบุข้อมูลรอยร้าวจึงสร้างออบเจกต์ FCrack จากคลาส TCrack และเตรียมสมบัติและพฤติกรรมเพื่อรองรับลักษณะที่เหมือนกันที่จะสืบทอดสู่คลาส TCTCL, TCTCC, TCSCLE และ TCSCCE เช่น ตารางค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้คำนวณผลเฉลย (TablePosA, TablePosB), ฟังก์ชันคำนวณค่าประมาณในช่วงเส้น (CallInterpolation) เป็นต้น สมบัติและพฤติกรรมของคลาส TCylShCrk แสดงในรูปที่ 6.18

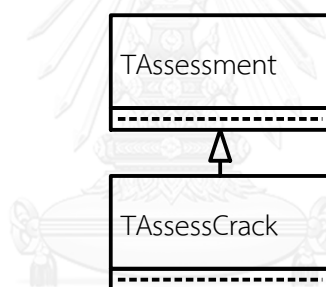
TCylShCrk
#FCrack
#TablePosA
#TablePosB
-----
#CallInterpolation

รูปที่ 6.18 สมบัติและพฤติกรรมในคลาส TCylShCrk

ในคลาส TCTCL, TCTCC, TCSCLE และ TCSCCE มีพฤติกรรม SetInfluenceCoeff เพื่อกำหนดค่าใน TablePosA และ TablePosB, พฤติกรรม CalPm เพื่อคำนวณค่าความเค้นเมมเบรน, พฤติกรรม CalPb เพื่อคำนวณค่าความเค้นดัด, พฤติกรรม CalMembrane เพื่ออ่านค่าความเค้นเมมเบรน, พฤติกรรม CalBending เพื่ออ่านค่าความเค้นดัด, พฤติกรรม CalKI เพื่อคำนวณค่า  $K$  และ พฤติกรรม CalRefStr เพื่อคำนวณค่าความเค้นอ้างอิง คลาสทั้งสี่มีพฤติกรรมเหมือนกัน แต่ พฤติกรรมในแต่ละคลาสมีฟังก์ชันที่ต่างกันไป

#### 6.3.4 คลาส TAssessment

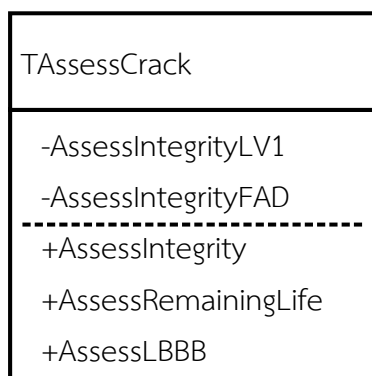
ขั้นต่อไปคือ การประมวลผล วิทยานิพนธ์นี้สนใจการประเมินกลไกความเสียหายจากรอยร้าวเท่านั้น จึงเพิ่มคลาสประเมินรอยร้าว (TAssessCrack) โดยให้สืบทอดจากคลาส TAssessment ดังรูปที่ 6.19 ออบเจกต์ Assessment ซึ่งถูกสร้างจากคลาส TAssessCrack มีพฤติกรรมประเมินการคงสภาพ, ประเมินอายุใช้งานที่เหลือ และประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก ซึ่งหลังจากประเมินแล้ว จะส่งผลไปแสดงที่คลาส GUI



รูปที่ 6.19 แผนภาพคลาส TAssessment ที่มีคลาสสืบทอด

คลาส TAssessCrack มีพฤติกรรมประเมินการคงสภาพ (AssessIntegrity), พฤติกรรมประเมินอายุใช้งานที่เหลือ (AssessRemainingLife) และพฤติกรรมประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก (AssessLBBB) พฤติกรรมทั้งสามมีระดับการมองเห็นเป็นแบบสาธารณะ ดังรูปที่ 6.20 ทั้งสามพฤติกรรมจะเรียกใช้ข้อมูลของโครงสร้างจากออบเจกต์ Structure และใช้ข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับการประเมินจากออบเจกต์ frmMain





รูปที่ 6.20 สมบัติและพฤติกรรมในคลาส TAssessCrack

เมื่อออกแบบเจกต์ frmMain เรียกใช้พฤติกรรม AssessIntegrity ออกแบบเจกต์ Assessment จะพิจารณาระดับการประเมินที่ถูกระบุไว้ในออกแบบเจกต์ frmMain และเลือกใช้พฤติกรรมระดับเฉพาะที่อยู่ในออกแบบเจกต์ Assessment เช่น พฤติกรรม AssessIntegrityLV1 แทนการประเมินการคงสภาพระดับ 1 หรือ พฤติกรรม AssessIntegrityFAD แทนการประเมินการคงสภาพที่ใช้แผนภาพความเสียหาย พฤติกรรมทั้งสองจะดำเนินการตามขั้นตอนในบท 4 ซึ่งประยุกต์ใช้ในซอฟต์แวร์ดังนี้

พฤติกรรม AssessIntegrityLV1 มีดังนี้

ขั้นที่ 0 ตรวจสอบเงื่อนไขการประเมินการคงสภาพระดับ 1 ด้วยพฤติกรรม CheckLimitLV1 ซึ่งเป็นพฤติกรรมระดับเฉพาะที่ของคลาส TAssessCrack

ขั้นที่ 1 เรียกภาวะและอุณหภูมิที่ทั้งที่ออกแบบและใช้งาน, ความยาวและความลึกของรอยร้าว ข้อมูลทั้งหมดของขั้นตอนนี้จากออกแบบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 2 เรียกสมบัติวัสดุจากออกแบบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 3 เลือกแผนภาพการประเมินด้วยพฤติกรรม CalAssFigure ซึ่งเป็นพฤติกรรมระดับเฉพาะที่ของคลาส TAssessCrack พฤติกรรม CalAssFigure จะพิจารณาชนิดของโครงสร้าง และแนวการวางตัวของรอยร้าวสัมพันธ์กับรอยเชื่อม แผนภาพที่ได้จะเป็นไปตามเงื่อนไขจากตารางที่ 4.7

ขั้นที่ 4 เลือก Screening Curve ด้วยพฤติกรรม CalScreeningCurve ซึ่งเป็นพฤติกรรมระดับเฉพาะที่ของคลาส TAssessCrack พฤติกรรม CalScreeningCurve จะพิจารณาตำแหน่งของรอยร้าว, สถานะ Post Weld Heat Treatment ของรอยเชื่อม, การตรวจพบรอยร้าวด้วยวิธี NDE ทำโดยบุคคลที่ผ่านการรับรองหรือไม่ นอกจากนี้ยังพิจารณาความหนาของโครงสร้าง และความลึกของรอย ตามเกณฑ์ในรูป รูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14

ขั้นที่ 5 คำนวณอุณหภูมิอ้างอิงด้วยพฤติกรรม CalTref ซึ่งเป็นพฤติกรรมระดับเฉพาะที่ของคลาส TAssessCrack พฤติกรรม CalTref คำนวณจากความสัมพันธ์ของ  $SMYS$  และ  $T_{ref}$  ของ Exemption Curve ต่าง ๆ ด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับสี่ต่อไปนี้

$$T_{ref} = \sum_{j=0}^4 C_j (SMYS^j) \quad (6.1)$$

สำหรับ Carbon Steel สัมประสิทธิ์  $C_j$  จะมีค่าแสดงดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันประมาณอุณหภูมิอ้างอิงของวัสดุ Carbon Steel

$C_j$	Exemption Curve			
	A	B	C	D
$C_0$	3.709E+02	3.499E+02	3.794E+02	2.393E+02
$C_1$	-3.903	-3.903	-4.676	-2.848
$C_2$	1.725E-02	1.725E-02	2.164E-02	1.177E-02
$C_3$	-3.528E-05	-3.528E-05	-4.626E-05	-2.279E-05
$C_4$	2.736E-08	2.736E-08	3.756E-08	1.685E-08

ขั้นที่ 6 คำนวณความยาวรอยร้าวสูงสุดที่ยอมรับได้ด้วยพฤติกรรม GetCritCrackLength ซึ่งเป็นพฤติกรรมระดับเฉพาะที่ของคลาส TAssessCrack

ขั้นที่ 7 เปรียบเทียบความยาวรอยร้าวที่วัดได้ กับ ความยาวรอยร้าวสูงสุดที่ยอมรับได้

พฤติกรรม AssessIntegrityFAD แบ่งเป็นการประเมินการคงสภาพระดับ 2 และ 3B โดยการประเมินการคงสภาพระดับ 2 มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ระบุสถานะใช้งาน ได้แก่ ความดัน, อุณหภูมิ และภาระอื่น ๆ จากออบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 2 ระบุความเค้นที่ตำแหน่งของรอยร้าว โดยเรียกพฤติกรรม CalMembrane และ CalBending จากออบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 3 ระบุสมบัติของวัสดุ เช่น ความแข็งแรงครากของวัสดุ, ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการแตกหัก จากออบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 4 ระบุความยาวรอยร้าวจากออบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 5 คำนวณตัวประกอบความปลอดภัยด้วยพฤติกรรม CalPSF ซึ่งเป็นพฤติกรรมระดับเฉพาะที่ของคลาส TAssessCrack จากนั้น ปรับแก้  $P_m$ ,  $P_b$ , ความต้านทานการแตกหักของวัสดุ และ ขนาดของรอยร้าว ด้วยพฤติกรรม CalRefStr จากคลาส TAssessCrack

ขั้นที่ 6 คำนวณความเค้นอ้างอิงปฐมภูมิ,  $\sigma_{ref}^p$  ด้วยพฤติกรรม CalRefStr จากออบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 7 คำนวณอัตราส่วนภาระปฐมภูมิ,  $L_r^p$  ด้วยพฤติกรรม CalLoadRatio ซึ่งเป็นพฤติกรรมระดับเฉพาะที่จากคลาส TAssessCrack

ขั้นที่ 8 คำนวณค่า  $K$  ของภาระปฐมภูมิ,  $K_r^p$  ด้วยพฤติกรรม CalKI จากออบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 9 คำนวณความเค้นอ้างอิงเนื่องจากภาระพหุคูณและความเค้นตกค้าง,  $\sigma_{ref}^{SR}$  ด้วยพฤติกรรม CalRefStr จากออบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 10 คำนวณค่าความเข้มของความเค้นพหุคูณและความเค้นตกค้าง,  $K_r^{SR}$  ด้วยพฤติกรรม CalKI จากออบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 11 คำนวณ plasticity interaction factor,  $\phi$  ซึ่งกำหนดค่าและถูกคำนวณ ด้วยพฤติกรรม SetPsiCoefficient และ CalPlasticityInteractionFactor ตามลำดับ พฤติกรรมทั้งสองมีระดับเฉพาะที่ของคลาส TAssessCrack

ขั้นที่ 12 คำนวณ  $K_r$  ด้วยพฤติกรรม CalKr ซึ่งเป็นพฤติกรรมระดับเฉพาะที่ของคลาส TAssessCrack

การประเมินระดับ 2 ขั้นที่ 13 พล็อตจุดประเมิน ( $L_r$ ,  $K_r$ ) บน FAD และขั้นที่ 14 การวาดเส้นโค้งความเสียหาย ถูกประยุกต์ใช้กับซอฟต์แวร์ด้วยตรรกะ ที่เปรียบเทียบค่า  $K_r$  จากขั้นที่ 12 กับค่า  $K_r$  ของเส้นโค้ง ( $K_{r,FAC}$ ) ซึ่งได้จากพฤติกรรม CalKrPlot จากคลาส TAssessCrack หากค่า  $K_r$  น้อยกว่าค่า  $K_{r,FAC}$  ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 คือ ผ่าน แต่หาก ค่า  $K_r$  มากกว่าค่า  $K_{r,FAC}$  ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 คือ ไม่ผ่าน

การประเมินการคงสภาพระดับ 3B มีดังนี้

การประเมินระดับที่ 3B มีขั้นตอนการคำนวณ ตั้งแต่ขั้นที่ 1- 13 เหมือนการประเมินระดับ 2 แต่ ขั้นตอนที่ 14 ต่างกัน คือ ต้องคิดผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ

หากไม่ทราบค่าพารามิเตอร์  $H_{RO}$  และ  $n_{RO}$  ต้องประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งสองด้วยพฤติกรรม GetHRO และ GetnRO จากออบเจกต์ Structure แต่หากทราบค่าพารามิเตอร์ทั้งสอง ก็ใช้พฤติกรรม GetBMSSROHRO และ GetBMSSRONRO จากออบเจกต์ Structure จากนั้นคำนวณค่า ความเครียดอ้างอิง ด้วยพฤติกรรม CalStrainRef จากคลาส TAssessCrack แล้วจึงคำนวณค่า  $K_{r,FAC}$  ด้วยพฤติกรรม CalKrPlot จากคลาส TAssessCrack จากนั้นจึงนำค่า  $K_r$  และ  $K_{r,FAC}$  มาเปรียบเทียบกัน หากค่า  $K_r$  น้อยกว่าค่า  $K_{r,FAC}$  ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 3B คือ ผ่าน แต่หาก ค่า  $K_r$  มากกว่าค่า  $K_{r,FAC}$  ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 3B คือ ไม่ผ่าน

พฤติกรรมประเมินอายุใช้งานที่เหลือจะประยุกต์ใช้ในซอฟต์แวร์ดังนี้

ขั้นที่ 1 ประเมินการคงสภาพของโครงสร้างระดับ 3B ด้วยพฤติกรรม AssessIntegrityFAD จากคลาส TAssessCrack ถ้าผลการประเมินผ่าน (ใช้งานได้อย่างปลอดภัย) จะกำหนดขนาดของรอยร้าวในขั้นตอนนี้เป็นขนาดรอยร้าวเริ่มต้น

ขั้นที่ 2 เรียกแบบจำลองที่จะใช้ในการคำนวณการโตของรอยร้าว และเรียกค่าคงในแบบจำลอง ข้อมูลทั้งสองจะอยู่ที่ออบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 3 เรียกภาวะสูงสุด และภาวะต่ำสุดที่กระทำกับโครงสร้าง ข้อมูลทั้งหมดของขั้นตอนนี้มาจากออบเจกต์ Structure

ขั้นที่ 4 คำนวณค่า  $\Delta K_A$  และ  $\Delta K_B$  ด้วยพฤติกรรม CalDKIRemaining จากคลาส TAssessCrack

ขั้นที่ 5 คำนวณหาอัตราการเติบโตของรอยร้าว โดยคำนวณอัตราส่วนภาวะ ด้วยพฤติกรรม CalRRatio จากคลาส TAssessCrack และคำนวณขนาดของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นด้วยพฤติกรรม CalIncreaseLength จากออบเจกต์ Structure และคำนวณจำนวนรอบที่ทำให้ความยาวหรือความลึกรอยร้าวเพิ่มขึ้น 1% นอกนั้นพิจารณาว่าขนาดของรอยร้าวใหม่จำเป็นต้องถูกเปลี่ยนชนิดหรือไม่ หากจำเป็นต้องเปลี่ยนชนิดของรอยร้าว จะใช้พฤติกรรม GetReCrkDepth, GetReCrkLength และ GetReCrkCategory จากออบเจกต์ Structure คำนวณความความลึก, ความยาวและชนิดของรอยร้าวใหม่ตามลำดับ จากนั้นจึงใช้พฤติกรรม CreateStructure2 ของออบเจกต์ frmMain สร้างรอยร้าว และกำหนดค่าให้กับรอยร้าวชนิดใหม่

ขั้นที่ 6 ประเมินการคงสภาพของโครงสร้างที่สถานะรับภาระสูงสุดและใช้ความยาวรอยร้าวใหม่ ถ้าผลการประเมินผ่าน (ปลอดภัย) จะเริ่มทำตั้งแต่ขั้นที่ 4 อีกครั้งด้วยความยาวรอยร้าวใหม่ จนกว่าผลการประเมินจะไม่ผ่าน อายุที่เหลือจะคำนวณจากจำนวนรอบทั้งหมดก่อนที่ผลการประเมินในรอบนี้จะไม่ผ่าน และถือว่านั่นคืออายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง

พฤติกรรมประเมินการรื้อก่อนการแตกหักประยุกต์ใช้ในซอฟต์แวร์ดังนี้

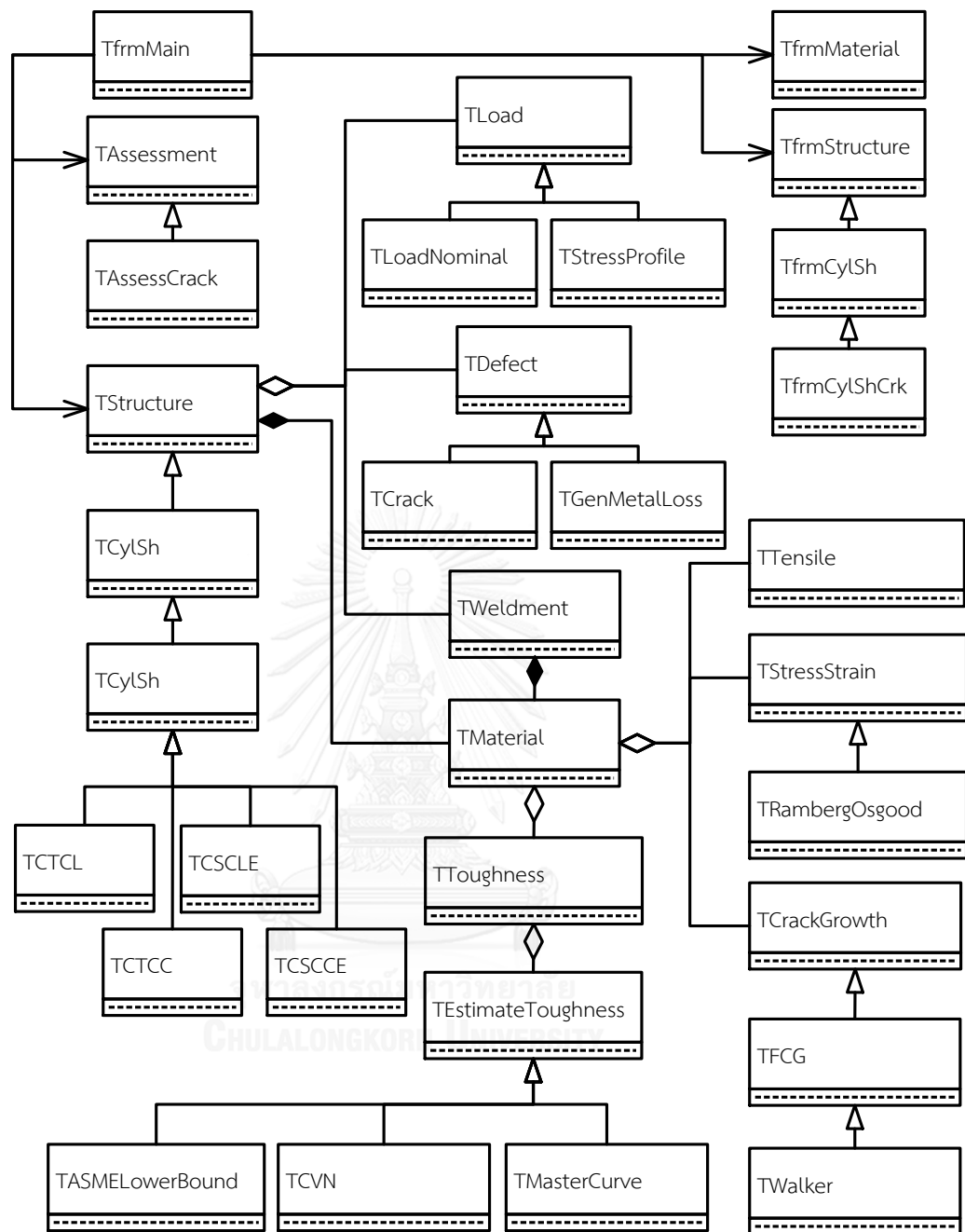
การประเมินการรื้อก่อนการแตกหักประยุกต์ใช้การประเมินการคงสภาพของโครงสร้าง โดยใช้ความยาวรอยร้าวที่สามารถตรวจพบได้ ซึ่งสมมติให้เป็นค่าความยาวรอยร้าวของชนิดทะเลความหนา หากการประเมินการคงสภาพมีผลว่า ปลอดภัย จะสรุปผลว่าโครงสร้างจะรื้อก่อนการแตกหัก แต่หากการประเมินการคงสภาพมีผลว่า ไม่ปลอดภัย จะสรุปผลว่าโครงสร้างจะไม่รื้อก่อนการแตกหัก

หากพิจารณาการประเมินอายุใช้งานที่เหลือร่วมด้วย ผู้ใช้ต้องสั่งประเมินอายุใช้งานที่เหลือก่อน การตรวจสอบชนิดของรอยร้าวบอกโดยนัยถึงสถานะการรื้อของโครงสร้าง หากโครงสร้างที่ความยาวรอยร้าวหนึ่ง ๆ เป็นความยาวรอยร้าวทะเลความหนา โครงสร้างนั้นจะถูกตัดสินว่ารื้อ แต่หากเป็น

รอยร้าวผิวแสดงว่าโครงสร้างยังไม่ร่วนนั่นเอง ความยาวรอยร้าววิกฤติ ( $2c_{crit}$ ) คือ ความยาวรอยร้าวสุดท้ายของการประเมินอายุใช้งานที่เหลือที่มีผลการประเมินการคงสภาพผ่าน จากนั้นเปรียบเทียบค่าความยาวรอยร้าวที่สามารถตรวจพบกับค่าความยาวรอยร้าววิกฤติ หาก  $2c_{detect}$  น้อยกว่า  $2c_{crit}$  แสดงว่า โครงสร้างจะรื้อก่อนการแตกหัก หาก  $2c_{detect}$  มีค่ามากกว่า  $2c_{crit}$  แสดงว่าโครงสร้างจะแตกหักก่อนรื้อ

หลังการระบุคลาส และระบุการประสานงานระหว่างคลาส จะได้โครงสร้างโปรแกรมในรูปแบบของคลาสดิอะแกรมของโปรแกรกดังรูปที่ 6.21





รูปที่ 6.21 คลาสไดอะแกรมของโปรแกรม

## 6.4 ผลการออกแบบ

### 6.4.1 คลาส TfrmMain

ออบเจกต์ของคลาส TfrmMain ชื่อ frmMain ถูกสร้างและจะแสดงเมื่อซอฟต์แวร์เริ่มทำงาน โดยส่วนต่อประสานงานกับผู้ใช้ มีลักษณะดังรูปที่ 6.22

รูปที่ 6.22 ออบเจกต์ frmMain ส่วนต่อประสานงานกับผู้ใช้

ออบเจกต์ frmMain รูปที่ 6.22 ทำหน้าที่รับข้อมูล แบ่งเป็น 1) ระบุมาตรฐานการออกแบบ และกลไกความเสียหาย, 2) ระบุระดับการประเมินการคงสภาพ, ระบุการประเมินอื่น ๆ ที่ต้องการเพิ่มเติม, 3) ระบุชนิดโครงสร้าง, 4) ส่วนแสดงผลลัพธ์ และ 5) ปุ่มประเมินผล คลาส TfrmMain มีรายละเอียดที่ผู้ใช้ต้องระบุดังนี้

ระเบียบวิธีที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง มีการแสดงผลดังรูปที่ 6.23 มีตัวเลือก คือ 1) ASME BPV Code, Section VIII, Division 1, 2) ASME BPV Code, Section VIII, Division 2, 3) ASME BPV Code, Section I และ 4) Others

โครงสร้างที่ออกแบบโดยอ้างอิง มาตรฐาน API 579 นั้นมีเพียง 3 ระเบียบวิธีการออกแบบแรกเท่านั้น หากโครงสร้างไม่ได้ถูกออกแบบตามระเบียบวิธีการดังกล่าว การประเมินการคงสภาพของโครงสร้างจะไม่ถูกรับรอง

รูปที่ 6.23 ตัวเลือกมาตรฐานการออกแบบของออบเจกต์ frmMain

มาตรฐาน API 579 ครอบคลุมการประเมินความเสียหายที่เกิดจากหลายกลไก วิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อประเมินความเสียหายที่เกิดจากรอยร้าวเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 6.24

รูปที่ 6.24 ตัวเลือกกลไกความเสียหายของออบเจกต์ frmMain

ระดับการประเมินการคงสภาพขึ้นอยู่กับกลไกความเสียหาย วิทยานิพนธ์นี้สนใจกลไกความเสียหายที่เกิดจากรอยร้าวเพียงอย่างเดียว ที่ระดับการประเมิน 3 ระดับ คือ 1, 2 และ 3B การเขียนตรรกะของโปรแกรมส่วนนี้คือ ถ้ากลไกความเสียหายเกิดจากรอยร้าวแล้วเว้นวรรคระดับการประเมินการคงสภาพที่สามารถเลือกได้คือ 1, 2 และ 3B ดังรูปที่ 6.25 A), B) และ C) ตามลำดับ

นอกจากการประเมินการคงสภาพแล้ว ซอฟต์แวร์ยังสามารถประเมินอายุใช้งานที่เหลือและประเมินการรื้อก่อนแตกหักได้ การประเมินทั้งสองนี้ประยุกต์ใช้กับการประเมินการคงสภาพที่ระดับต่างกันตามตารางที่ 6.2 ตรรกะของโปรแกรมประเมินอายุใช้งานที่เหลือ และ ประเมินการรื้อก่อนแตกหัก คือ หากระดับการประเมินการคงสภาพเป็นระดับ 2 จะสามารถประเมินการรื้อก่อนแตกหักได้ แต่หากระดับการประเมินการคงสภาพเป็นระดับ 3B จะสามารถประเมินการรื้อก่อนแตกหักและประเมินอายุใช้งานที่เหลือได้



Integrity Level	<input checked="" type="checkbox"/> Integrity	1
Additional Analysis	<input type="checkbox"/> LBB	<input type="checkbox"/> Remaining life
	Fatigue	

A) กรณีเลือกประเมินระดับ 1

Integrity Level	<input checked="" type="checkbox"/> Integrity	2
Additional Analysis	<input type="checkbox"/> LBB	<input type="checkbox"/> Remaining life
	Fatigue	

B) กรณีเลือกประเมินระดับ 2

Integrity Level	<input checked="" type="checkbox"/> Integrity	3B
Additional Analysis	<input type="checkbox"/> LBB	<input type="checkbox"/> Remaining life
	Fatigue	

C) กรณีเลือกประเมินระดับ 3B

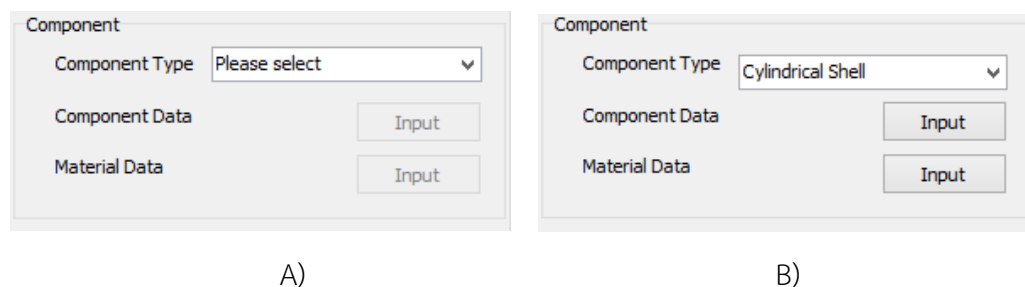
รูปที่ 6.25 ตัวเลือกระดับการประเมินการคงสภาพ และผลสืบเนื่องต่อการวิเคราะห์ประเภทอื่นได้แก่ LBB และ อายุใช้งานที่เหลือ

การประเมินในระดับ 2 และ 3 ผู้ใช้จะต้องระบุรายละเอียดอื่น ๆ เช่น ระบุความน่าจะเป็นที่โครงสร้างจะเสียหาย (pf) และ สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COVs) ดังรูปที่ 6.26

Partial Safety Factor	
Probability of Failure, pf	0.001
Coefficient of Variation, COVs	0.2

รูปที่ 6.26 ตัวเลือกสำหรับระบุตัวประกอบความปลอดภัยย่อยของออบเจกต์ frmMain

ถัดไปคือส่วนระบุรายละเอียดของโครงสร้าง ดังรูปที่ 6.27 A) ผู้ใช้ต้องเลือกชนิดของโครงสร้าง (component type) ก่อนที่จะระบุมิติโครงสร้าง, รอยเชื่อม, ภาวะและรอยร้าว จากนั้นปุ่มแสดงหน้าต่างที่ใช้กรอกรายละเอียดจะสามารถใช้งานได้ ดังรูปที่ 6.27 B)



รูปที่ 6.27 ตัวเลือกสำหรับระบุชนิดของโครงสร้างที่ต้องการประเมินของออบเจกต์ frmMain

หลังจากกดปุ่ม Input ที่ Component Data ในรูปที่ 6.27 B) ออบเจกต์ frmMain จะสร้างออบเจกต์ frmStructure จากคลาสซึ่งสืบทอดจากคลาส TfrmStructure ตามเงื่อนไขที่ถูกระบุในออบเจกต์ frmMain และส่งระดับการประเมินและชนิดการประเมินอื่น ๆ (ถ้ามี) ถัดมาออบเจกต์ frmStructure จะจัดเตรียมข้อมูลที่ตรงกับระบุ หลังจากนั้น โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างรายละเอียดของโครงสร้างขึ้นมา ซึ่งหน้าต่างนี้เป็นการแสดงผลของออบเจกต์ frmStructure เมื่อผู้ใช้งานกรอกข้อมูลแล้วกดปุ่ม OK หน้าต่างแสดงผลของออบเจกต์ frmStructure จะถูกซ่อนไว้ รายละเอียดของคลาส TfrmStructure จะกล่าวถึงในหัวข้อ 6.4.2

กลับมาที่ หน้าต่างแสดงผลของออบเจกต์ frmMain อีกครั้ง กดปุ่ม Input ที่ Material Data รูปที่ 6.27 B) ออบเจกต์ frmMain จะสร้างออบเจกต์ frmMaterial จากคลาส TfrmMaterial และดำเนินการในทำนองเดียวกันกับออบเจกต์ frmStructure รายละเอียดของคลาส TfrmMaterial จะกล่าวถึงในหัวข้อ 6.4.3

หลังจากกรอกรายละเอียดข้อมูลต่าง ๆ แล้ว จึงกดปุ่ม Integrity Assessment (รูปที่ 6.22) ออบเจกต์ frmMain จะสร้างออบเจกต์ Structure จากคลาสซึ่งสืบทอดจากคลาส TStructure ตามข้อมูลที่ระบุไว้ในออบเจกต์ frmStructure ใช้เงื่อนไขการสร้างดังตารางที่ 6.6 หลังจากนั้นจึงจัดเก็บข้อมูลในออบเจกต์ Structure รายละเอียดของ คลาส Structure จะแสดงในหัวข้อ 6.3.3

ในกรณีประเมินการคงสภาพของรอยร้าว ออบเจกต์ frmMain จะสร้าง ออบเจกต์ Assessment จากคลาส TAssessCrack และดำเนินการประเมินการคงสภาพของโครงสร้าง จากนั้นจึงแสดงผลการประเมินที่หน้าต่างแสดงผลของออบเจกต์ frmMain รายละเอียดของ คลาส Structure จะแสดงในหัวข้อ 6.3.4

ตารางที่ 6.6 เงื่อนไขที่ใช้สร้างออบเจกต์ Structure

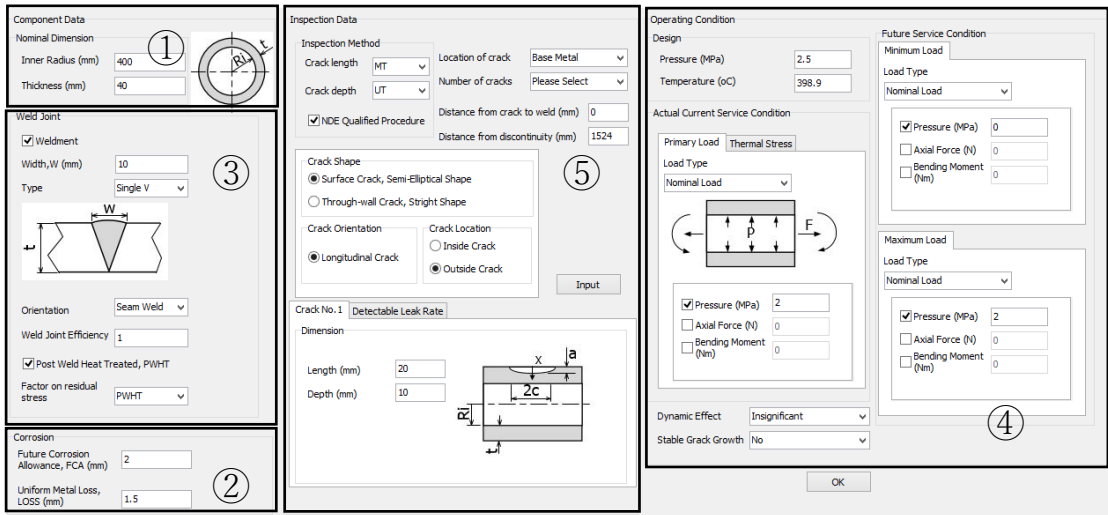
ชนิดของรอยร้าว	ทิศทางวางตัวของรอยร้าว	คลาสที่ใช้สร้างออบเจกต์ Structure
รอยร้าวทะเลความหนา	วางตัวตามแนวยาว	TCTCL
	วางตัวตามแนวเส้นรอบวง	TCTCC
รอยร้าวผิว	วางตัวตามแนวยาว	TCSCLE
	วางตัวตามแนวเส้นรอบวง	TCSCCE

กรณีประเมินการร้าวก่อนการแตกหัก และประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง จะดำเนินการหลังกดปุ่ม LBB Assessment และ Remaining life Assessment ตามลำดับ พฤติกรรมทั้งสองจะดำเนินการด้วยออบเจกต์ Assessment

#### 6.4.2 คลาส TfrmStructure

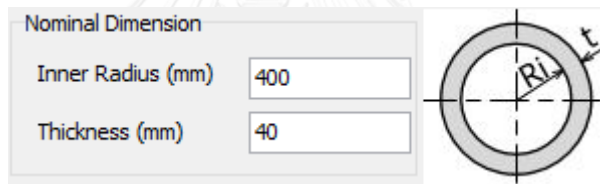
คลาส TfrmStructure เป็นหนึ่งในคลาสต่อประสานงานกับผู้ใช้ดังรูปที่ 6.3 ข้อมูลที่ต้องระบุจะแตกต่างกันไปตามกลไกความเสียหาย, ระดับการประเมิน, ชนิดของการประเมินอื่น ๆ (ถ้ามี) และชนิดของโครงสร้างที่ประเมิน วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาโครงสร้างรูปทรงกระบอกที่มีรอยร้าวเท่านั้น จึงเพิ่มคลาสฟอร์มภาชนะทรงกระบอก (TfrmCylSh) โดยให้สืบทอดจากคลาส TfrmStructure ถ่ายทอดสมบัติและพฤติกรรมที่มีระดับการเข้าถึงแบบป้องกัน และเพิ่มคลาสฟอร์มภาชนะทรงกระบอกที่มีรอยร้าว (TfrmCylShCrk) โดยสืบทอดจากคลาส TfrmCylSh

คลาส TfrmCylSh มีส่วนให้ระบุข้อมูลขนาดของโครงสร้าง, ข้อมูลรอยเชื่อมและข้อมูลภาวะคลาส TfrmCylShCrk มีส่วนให้ระบุข้อมูลขนาดของรอยร้าว ระดับการเข้าถึงของข้อมูลในคลาสนี้จะ เป็นแบบสาธารณะเพราะหลังจากนี้ข้อมูลที่ระบุทั้งหมดจะถูกส่งไปตั้งค่าที่ออบเจกต์ของคลาส Structure กรณีประเมินการคงสภาพ, ประเมินอายุใช้งานที่เหลือและประเมินการร้าวก่อนการแตกหัก ออบเจกต์ของคลาส TfrmCylShCrk คือ frmStrucuture ถูกสร้างที่ frmMain การแสดงผลของออบเจกต์ frmStrucuture แสดงดังรูปที่ 6.28 แต่หากไม่มีการประเมินอายุใช้งานที่เหลือการแสดงผลจะไม่แสดงส่วนรับข้อมูลภาวะที่ต้องรับในอนาคต



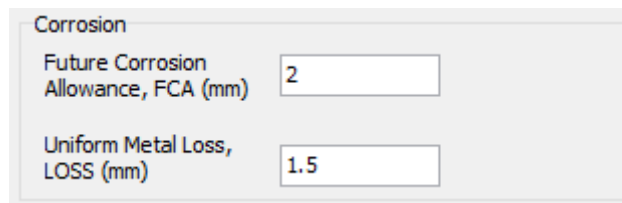
รูปที่ 6.28 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของออบเจกต์ frmCylShCrk

รูปที่ 6.28 ส่วนที่ 1 แสดงส่วนระบุข้อมูลของโครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอกที่เพิ่มเข้ามาในคลาสนี้ ได้แก่ รัศมีใน และความหนาที่ผลิต ดังรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.29 ส่วนระบุขนาดของภาชนะทรงกระบอกของคลาส TfrmCylSh

รูปที่ 6.28 ส่วนที่ 2 แสดงส่วนระบุความหนาที่ผลิตเพียงอย่างเดียวอาจไม่สะท้อนความเป็นจริง เนื่องจากเมื่อโครงสร้างถูกใช้งานอาจเกิดการกัดกร่อนได้ จึงเพิ่มการระบุค่าการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั้งโครงสร้าง (Uniform metal loss, LOSS) และ ค่าการกัดกร่อนที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต (Future Corrosion Allowance, FCA) ดังรูปที่ 6.30



รูปที่ 6.30 ส่วนระบุการกัดกร่อนของคลาส TfrmCylSh

รูปที่ 6.28 ส่วนที่ 3 แสดงส่วนระบุข้อมูลรอยเชื่อมที่เพิ่มเข้ามาในคลาสนี้ (รูปที่ 6.31) ได้แก่ 1) การมีอยู่ของรอยเชื่อมหรือไม่, 2) ขนาดของรอยเชื่อม, 3) ชนิดของรอยเชื่อมมี 2 ตัวเลือกคือ แบบ

Single V และ Double V, 4) แนววางตัวของรอยเชื่อม มี 2 ตัวเลือกคือ รอยเชื่อมตามแนวยาว และ รอยเชื่อมตามแนวเส้นรอบวง, 5) ค่า weld joint efficiency, 6) รอยเชื่อมผ่านการทำ PWHT หรือไม่ และ 7) ปัจจัยที่มีผลต่อความเค้นตกค้าง ตรรกะของโปรแกรมส่วนนี้คือ หากผู้ใช้ระบุว่าโครงสร้างมี รอยเชื่อมแล้ว จะต้องระบุข้อมูลของรอยเชื่อมให้ครบ แต่หากระบุว่าโครงสร้างไม่มีรอยเชื่อม ผู้ใช้ก็ไม่ต้องกรอกข้อมูลใด ๆ ของรอยเชื่อมอีก

The image shows a software configuration window titled "Weld Joint". It contains the following elements:

- Weldment
- Width, W (mm): 10
- Type: Single V
- A diagram of a single V weld joint with a width 'W' and a depth 'h'.
- Orientation: Girth Weld
- Weld Joint Efficiency: 1
- Post Weld Heat Treated, PWHT
- Factor on residual stress: PWHT

รูปที่ 6.31 ส่วนระบุข้อมูลรอยเชื่อมของคลาส TfrmCylSh

รูปที่ 6.28 ส่วนที่ 4 แสดงส่วนระบุข้อมูลการออกแบบ และข้อมูลภาระ ซึ่งข้อมูลการ ออกแบบ ได้แก่ ความดันออกแบบ (design pressure), อุณหภูมิออกแบบ (design temperature) รูปที่ 6.32

The image shows a software configuration window titled "Design". It contains the following elements:

- Pressure (MPa): 2.5
- Temperature (oC): 398.9

รูปที่ 6.32 ส่วนระบุข้อมูลการออกแบบของคลาส TfrmCylSh

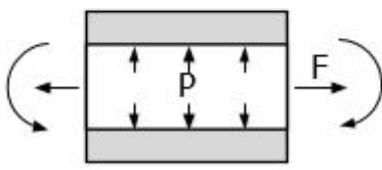
การระบุข้อมูลภาระแบ่งเป็นภาระปฐมภูมิและภาระทุติยภูมิ ในการประเมินการคงสภาพต้อง ใช้ข้อมูลภาระที่สถานะใช้งานปัจจุบัน ผู้ใช้สามารถระบุข้อมูลภาระปฐมภูมิในรูปแบบภาระระบุ เช่น

ความดัน, แรงดึงแนวแกน และโมเมนต์ดัดตั้งรูปที่ 6.33 A) หรือรูปแบบโปรไฟล์ความเค้นตั้งรูปที่ 6.33 B)

Actual Current Service Condition

Primary Load **Thermal Stress**

Load Type  
Nominal Load



Pressure (MPa) 1.5

Axial Force (N) 0

Bending Moment (Nm) 0

Actual Current Service Condition

Primary Load **Thermal Stress**

Load Type  
Through-Wall Stress Profi

$$S(x) = \sum_{i=0}^4 S_i(x/t)^i$$

S0 0 S3 0

S1 0 S4 0

S2 0

A) ระบุในรูปแบบภาระระบุ

B) ระบุในรูปแบบโปรไฟล์ความเค้น

รูปที่ 6.33 ส่วนระบุข้อมูลภาระปฐมภูมิของคลาส TfrmCylSh

ภาระทุติยภูมิจะถูกระบุในรูปแบบโปรไฟล์ความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังต้องระบุอุณหภูมิใช้งาน, เงื่อนไขการใช้งานที่ไม่ได้รับผลของความเค้นตั้งรูปที่ 6.34

Actual Current Service Condition

Primary Load Thermal Stress

Temperature at assess point (oC)

Temperature

Temperature during a pressure test (oC)

$$T(x) = \sum_{i=0}^4 C_i(x/t)^i$$

C0  C3

C1  C4

C2

รูปที่ 6.34 ส่วนระบุข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ของคลาส TfrmCylSh

หากซอฟต์แวร์ถูกระบุให้ประเมินอายุใช้งานที่เหลือ ผู้ใช้ต้องระบุข้อมูลภาระที่โครงสร้างจะได้รับในอนาคต วิทยานิพนธ์นี้สนใจการโตของรอยร้าวเนื่องจากภาระล้าเท่านั้น และไม่พิจารณาผลของความล้าเนื่องจากอุณหภูมิ การระบุค่าภาระต่ำสุดและสูงสุดแสดงดังรูปที่ 6.35 A) และ B) ตามลำดับ

Minimum Load

Load Type

Nominal Load

Pressure (MPa)

Axial Force (N)

Bending Moment (Nm)

Maximum Load

Load Type

Nominal Load

Pressure (MPa)

Axial Force (N)

Bending Moment (Nm)

A) ระบุค่าภาระต่ำสุด

B) ระบุค่าภาระสูงสุด

รูปที่ 6.35 ส่วนระบุข้อมูลภาระล้าของคลาส TfrmCylSh

นอกจากนี้ ผู้ใช้ยังต้องระบุผลกระทบที่มีกับการประเมิน (Dynamic Effect) และระบุสถานะการโตของรอยร้าว (Stable Crack Growth) ดังรูปที่ 6.36

Dynamic Effect	Insignificant
Stable Crack Growth	No

รูปที่ 6.36 ส่วนระบุผลกระทบการประเมิน และสถานะการโตของรอยร้าวของคลาส TfrmCylSh

คลาส TfrmCylShCrk สืบทอดจากคลาส TfrmCylSh แต่คลาสนี้จะเพิ่มการระบุข้อมูลรอยร้าว (รูปที่ 6.28 ส่วนที่ 5) เช่น วิธีการตรวจหารอยร้าว, จำนวนและขนาดของรอยร้าว, ระยะห่างระหว่างรอยร้าวกับรอยเชื่อม, ระยะห่างระหว่างรอยร้าวกับส่วนไม่ต่อเนื่องของโครงสร้าง, ชนิดและการวางตัวของรอยร้าว, ขนาดของรอยร้าว รวมถึงขนาดของรอยร้าวที่สามารถตรวจพบได้ในกรณีที่ผู้ใช้ระบุว่าประเมินการร้าวก่อนการแตกหัก

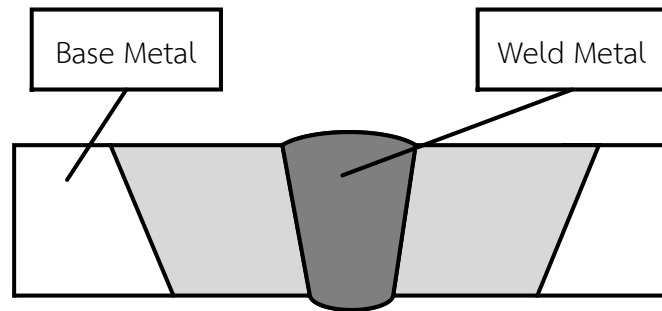
วิธีการตรวจหารอยร้าวมีหลายวิธี เช่น การตรวจสอบด้วยรังสี (Radiographic Testing, RT), การตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic Testing, UT), การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing, PT), การตรวจสอบด้วยสนามแม่เหล็ก (Magnetic Particle Testing, MT) เป็นต้น การตรวจสอบแต่ละแบบมีข้อดี ข้อด้อยต่างกันไป การระบุวิธีการตรวจหารอยร้าวทำเพื่อระบุความน่าเชื่อถือของขนาดรอยร้าว การตรวจสอบรอยร้าวที่ปรากฏที่ผิวนิยมตรวจแบบ UT, MT และ PT การระบุวิธีการตรวจหารอยร้าวสามารถถูกระบุได้ดังรูปที่ 6.37

Inspection Method	
Crack length	MT
Crack depth	UT
<input checked="" type="checkbox"/> NDE Qualified Procedure	

รูปที่ 6.37 ส่วนระบุวิธีการตรวจหารอยร้าวของคลาส TfrmCylShCrk

ผู้ใช้อ้างอิงตำแหน่งของรอยร้าว (location of crack) ซึ่งมีตัวเลือก คือ Base Metal และ Weld Metal ดังรูปที่ 6.38 ชั้นถัดมาคือ ระบุจำนวนรอยร้าว, ระยะระหว่างรอยร้าวกับรอยเชื่อม, ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างรอยร้าวกับส่วนไม่ต่อเนื่องของโครงสร้าง ดังรูปที่ 6.39





รูปที่ 6.38 ตำแหน่งของรอยร้าวที่วางตัวบนรอยเชื่อม

Location of crack	Base Metal
Number of cracks	Please Select
Distance from crack to weld (mm)	0
Distance from discontinuity (mm)	1524

รูปที่ 6.39 ส่วนระบุตำแหน่งและจำนวนรอยร้าวของคลาส TfrmCylShCrk

ถัดไปจะระบุชนิดของรอยร้าวมีตัวเลือกได้แก่ 1) รอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรี และ 2) รอยร้าวทะลุ ความหนา มีขอบหน้าเป็นเส้นตรง, ต่อไปเป็นการระบุแนวการวางตัวของรอยร้าว ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะสนใจรอยร้าวในทิศทางเดียวกับรอยเชื่อมเท่านั้น รูปที่ 6.40 A) และ B) แสดงส่วนระบุชนิด, แนวการวางตัวของรอยร้าว เมื่อแนวการวางตัวของรอยเชื่อมเป็นแบบตามแนวยาว และ ตามแนวเส้นรอบวง ตามลำดับ นอกจากนี้ในกรณีที่เป็รอยร้าวผิว ผู้ใช้ต้องระบุด้วยว่า รอยร้าวอยู่นอยู่ที่ผิวในหรือผิวนอกของโครงสร้างดังรูปที่ 6.41

<p>Crack Shape</p> <p><input type="radio"/> Surface Crack, Semi-Elliptical Shape</p> <p><input type="radio"/> Through-wall Crack, Stright Shape</p>	<p>Crack Shape</p> <p><input type="radio"/> Surface Crack, Semi-Elliptical Shape</p> <p><input type="radio"/> Through-wall Crack, Stright Shape</p>
<p>Crack Orientation</p> <p><input type="radio"/> Circumferential Crack</p>	<p>Crack Location</p> <p><input type="radio"/> Longitudinal Crack</p>

A) รอยร้าววางตัวตามแนวเส้นรอบวง

B) รอยร้าววางตัวตามแนวยาว

รูปที่ 6.40 ส่วนระบุชนิด, แนวการวางตัวของรอยร้าวในคลาส TfrmCylShCrk

รูปที่ 6.41 ส่วนระบุตำแหน่งของรอยร้าวผิวของคลาส TfrmCylShCrk

หากผู้ใช้ระบุว่าเป็นรอยร้าวผิว ผู้ใช้ต้องระบุขนาดของรอยร้าวทั้งความลึกและความยาว แต่ในกรณีที่ผู้ใช้ระบุว่ารอยร้าวทะลุความหนา คลาสนี้จะกำหนดความลึกของรอยร้าวเท่ากับความหนาของโครงสร้างเลย นอกจากนี้หากผู้ใช้ระบุว่าการประเมินการรั่วก่อนแตกหักด้วย ผู้ใช้ต้องระบุรอยร้าว ณ อัตราการรั่วที่ตรวจพบได้ได้ ดังรูปที่ 6.42

Crack length at detectable leak rate (mm)

รูปที่ 6.42 ส่วนระบุรอยร้าวที่ตรวจพบได้ของคลาส TfrmCylShCrk

### 6.4.3 คลาส TfrmMaterial

ออบเจกต์ของคลาส TfrmMaterial คือ frmMaterial ถูกสร้างที่ frmMain การแสดงผลของออบเจกต์ frmMaterial ดังรูปที่ 6.43 ข้อมูลของคลาสนี้เกี่ยวข้องกับวัสดุ แบ่งเป็น 1) ข้อมูลทั่วไป, 2) ข้อมูลสมบัติแรงดึง, 3) ความต้านทานการแตกหัก และ 4) อัตราการเติบโตของรอยร้าว

รูปที่ 6.43 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของออบเจกต์ frmMaterial

รูปที่ 6.43 ส่วนที่ 1 คือส่วนระบุข้อมูลทั่วไปของวัสดุ ได้แก่ ชื่อเฉพาะของวัสดุ, คลาส (Material class), P-No., หมายเลขกลุ่ม (group-number), Exemption Curve ของวัสดุ และค่าอัตราส่วนภาระสูงสุด ดังรูปที่ 6.44

Material Specification	SA-516 grade 70
Material Class	Carbon Steels
P-Number	2
Group-Number	2
Exemption Curve is	B
Source of Material	
Maximum permitted value of Load Ratio	1.00

รูปที่ 6.44 ส่วนระบุข้อมูลทั่วไปของวัสดุของคลาส TfrmMaterial

ส่วนที่ 2 รูปที่ 6.43 คือส่วนระบุส่วนระบุสมบัติแรงดึงของของคลาส TfrmMaterial ได้แก่

1. ความเค้นครากมี 2 ทางเลือกคือ  $\sigma_y$  ที่ได้จากการทดลอง (Test) และ  $SMYS$
2. ความเค้นดึงสูงสุด มี 2 ทางเลือกคือ  $\sigma_u$  ที่ได้จากการทดลอง (Actual) และ  $\sigma_u$  จากการประมาณ (Estimate)
3. ความเค้นที่ยอมรับได้ มี 2 ทางเลือกคือ ค่าความเค้นที่ยอมรับได้ที่ได้จากการทดลอง (Actual) และ ความเค้นที่ยอมรับได้จากการประมาณ (Estimate)
4. ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น
5. อัตราส่วนปัวร์ซอง (รูปที่ 6.45) และ
6. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ

ในกรณีที่ระดับการประเมินการคงสภาพเป็นระดับ 3B การแสดงผลของออบเจกต์ frmMaterial จะปรากฏรอบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ ดังรูปที่ 6.46 การระบุความสัมพันธ์มีเงื่อนไขว่า หากเป็นแบบจำลองของ Ramberg-Osgood ต้องระบุว่าทราบค่าพารามิเตอร์  $H_{RO}$  และ  $n_{RO}$  หรือไม่ หากทราบให้ระบุค่าพารามิเตอร์ทั้งสองด้วย แต่หากระบุไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ทั้งสอง โปรแกรมจะประมาณโดยพฤติกรรมของคลาส TRambergOsgood

Tensile Data at room temperature

Yield Stress (MPa)	min. specified	275.8
Ultimate Stress (MPa)	Estimate	482.6
Allowable Stress (MPa)	Estimate	137.9
Elastic Modulus (MPa)		210000
Poisson's Ratio		0.3

รูปที่ 6.45 ส่วนระบุสมบัติแรงดึงของคลาส TfrmMaterial

Stress-Strain Relation

Ramberg-Osgood

Ramberg-Osgood are from Actual

$$\epsilon_{ts} = \frac{\sigma_t}{E_y} + \frac{\sigma_t^{\frac{1}{n_{RO}}}}{H_{RO}}$$

nRo 0.21      HRO [MPa] 760

รูปที่ 6.46 ส่วนระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคลาส TfrmMaterial

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 6.43 ส่วนที่ 3 คือส่วนระบุการระบุสมบัติความต้านทานการแตกหักของวัสดุ ตามระดับการประเมิน เช่น การประเมินการคงสภาพระดับ 1 จะทำได้ก็ต่อเมื่อค่าความต้านทานการแตกหักมีค่าสูงกว่าความต้านทานการแตกหักค่าต่ำสุดดังรูปที่ 6.47

Fracture Toughness is greater than Lower-Bound

รูปที่ 6.47 ส่วนระบุความต้านทานการแตกหักของการประเมินระดับ 1

การประเมินการคงสภาพระดับ 2 และ 3B มีตัวเลือกแนวทางระบุความต้านทานการแตกหักดังรูปที่ 6.48 หลังจากระบุแนวทางแล้ว จะปรากฏส่วนให้กรอกข้อมูลที่ใช้ของแต่ละแนวทางซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ได้จากการทดสอบความต้านทานการแตกหัก หรือ เรียกว่า Test (Average) แล้วนำความต้านทานการแตกหักนั้นมาใช้ การระบุความต้านทานด้วยวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 6.49
2. ได้จากการประมาณจากเส้นโค้งขอบเขตล่างของ ASME (รูปที่ 6.50) ข้อมูลที่ต้องระบุในวิธีนี้ได้แก่ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, อุณหภูมิ ( $T$ ) และ กรณีที่ผู้ใช้รู้ค่าอุณหภูมิอ้างอิง ( $T_{ref}$ ) ก็ระบุด้วย
3. ได้จากการประมาณจากค่าชาร์ปี (รูปที่ 6.51) ข้อมูลที่ต้องระบุในวิธีนี้ คือ ระบุช่วงของการประเมินความต้านทานการแตกหัก มีทางเลือกคือ ช่วง upper shelf หรือ ช่วง transition ถัดมาจึงเลือกแบบจำลองความสัมพันธ์ของค่า  $E_{CVN}$  กับความต้านทานการแตกหัก จากนั้นระบุค่า  $E_{CVN}$
4. ได้จากการประมาณโดยใช้ Master Curve ดังรูปที่ 6.52 ข้อมูลที่ต้องระบุในวิธีนี้คือ อุณหภูมิอ้างอิง ( $T_0$ )

Fracture Toughness

Source

Test (Average)

ASME Lower-Bound Curve

Charpy Impact Energy

Master Curve

รูปที่ 6.48 ตัวเลือกสำหรับการระบุความต้านทานการแตกหักในการประเมินระดับ 2 และ 3B

Fracture Toughness Parameter

KIC (MPa.m<sup>0.5</sup>)

รูปที่ 6.49 ส่วนระบุความต้านทานการแตกหักจากการทดสอบ

Standard deviation, SD

Model

Based on RT, NDT

RT NDT is known

RT NDT (°C)

รูปที่ 6.50 ส่วนระบุข้อมูลที่ใช้ประมาณความต้านทานการแตกหักจากเส้นโค้งขอบเขตล่างของ ASME

Region

Model

CVN [J]

รูปที่ 6.51 ส่วนระบุข้อมูลที่ใช้ประมาณความต้านทานการแตกหักจากค่าพลังงานชาร์ปี

T0 (oC)

25

รูปที่ 6.52 ส่วนระบุข้อมูลที่ใช้ประมาณความต้านทานการแตกหักด้วย Master Curve

ส่วนที่ 4 รูปที่ 6.43 คือข้อมูลที่ประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง ผู้ใช้ต้องระบุสมบัติการเติบโตของรอยร้าว คลาสนี้มีแบบจำลองให้เลือก หลังจากนั้นรูปแบบของสมการจะแสดงขึ้นมาให้ผู้ใช้ได้ระบุค่าพารามิเตอร์ ดังรูปที่ 6.53

Crack Growth Data

Fatigue

Model Walker

Model : Walker

$$da/dN = C \left[ \frac{\Delta K}{(1-R)^\gamma} \right]^m$$

C 1.2e-7 mm / cycle

m 2.84

gamma 0.9

\* Delta K [MPa\*m<sup>0.5</sup>]

รูปที่ 6.53 ส่วนระบุข้อมูลที่ใช้ประมาณการเติบโตของรอยร้าว

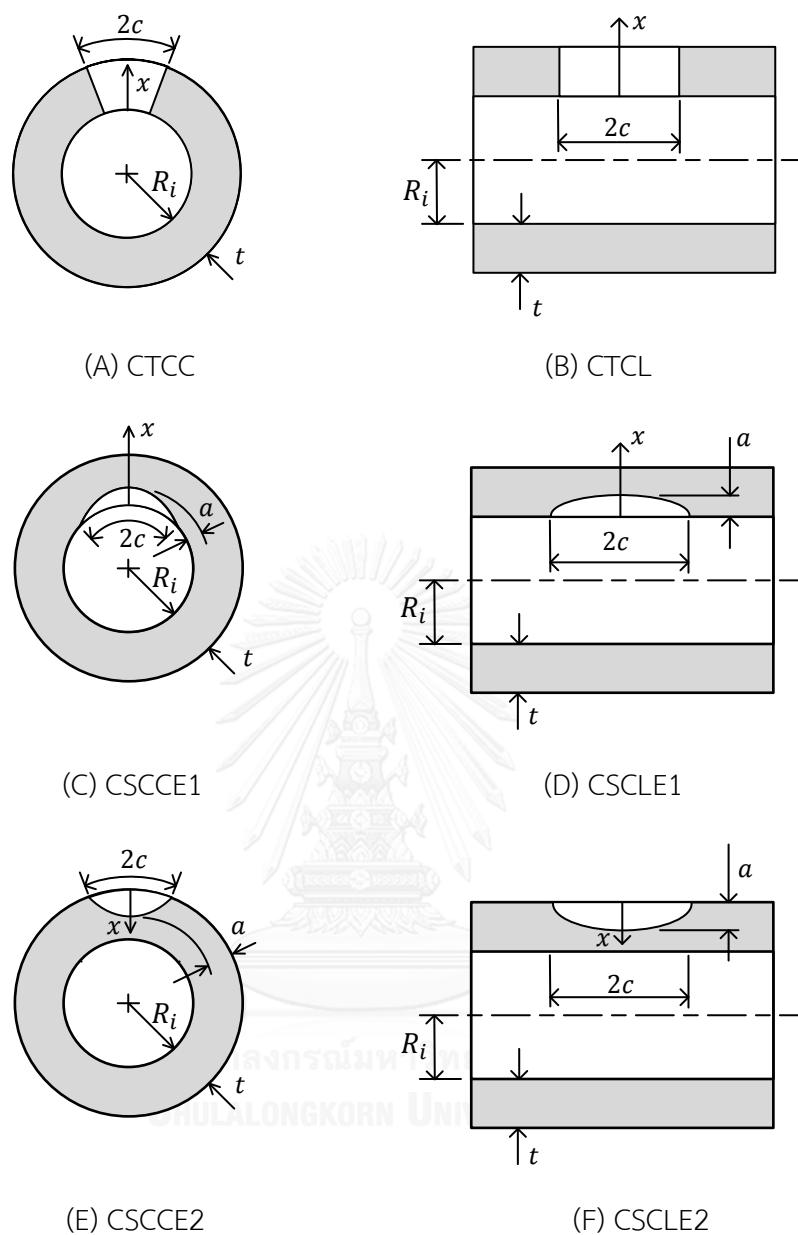
การทำงานของคลาส TfrmMaterial จะเริ่มจากกำหนดระดับการประเมิน จากนั้นคลาสนี้จึงจัดการแสดงผล เมื่อระบุข้อมูลแล้วกดปุ่ม OK แล้วหน้าต่างแสดงผลจะถูกซ่อนไว้ ข้อมูลที่ได้ระบุไว้แล้วจะถูกเรียกใช้หากได้รับคำสั่งที่เจาะจง

## 7. ตรวจสอบการทำงานของซอฟต์แวร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจสอบการทำงานโดยใช้ 1) ปัญหาย่อยเพื่อตรวจสอบการทำงาน บางส่วนของซอฟต์แวร์ เปรียบเทียบผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม MathCAD ซึ่งถูกเขียนให้เป็น เอกเทศกัน การตรวจสอบจะครอบคลุมปัญหาการประเมินการคงสภาพของโครงสร้างความดัน ทรงกระบอกที่มีรอยร้าวกรณีต่าง ๆ ได้แก่ รอยร้าวทะลุความหนาวงตัวตามแนวเส้นรอบวง (CTCC), รอยร้าวทะลุความหนาวงตัวตามยาว (CTCL), รอยร้าวผิวด้านในวงตัวตามแนวเส้นรอบวง (CSCCE1), รอยร้าวผิวด้านในวงตัวตามยาว (CSCLE1), รอยร้าวผิวด้านนอกวงตัวตามแนวเส้นรอบวง (CSCCE2) และ รอยร้าวผิวด้านนอกวงตัวตามยาว (CSCLE2) ดังรูปที่ 7.1 (A) - รูปที่ 7.1 (F) ตามลำดับ ความหมายของตัวย่อในรูปแสดงดังตารางที่ 7.1, 2) เปรียบเทียบผลจากซอฟต์แวร์กับผล ของตัวอย่างปัญหาจาก API 579 [13]

ตารางที่ 7.1 ตัวย่อและความหมายที่ใช้ในบท 7

ตัวย่อ	ความหมาย
$t$	ความหนาของท่อ
$R_i$	รัศมีในของท่อ
$a$	ความลึกของรอยร้าว
$2c$	ความยาวของรอยร้าว
$SV$	รอยเชื่อม ชนิด Single-V
$DV$	รอยเชื่อมชนิด Double-V
$WM$	ตำแหน่งของรอยร้าวอยู่บนรอยเชื่อม
$BM$	ตำแหน่งของรอยร้าวอยู่นอกรอยเชื่อม



รูปที่ 7.1 ชนิดและทิศการวางตัวของรอยร้าว

### 7.1 ปัญหาที่ใช้ตรวจสอบส่วนย่อย

การตรวจสอบส่วนย่อยของโปรแกรม ประกอบด้วย 1) การตรวจสอบเกณฑ์ตัดสินใจเลือกแผนภาพการประเมินระดับ 1, 2) การตรวจสอบเกณฑ์ตัดสินใจเลือก screening curve, 3) การตรวจสอบเกณฑ์ตัดสินใจเลือกเส้นใน screening curve, 4) การตรวจสอบการคำนวณอนุกรมมีอ้างอิง, 5) การตรวจสอบการประเมินการคงสภาพระดับ 1, 6) การตรวจสอบการเลือกตัวประกอบความปลอดภัย, 7) การตรวจสอบเปรียบเทียบผลจากการระบุภาวะและระบุความเค้น CTCL, 8) การ



ตรวจสอบการระบุภาระในโครงสร้างที่มีรอยร้าววางตัวตามยาว CSCLE1, 9) การตรวจสอบการประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง CSCCE และ 10) การตรวจสอบการประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก CTCC

#### 7.1.1 การตรวจสอบเกณฑ์ตัดสินใจเลือกแผนภาพการประเมินระดับ 1

การตรวจสอบการเลือกแผนภาพการประเมินระดับ 1 ใช้ชนิดของโครงสร้าง และแนวการวางตัวของรอยร้าวสัมพันธ์กับรอยเชื่อมเป็นเกณฑ์ วิทยานิพนธ์นี้สนใจรอยร้าวที่วางตัวขนานกับแนวแกนเท่านั้น กรณีรอยร้าวและรอยเชื่อมวางตัวตามยาวต้องใช้ แผนภาพ 9.13 และ กรณีรอยร้าวและรอยเชื่อมวางตัวตามแนวเส้นรอบวงต้องใช้ แผนภาพ 9.15 การเลือกแผนภาพของทั้งสองวิธีได้ผลตรงกันแสดงดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 เงื่อนไขและผลการตรวจสอบการเลือกแผนภาพการประเมินระดับ 1

กรณี	1	2	3	4	5	6	7
โครงสร้าง	CTCL	CSCLE1	CSCLE2	CTCC	CSCCE1	CSCCE2	CTCL
แผนภาพ	ซอฟต์แวร์	9.13	9.13	9.13	9.15	9.15	9.13
	MathCAD	9.13	9.13	9.13	9.15	9.15	9.13

#### 7.1.2 การตรวจสอบเกณฑ์ตัดสินใจเลือก screening curve

เกณฑ์ตัดสินใจเลือกเส้นใน Screening curve ได้แก่ 1) ตำแหน่งของรอยร้าวสัมพันธ์กับรอยเชื่อมเป็นเกณฑ์ 2) รอยเชื่อมผ่านการทำ PWHT หรือไม่ ตามเงื่อนไขในรูปที่ 4.13 การตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 7.3 การเลือก Screening curve จากซอฟต์แวร์และ MathCAD ได้ผลตรงกัน

ตารางที่ 7.3 เงื่อนไขและผลการตรวจสอบการเลือกกลุ่ม screening curve

	กรณี 1 CTCL	กรณี 2 CTCL	กรณี 3 CTCC	กรณี 4 CSCLE1	กรณี 5 CSCCE1
ตำแหน่งรอยร้าว	<i>WM</i>	<i>WM</i>	<i>WM</i>	<i>BM</i>	<i>WM</i>
PWHT	No	No	Yes	-	No
Screening curve จากซอฟต์แวร์	C	C	B	A	B
Screening curve จาก MathCAD	C	C	B	A	B

## 7.1.3 การตรวจสอบเกณฑ์ตัดสินใจเลือกเส้นใน screening curve

การเลือกเส้นใน Screening curve มีเกณฑ์ดังนี้ 1) การตรวจพบรอยร้าวด้วยวิธี NDE ทำโดยบุคคลที่ผ่านการรับรองหรือไม่ 2) ความหนาของโครงสร้าง และ 3) ความลึกของรอยร้าว ตามเงื่อนไขในรูปที่ 4.14 ผลที่เลือกจากซอฟต์แวร์ และ MathCAD ได้ผลตรงกัน ดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 เงื่อนไขและผลการตรวจสอบการเลือก screening curve

	กรณี 1 CTCL	กรณี 2 CSCLE1	กรณี 3 CSCLE2	กรณี 4 CTCC	กรณี 5 CSCCE1	กรณี 6 CSCCE2	กรณี 7 CTCL
$t$ [mm]	20	27	20	8	21.5	30	30
$a$ [mm]	20	10	1.5	8	10	5	30
NDE	O	O	X	X	X	X	X
เงื่อนไข	NDE Qualified	NDE Qualified	$t \leq 25,$ $a \leq t/4$	$t \leq 25,$ $a > t/4$	$t \leq 25,$ $a > t/4$	$25 < t \leq$ $38, a \leq 6$	$25 < t \leq$ $38, a > 6$
ผลจาก ซอฟต์แวร์	$\frac{1}{4}t$	$\frac{1}{4}t$	$\frac{1}{4}t$	$1-t$	$1-t$	$\frac{1}{4}t$	$1-t$
ผลจาก MathCAD	$\frac{1}{4}t$	$\frac{1}{4}t$	$\frac{1}{4}t$	$1-t$	$1-t$	$\frac{1}{4}t$	$1-t$

#### 7.1.4 การตรวจสอบการคำนวณอุณหภูมิอ้างอิง

การคำนวณ  $T_{ref}$  ใช้ชนิด Exemption Curve และ ค่า  $SMYS$  การคำนวณ  $T_{ref}$  ของวัสดุ Carbon Steels ที่มี  $SMYS$  เท่ากับ  $275.8 MPa$  แสดงดังตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 ตรวจสอบการคำนวณอุณหภูมิอ้างอิง

	Exemption Curve			
	A	B	C	D
$T_{ref}$ จากซอฟต์แวร์ [°C]	24.775	3.775	-17.437	-31.497
$T_{ref}$ จาก MathCAD [°C]	24.785	3.785	-17.406	-31.578
ความต่างของ $T_{ref}$	-0.04 %	-0.27 %	0.18 %	-0.26 %

ผลที่คำนวณ  $T_{ref}$  จากซอฟต์แวร์ และ MathCAD ใกล้เคียงกัน ความแตกต่างกันเกิดจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ 6.1 จากซอฟต์แวร์ และ MathCAD ต่างกัน

#### 7.1.5 การตรวจสอบการประเมินการคงสภาพระดับ 1

การประเมินการคงสภาพระดับ 1 ต้องใช้ค่าความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้ พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้ มีดังนี้ 1) ความหนาของโครงสร้าง, 2) รัศมีในของท่อ, 3) ความลึกของรอยร้าว, 4) Exemption Curve ของวัสดุ, 5) ชนิดของรอยเชื่อม, 6) ตำแหน่งของรอยร้าว, 7) รอยเชื่อมผ่านการทำ PWHT หรือไม่, 8) การตรวจพบรอยร้าวด้วยวิธี NDE ทำโดยบุคคลที่ผ่านการรับรองหรือไม่ ดังตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้ในกรณีต่าง ๆ

	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4	กรณี 5	กรณี 6	กรณี 7
	CTCL	CTCL	CTCC	CSCLE1	CSCLE2	CSCCE1	CSCCE2
$t$ [mm]	20	30	8	27	30	21.5	20
$R_i$ [mm]	200	300	40	475	200	100	475
$a$ [mm]	20	30	8	10	5	10	2
$2c$ [mm]	40	40	35	10	20	20	20

	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4	กรณี 5	กรณี 6	กรณี 7
	CTCL	CTCL	CTCC	CSCLE1	CSCLE2	CSCCE1	CSCCE2
Exemption Curve	A	B	D	B	B	B	A
ชนิดรอยเชื่อม, ตำแหน่งรอยร้าว	SV, WM	SV, WM	DV, WM	SV, WM	SV, WM	SV, WM	DV, WM
PWHT	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
NDE	Q	Q	UQ	UQ	UQ	UQ	UQ

Q : Qualified, UQ : Unqualified

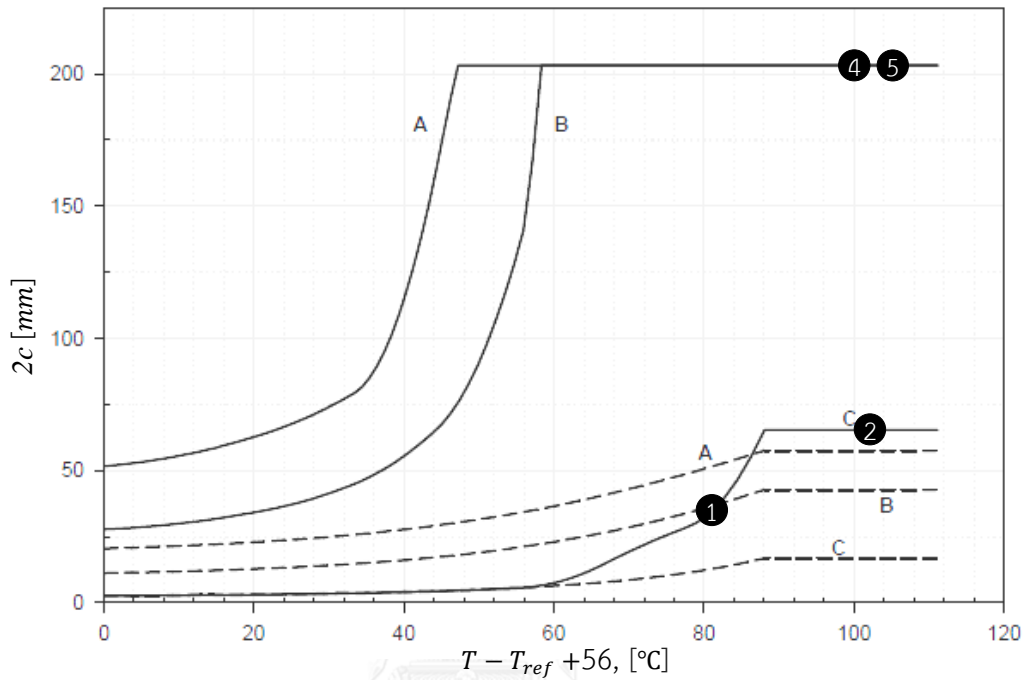
จากข้อมูลในตารางตารางที่ 7.6 จะคำนวณ  $T_{ref}$  จากตารางที่ 7.7 นำ  $T_{ref}$  ที่ได้มาระบุตำแหน่งในรูปที่ 7.2 และ รูปที่ 7.3 เพื่อหาค่า  $2c_{allow}$

ตารางที่ 7.7 ผลการคำนวณความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้

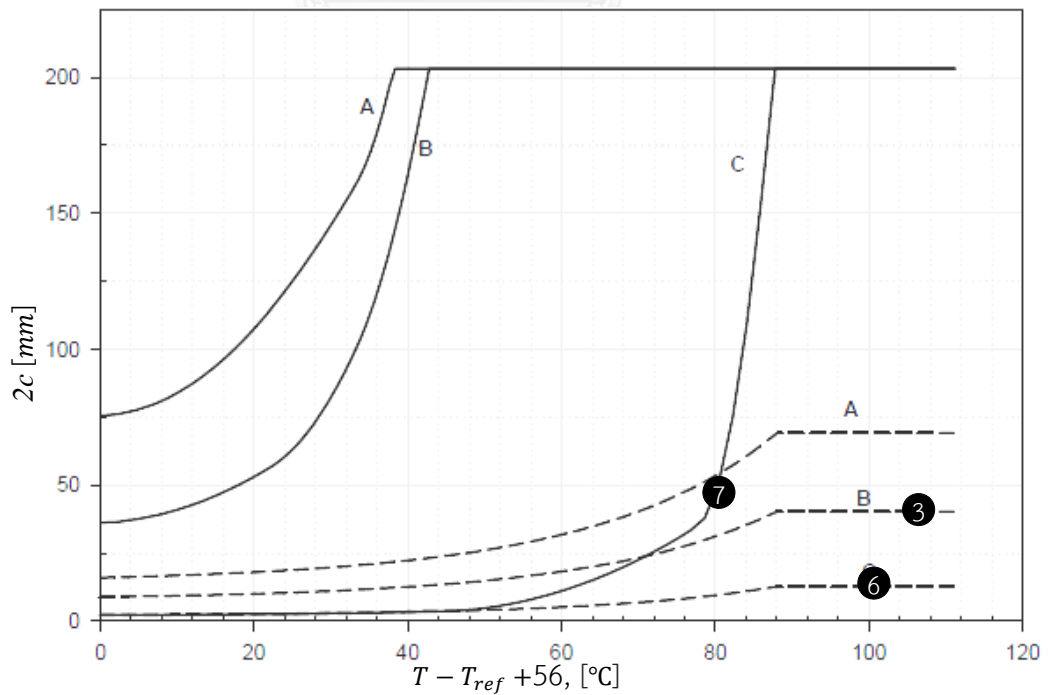
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4	กรณี 5	กรณี 6	กรณี 7
	CTCL	CTCL	CTCC	CSCLE1	CSCLE2	CSCCE1	CSCCE2
$T_{ref}$ จากซอฟต์แวร์ [°C]	24.78	3.775	-31.5	5.861	-17.437	3.775	24.775
$T_{ref}$ จาก MathCAD [°C]	24.79	3.785	-31.58	5.871	-17.406	3.785	24.785
$2c$ [mm]	40	40	35	10	20	20	20
$2c_{allow}$ จากซอฟต์แวร์ [mm]	38.2	65.0	40.0	203.0	203.0	17.0	46.8
$2c_{allow}$ จาก MathCAD [mm]	36.6	65.9	40.2	203.2	203.2	16.8	46.8
ผลการประเมินด้วยซอฟต์แวร์	X	O	O	O	O	O	O
ผลการประเมินด้วย MathCAD	X	O	O	O	O	O	O

X : การประเมินไม่ผ่าน, O : การประเมินผ่าน

ค่า  $2c_{allow}$  จากซอฟต์แวร์ และ MathCAD ใกล้เคียงกัน ความแตกต่างกันในกรณี 1 เกิดจากช่วงการเปลี่ยนแปลงค่า  $2c_{allow}$  บริเวณ  $T - T_{ref} + 56$  เป็นไปอย่างรวดเร็ว ความแตกต่างกันของ  $T_{ref}$  จากซอฟต์แวร์ และ MathCAD เพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้ค่า  $2c_{allow}$  มีความแตกต่างกันมาก



รูปที่ 7.2 แผนภาพ 9.13 และความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้กรณี 1, 2, 4 และ 5 ของตารางที่ 7.6



รูปที่ 7.3 แผนภาพ 9.15 และความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้กรณี 3, 6 และ 7 ของตารางที่ 7.6

### 7.1.6 การตรวจสอบการเลือกตัวประกอบความปลอดภัย

การตรวจสอบการเลือกตัวประกอบความปลอดภัย ต้องใช้ข้อมูล ดังนี้ 1) ความลึกของรอยร้าว, 2) ระบุความน่าจะเป็นที่โครงสร้างจะเสียหาย (pf), 3) สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COVs), และ 4) อัตราส่วนของความต้านทานการแตกหักต่อความเค้นคราก ( $R_{ky}$ ) การระบุข้อมูล 3 ตัวแรกจะทำให้ทราบค่า  $R_c$  เมื่อค่า  $R_{ky}$  เป็นไปตามเงื่อนไขในตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบการคำนวณตัวประกอบความปลอดภัย

กรณี	$a$ [mm]	pf	COVs	เงื่อนไข		$R_c$
1	38.5	0.023	0.1	$a \geq 5$	$R_{ky} > R_c$	1.8
2	38.5	0.023	0.2	$a \geq 5$	$R_{ky} > R_c$	1.3
3	38.5	0.023	0.3	$a \geq 5$	$R_{ky} > R_c$	1.1
4	38.5	0.001	0.1	$a \geq 5$	$R_{ky} > R_c$	1.9
5	38.5	0.001	0.2	$a \geq 5$	$R_{ky} > R_c$	1.5
6	6.5	$1 \times 10^{-3}$	0.3	$a \geq 5$	$R_{ky} > R_c$	1.3
7	6.5	$1 \times 10^{-6}$	0.1	$a \geq 5$	$R_{ky} > R_c$	1.8
8	2.5	$1 \times 10^{-6}$	0.3	$a < 5$	$R_{ky} > R_c$	2
9	3	$2.3 \times 10^{-2}$	0.1	$a < 5$	$R_{ky} > R_c$	1
10	4	$1 \times 10^{-6}$	0.3	$a < 5$	$R_{ky} > R_c$	2
11	10	$1 \times 10^{-6}$	0.2	$a \geq 5$	$R_{ky} > R_c$	1.5
12	10	$1 \times 10^{-6}$	0.3	$a \geq 5$	$R_{ky} > R_c$	1.5

การเลือกตัวประกอบความปลอดภัย  $PSF_s$ ,  $PSF_k$  และ  $PSF_a$  จากซอฟต์แวร์ และ MathCAD ได้ผลตรงกันดังตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.9 ผลการคำนวณตัวประกอบความปลอดภัยจากข้อมูลในตารางที่ 7.8

กรณี	ผลการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์			ผลการคำนวณด้วย MathCAD		
	$PSF_s$	$PSF_k$	$PSF_a$	$PSF_s$	$PSF_k$	$PSF_a$
1	1.25	1	1	1.25	1	1
2	1.5	1	1	1.5	1	1
3	1.75	1	1	1.75	1	1
4	1.5	1	1	1.5	1	1
5	2	1	1	2	1	1
6	2.5	1	1	2.5	1	1
7	2	1	1	2	1	1
8	2.6	2	1.5	2.6	2	1.5
9	1.25	1	1	1.25	1	1
10	4.1	1	1	4.1	1	1
11	3.1	1	1	3.1	1	1
12	4.1	1	1	4.1	1	1

### 7.1.7 การตรวจสอบเปรียบเทียบผลจากการระบุภาระและระบุความเค้น

ซอฟต์แวร์รองรับการระบุและโปรไฟล์ความเค้นเนื่องจากภาระทางกล หากการระบุสมมูลกับโปรไฟล์ความเค้น การประเมินการคงสภาพควรได้ผลตรงกัน ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง ( $\sigma_{hoop}$ ) ในท่อหน้ารับความดัน ( $p$ ) แสดงดังสมการ 7.1

$$\sigma_{hoop}(x) = p \frac{R_i^2 [R_o^2 + (R_o + x)^2]}{(R_o + x)^2 (R_o^2 - R_i^2)} \quad (7.1)$$

กรณีความดันมีค่า  $0.965 \text{ MPa}$  จะคำนวณสัมประสิทธิ์ของความเค้นสมการพหุนามอันดับ 4 ตามสมการ 3.2 ได้ดังนี้  $\sigma_0 = 10.531 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_1 = -1.106 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_2 = 0.16 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_3 = -0.021 \text{ MPa}$  และ  $\sigma_4 = 0.002466 \text{ MPa}$

หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบการประเมินการคงสภาพของโครงสร้าง เมื่อระบุภาระในรูปแบบการระบุเปรียบเทียบกับโปรไฟล์ความเค้นเนื่องจากภาระทางกลมีข้อมูลดังนี้

## ข้อมูลทั่วไป

- โครงสร้างออกแบบตามมาตรฐาน ASME BPV Code, Section VIII, Division 1
- ประเมินการคงสภาพระดับ 2
- ความน่าจะเป็นที่โครงสร้างจะเสียหาย (pf) 0.023
- สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COVs) 0.2
- โครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอก

## ข้อมูลท่อ

- รัศมีภายใน 400 mm
- ความหนาผลิต 40 mm

## ข้อมูลการกัดกร่อน

- ผุกร่อนสม่ำเสมอ 1.5 mm
- การกัดกร่อนที่จะเกิดในอนาคต 2 mm

## ข้อมูลรอยเชื่อม

- รอยเชื่อมวางตัวตามแนวยาว, ชนิด Single-V
- ผ่านการทำ Post Weld Heat Treated
- Weld Joint Efficiency เท่ากับ 1
- รอยเชื่อมกว้าง 10 mm

## ข้อมูลภาระ

- ความดันออกแบบ ( $p$ ) 2.068 MPa
- อุณหภูมิออกแบบ 343.33 °C
- ความดันใช้งาน 0.965 MPa
- ที่อุณหภูมิใช้งาน 50 °C
- สัมประสิทธิ์ของโปรไฟล์ความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนี้  
 $C_0 = -3.3768 \text{ MPa}$ ,  $C_1 = -673.9602 \text{ MPa}$ ,  $C_2 = 2,765.1309 \text{ MPa}$ ,  
 $C_3 = -3,459.4409 \text{ MPa}$  และ  $C_4 = 1,414.2546 \text{ MPa}$

## ข้อมูลรอยร้าว ดังรูปที่ 7.1 (B)

- รอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาว อยู่บริเวณรอยเชื่อม
- ความยาวของรอยร้าว ( $2c$ ) 40 mm

## ข้อมูลวัสดุ

- ทำจากวัสดุ SA-516 Grade 70, normalized, Carbon steel, P1, Group 2
- ความเค้นคราก, SMYS 275.8 MPa



- ความต้านแรงดึงสูงสุด 482.633 MPa
- โมดูลัสของความยืดหยุ่น 210 GPa
- Exemption curve D
- ความต้านทานการแตกหักประมาณจากเส้นโค้งขอบเขตล่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2

ผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างภาระระบุและโปรไฟล์ความเค้นจากซอฟต์แวร์ พบว่าผลการประเมินกรณีภาระแบบความดันระบุซึ่งเทียบเท่ากับการระบุโปรไฟล์ความเค้น จะได้ผลการประเมินเท่ากัน และผลตรงกับการประเมินกรณีภาระแบบความดันด้วย MathCAD ดังตารางที่ 7.10

ตารางที่ 7.10 ผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างภาระระบุและโปรไฟล์ความเค้น

รายการ	คำนวณด้วยความดันระบุ 0.965 MPa		โปรไฟล์ความเค้น
	ซอฟต์แวร์	MathCAD	คำนวณด้วยซอฟต์แวร์
$P_m$	10.026	10.026	10.026
$P_b$	0.483	0.483	0.482
$Q_m$	344.092	344.092	344.092
$Q_b$	-54.539	-54.539	-54.539
$PSF_s, PSF_k$ และ $PSF_a$	1.5, 1, 1	1.5, 1, 1	1.5, 1, 1
$K_{mat}$	125.738	125.713	125.738
$\sigma_{ref}^P$	15.694	15.694	15.694
$\sigma_{ref}^{SR}$	335.802	335.805	335.802
$L_r^P$	0.057	0.057	0.057
$K_I^P$ , ตำแหน่ง A	4.218	4.218	3.891
$K_I^P$ , ตำแหน่ง B	4.335	4.335	4.004
$K_I^{SR}$ , ตำแหน่ง A	75.229	75.229	75.229
$K_I^{SR}$ , ตำแหน่ง B	106.770	106.770	106.770
$L_r^{SR}$	1.218	1.218	1.218
$\emptyset$	0.911	0.911	0.911
$\psi$	0.047	0.047	0.047
$\Phi$ , ตำแหน่ง A	1.052	1.052	1.052

รายการ	คำนวณด้วยความดันระบุ 0.965 MPa		โปรไฟล์ความเค้น
	ซอฟต์แวร์	MathCAD	คำนวณด้วยซอฟต์แวร์
$\Phi$ , ตำแหน่ง B	1.052	1.052	1.052
$K_r$ , ตำแหน่ง A	0.66282	0.66295	0.660
$K_r$ , ตำแหน่ง B	0.9277	0.92776	0.924
ผลการประเมิน ตำแหน่ง A	acceptable	acceptable	acceptable
ผลการประเมิน ตำแหน่ง B	acceptable	acceptable	acceptable

#### 7.1.8 การตรวจสอบการระบุภาระในโครงสร้างที่มีรอยร้าววางตัวตามยาว

ภาระระบุทางกลที่ซอฟต์แวร์รองรับ คือ ความดัน, แรงดึงแนวแกน และ โมเมนต์ดัด แต่ภาระระบุทางกลเพียงชนิดเดียวที่มีผลกับการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวซึ่งวางตัวตามยาวของท่อ คือ ความดัน การตรวจสอบการระบุในหัวข้อนี้ แบ่งเป็น 2 กรณีคือ 1) โครงสร้างรับภาระความดันเพียงภาระเดียวเท่านั้น และ 2) โครงสร้างรับภาระความดัน, แรงดึงแนวแกน และ โมเมนต์ดัด ข้อมูลที่ใช้ระบุในการประเมินมีดังนี้

ข้อมูลทั่วไป

- โครงสร้างออกแบบตามมาตรฐาน ASME BPV Code, Section VIII, Division 1
- ประเมินการคงสภาพระดับ 2
- ความน่าจะเป็นที่โครงสร้างจะเสียหาย (pf) 0.001
- สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COVs) 0.2
- โครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอก

ข้อมูลท่อ

- รัศมีภายใน 475 mm
- ความหนาผลิต 27 mm

ข้อมูลการกัดกร่อน

- ผุกร่อนสม่ำเสมอ 1.5 mm
- การกัดกร่อนที่จะเกิดในอนาคต 2 mm

## ข้อมูลภาระ

- ความดันออกแบบ ( $p$ ) 2.068 MPa
- อุณหภูมิออกแบบ 343.33 °C
- ที่อุณหภูมิใช้งาน 50 °C
- สัมประสิทธิ์ของโปรไฟล์ความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนี้  
 $C_0 = 16.2967 \text{ MPa}$ ,  $C_1 = 572.6517 \text{ MPa}$ ,  $C_2 = -2,666.8514 \text{ MPa}$ ,  
 $C_3 = 3,528.7031 \text{ MPa}$  และ  $C_4 = -1,478.2951 \text{ MPa}$
- ภาระทางกล

## กรณี 1

ความดัน 0.965 MPa

## กรณี 2

ความดัน 0.965 MPa

แรงดึงแนวแกน 100 N

โมเมนต์ดัด 386 Nm

## ข้อมูลรอยร้าว ดังรูปที่ 7.1 (D)

- รอยร้าวผิวที่ด้านใน วางตัวตามแนวยาว
- ความยาวของรอยร้าว ( $2c$ ) 50 mm
- ความลึกของรอยร้าว ( $a$ ) 10 mm

## ข้อมูลวัสดุ

- ทำจากวัสดุ SA-516 Grade 70 , Carbon steel, P1, Group 2
- SMYS 275.8 MPa
- ความต้านแรงดึงสูงสุด 482 MPa
- โมดูลัสของความยืดหยุ่น 210 GPa
- Exemption curve B
- ความต้านทานการแตกหักประมาณจากการประมาณจากค่าชาร์ปีช่วง upper shelf มีค่า

$E_{CVN}$  เท่ากับ 40 J

ผลการคำนวณเปรียบเทียบการระบุกรณีที่ 1 และ 2 จากซอฟต์แวร์ได้ผลตรงกัน และตรงกับ  
การประเมินในกรณีที่ 1 ด้วย MathCAD ดังตารางที่ 7.11

ตารางที่ 7.11 ผลการประเมินการคงสภาพเปรียบเทียบการระบุภาระใน CSCLE1

รายการ	คำนวณด้วย MathCAD	คำนวณด้วยซอฟต์แวร์	
	กรณี 1	กรณี 1	กรณี 2
ความดัน [ $MPa$ ]	0.965	0.965	0.965
แรงดึงแนวแกน [ $N$ ]	100	0	100
โมเมนต์ดัด [ $Nm$ ]	386	0	386
$P_m$	17.975	17.975	17.975
$P_b$	0.482	0.482	0.482
$Q_m$	0.189	0.189	0.189
$Q_b$	50.501	50.501	50.501
$PSF_s$	2	2	2
$PSF_k$	1	1	1
$PSF_a$	1	1	1
$K_{mat}$	81.078	81.078	81.078
$\sigma_{ref}^{SR}$	49.575	49.575	49.575
$L_r^P$	0.137	0.137	0.137
$K_I^P$ , ตำแหน่ง A	7.151	7.151	7.151
$K_I^P$ , ตำแหน่ง B	5.256	5.256	5.256
$K_I^{SR}$ , ตำแหน่ง A	6.114	6.114	6.114
$K_I^{SR}$ , ตำแหน่ง B	4.605	4.605	4.605
$L_r^{SR}$	0.180	0.180	0.180
$\phi$	0.275	0.275	0.275
$\psi$	0.008	0.008	0.008
$\Phi$ , ตำแหน่ง A	1.030	1.030	1.030
$\Phi$ , ตำแหน่ง B	1.030	1.030	1.030
$K_r$ , ตำแหน่ง A	0.166	0.166	0.166
$K_r$ , ตำแหน่ง B	0.123	0.123	0.123
$K_{r.FAC}$	0.997	0.997	0.997
ผลการประเมินตำแหน่ง A	acceptable	acceptable	acceptable
ผลการประเมินตำแหน่ง B	acceptable	acceptable	acceptable

### 7.1.9 การตรวจสอบการประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง

การตรวจสอบการประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้างในหัวข้อนี้ จะประเมินโครงสร้างกรณี CSCCE มีรายละเอียดที่ต้องระบุดังนี้

#### ข้อมูลทั่วไป

- โครงสร้างออกแบบตามมาตรฐาน ASME BPV Code, Section VIII, Division 1
- ประเมินการคงสภาพระดับ 3B
- ความน่าจะเป็นที่โครงสร้างจะเสียหาย (pf) 0.000001
- สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COVs) 0.3
- โครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอก

#### ข้อมูลท่อ

- รัศมีภายใน 100 mm
- ความหนาผลิต 21.5 mm

#### ข้อมูลการกัดกร่อน

- ผุกร่อนสม่ำเสมอ 1.5 mm
- การกัดกร่อนที่จะเกิดในอนาคต 2 mm

#### ข้อมูลรอยเชื่อม

- รอยเชื่อมวางตัวตามแนวเส้นรอบวง
- ชนิด Single-V
- ไม่ผ่านการทำ Post Weld Heat Treated
- Weld Joint Efficiency เท่ากับ 1
- รอยเชื่อมกว้าง 10 mm

#### ข้อมูลภาระ

- ความดันออกแบบ ( $p$ ) 2.068 MPa
- อุณหภูมิออกแบบ 343.33 °C
- ที่อุณหภูมิใช้งาน 4 °C
- สัมประสิทธิ์ของโปรไฟล์ความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนี้  
 $C_0 = -10.1514 \text{ MPa}$ ,  $C_1 = -609.7445 \text{ MPa}$ ,  $C_2 = 2676.5646 \text{ MPa}$ ,  
 $C_3 = -3464.1157 \text{ MPa}$  และ  $C_4 = 1442.255 \text{ MPa}$

## ภาระใช้งาน

- ความดันใช้งาน	0.965	<i>MPa</i>
- แรงดึงแนวแกน	100	<i>N</i>
- โมเมนต์ดัด	386	<i>Nm</i>

## ภาระใช้งานในอนาคต

- แรงดึงแนวแกนสูงสุด	82	<i>N</i>
- โมเมนต์ดัดสูงสุด	328	<i>Nm</i>
- ความดันต่ำสุด	0.5	<i>MPa</i>
- แรงดึงแนวแกนต่ำสุด	410	<i>N</i>
- โมเมนต์ดัดต่ำสุด	820	<i>Nm</i>

## ข้อมูลรอยร้าว ดังรูปที่ 7.1 (C)

- รอยร้าวผิวที่ด้านใน วางตัวตามแนวเส้นรอบวง		
- ความยาวของรอยร้าว ( $2c$ )	20	<i>mm</i>
- ความลึกของรอยร้าว ( $a$ )	10	<i>mm</i>

## ข้อมูลวัสดุ

- ทำจากวัสดุ SA-516 Grade 70 , Carbon steel, P1, Group 2		
- ความเค้นคราก, <i>SMYS</i>	275.8	<i>MPa</i>
- ความต้านแรงดึงสูงสุด	482	<i>MPa</i>
- โมดูลัสของความยืดหยุ่น	210	<i>GPa</i>
- Exemption curve	B	
- ความต้านทานการแตกหักประมาณจากการประมาณจากค่าชาร์ปีช่วง upper shelf มีค่า		

$E_{CVN}$  เท่ากับ 40 *J*

ผลการคำนวณเปรียบเทียบการประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้างกรณี CSCCE1 จากซอฟต์แวร์ และ MathCAD ได้ผลตรงกัน ดังตารางที่ 7.12

ตารางที่ 7.12 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้างกรณี CSCCE1

รายการ	คำนวณด้วย MathCAD	คำนวณด้วยซอฟต์แวร์
ชนิดของรอยร้าวเริ่มต้น	รอยร้าวผิว	รอยร้าวผิว
อายุใช้งานที่เหลือ	922 รอบ	922 รอบ
ชนิดของรอยร้าวสุดท้าย	รอยร้าวทะลุความหนา	รอยร้าวทะลุความหนา

### 7.1.10 การตรวจสอบการประเมินการรั่วก่อนการแตกหัก

การตรวจสอบการประเมินการรั่วก่อนการแตกหักของโครงสร้างในหัวข้อนี้ จะประเมินโครงสร้างกรณี CTCC มีรายละเอียดที่ต้องระบุดังนี้

#### ข้อมูลทั่วไป

- โครงสร้างออกแบบตามมาตรฐาน ASME BPV Code, Section VIII, Division 1
- ประเมินการคงสภาพระดับ 2
- ความน่าจะเป็นที่โครงสร้างจะเสียหาย (pf) 0.023
- สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COVs) 0.1
- โครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอก

#### ข้อมูลท่อ

- รัศมีภายใน 40 mm
- ความหนาผลิต 8 mm

#### ข้อมูลการกัดกร่อน

- ผุกร่อนสม่ำเสมอ 1.5 mm
- การกัดกร่อนที่จะเกิดในอนาคต 2 mm

#### ข้อมูลภาระ

- ความดันออกแบบ ( $p$ ) 2.068 MPa
- อุณหภูมิออกแบบ 343.33 °C
- ที่อุณหภูมิใช้งาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 50 °C
- สัมประสิทธิ์ของโปรไฟล์ความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนี้  
 $C_0 = 198.1231 \text{ MPa}$ ,  $C_1 = -1,290.841 \text{ MPa}$ ,  $C_2 = 2,372.519 \text{ MPa}$ ,  
 $C_3 = -1,808.349 \text{ MPa}$  และ  $C_4 = 510.721 \text{ MPa}$
- ความดันใช้งาน 0.965 MPa
- แรงดึงแนวแกน 100 N
- โมเมนต์ดัด 386 Nm

#### ข้อมูลรอยร้าว ดังรูปที่ 7.1 (A)

- รอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวเส้นรอบวง
- ความยาวของรอยร้าว ( $2c$ ) 35 mm

#### ข้อมูลวัสดุ

- ทำจากวัสดุ Carbon steel, P1, Group 2
- ความเค้นคราก, SMYS 275.8 MPa

- ความต้านแรงดึงสูงสุด 482 MPa
- โมดูลัสของความยืดหยุ่น 210 GPa
- Exemption curve A
- ความต้านทานการแตกหักจากการทดลองมีค่า  $100 \text{ MPa}\sqrt{m}$

#### ข้อมูลการตรวจสอบรอยร้าว

- ความยาวของรอยร้าวที่สามารถตรวจพบ (2c) 50 mm

ผลการคำนวณเปรียบเทียบการร้าวก่อนการแตกหักของโครงสร้างกรณี CTCC จากซอฟต์แวร์ และ MathCAD ได้ผลตรงกัน ดังตารางที่ 7.13

#### ตารางที่ 7.13 ผลการประเมินการร้าวก่อนการแตกหักใน CTCC

รายการ	คำนวณด้วย MathCAD	คำนวณด้วยซอฟต์แวร์
ผลการประเมินการร้าวก่อนการแตกหัก	acceptable	acceptable

#### 7.2 ตัวอย่างการประเมินจากมาตรฐาน API 579

การตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานในซอฟต์แวร์ในหัวข้อนี้ จะเปรียบเทียบผลการประเมินกับตัวอย่างปัญหาจากมาตรฐาน API 579

##### 7.2.1 โจทย์ข้อ 1

#### ข้อมูลทั่วไป

- โครงสร้างออกแบบตามมาตรฐาน ASME BPV Code, Section VIII, Division 1
- ประเมินการคงสภาพระดับ 1
- โครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอก

#### ข้อมูลท่อ

- เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2,438.4 mm
- ความหนาผลิต 31.75 mm

#### ข้อมูลการกัดกร่อน

- ผุกร่อนสม่ำเสมอ 2.54 mm
- การกัดกร่อนที่จะเกิดในอนาคต 3.175 mm

#### ข้อมูลรอยเชื่อม

- รอยเชื่อมวางตัวตามแนวยาว
- ชนิด Double-V
- ผ่านการทำ Post Weld Heat Treated



- Weld Joint Efficiency เท่ากับ 1

#### ข้อมูลภาระ

- ความดันออกแบบ ( $p$ ) 2.068 MPa
- อุณหภูมิออกแบบ 343.33 °C
- ความดันใช้งาน 0.965 MPa
- ที่อุณหภูมิใช้งาน 37.778 °C

#### ข้อมูลรอยร้าว

- รอยร้าวผิว วางตัวตามแนวยาว
- ความยาวของรอยร้าว ( $2c$ ) 27.94 mm
- ความลึกของรอยร้าว ( $a$ ) 6.35 mm

#### ข้อมูลวัสดุ

- ทำจากวัสดุ SA-516 Grade 70, Carbon steel, P1, Group 1
- ความเค้นคราก 275.8 MPa
- ความต้านแรงดึงสูงสุด 482.633 MPa

หลังจากระบุข้อมูลให้กับซอฟต์แวร์แล้วทำการประเมินผล จะได้ผลการประเมินแสดงอยู่ในตารางที่ 7.14 เมื่อนำผลการประเมินจากมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับผลการประเมินที่ได้จากซอฟต์แวร์พบว่าผลลัพธ์จากวิธีทั้งสองตรงกัน

ตารางที่ 7.14 ผลการประเมินการคงสภาพตามโจทย์ข้อ 1

รายการ	ตัวอย่างจากมาตรฐาน	คำนวณด้วยซอฟต์แวร์
แผนภาพ	แผนภาพ 9.13	แผนภาพ 9.13
Screening Curve	B	B
SubCurve	1/4-t	1/4-t
$T_{ref}$ [°C]	6.11	5.861
$2c_{allow}$ [mm]	203.2	203
ผลการประเมินการคงสภาพ	acceptable	acceptable

#### 7.2.2 โจทย์ข้อ 2

##### ข้อมูลทั่วไป

- โครงสร้างออกแบบตามมาตรฐาน ASME BPV Code, Section VIII, Division 1
- ประเมินการคงสภาพระดับ 2

- ความน่าจะเป็นที่โครงสร้างจะเสียหาย (pf) 0.001
- สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COVs) 0.1
- โครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอก

#### ข้อมูลท่อ

- รัศมีภายใน 1,524 mm
- ความหนาผลิต 25.4 mm

#### ข้อมูลรอยเชื่อม

- รอยเชื่อมวางตัวตามแนวยาว
- ชนิด Double-V
- ผ่านการทำ Post Weld Heat Treated
- Weld Joint Efficiency เท่ากับ 1
- รอยเชื่อมกว้าง 10 mm

#### ข้อมูลภาวะ

- ความดันออกแบบ ( $p$ ) 2.068 MPa
- อุณหภูมิออกแบบ 343.33 °C
- ความดันใช้งาน 1.379 MPa
- ที่อุณหภูมิใช้งาน 4.4 °C
- ไม่มีความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ

#### ข้อมูลรอยร้าว

- รอยร้าวผิว วางตัวตามแนวยาว
- ความยาวของรอยร้าว ( $2c$ ) 81.28 mm
- ความลึกของรอยร้าว ( $a$ ) 5.080 mm
- รอยร้าวอยู่บริเวณรอยเชื่อม

#### ข้อมูลวัสดุ

- ทำจากวัสดุ SA-516 Grade 70, Carbon steel, P1, Group 2
- ความเค้นคราก, SMYS 262 MPa
- ความต้านแรงดึงสูงสุด 482.633 MPa
- โมดูลัสของความยืดหยุ่น 210 GPa
- ความต้านทานการแตกหักประมาณจากเส้นโค้งขอบเขตล่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1

หลังจากระบุข้อมูลให้กับซอฟต์แวร์แล้วทำการประเมินผล จะได้ผลการประเมินแสดงอยู่ในตารางที่ 7.15 เมื่อนำผลการประเมินจากมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับผลการประเมินที่ได้จากซอฟต์แวร์พบว่าผลลัพธ์จากวิธีทั้งสองตรงกัน

ตารางที่ 7.15 ผลการประเมินการคงสภาพตามโจทย์ข้อ 2

รายการ	ตัวอย่างจากมาตรฐาน	คำนวณด้วยซอฟต์แวร์
$L_r^P$	0.486	0.484
$K_r$ PosA	0.789	0.781
$K_r$ PosB	0.274	0.272
$(L_r, K_r)$ PosA	(0.486, 0.789)	(0.484, 0.781)
$(L_r, K_r)$ PosB	(0.486, 0.274)	(0.484, 0.272)
ผลการประเมินการคงสภาพ PosA	acceptable	acceptable
ผลการประเมินการคงสภาพ PosB	acceptable	acceptable

## 8 สรุป

บทนี้จะสรุปผลการดำเนินงานวิจัย เริ่มจาก ศึกษาความรู้ที่เกี่ยวข้อง, ศึกษาขั้นตอนการประเมินจากมาตรฐาน API 579 และการออกแบบเชิงวัตถุ จากนั้นออกแบบโปรแกรม และตรวจสอบการทำงานของซอฟต์แวร์ พร้อมทั้งระบุขีดความสามารถของซอฟต์แวร์และแนะนำงานวิจัยต่อเนื่อง

### 8.1 ศึกษาความรู้ที่เกี่ยวข้อง

การทำความเข้าใจการประเมินจากมาตรฐาน API 579 จำเป็นต้องใช้ความรู้กลศาสตร์การแตกหัก เช่น องค์ประกอบของกลศาสตร์การแตกหัก, แขนงของกลศาสตร์การแตกหัก, โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว, พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว, ความต้านทานการแตกหัก, สหสัมพันธ์ระหว่างอัตรา การเติบโตของรอยร้าวกับพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว และแผนภาพความเสียหาย ความรู้ทั้งหมดนี้จะเป็นพื้นฐานให้เข้าใจความหมายและขั้นตอนการประเมินการคงสภาพ, การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ และ การประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก ที่มีแสดงในมาตรฐานการประเมินต่าง ๆ

มาตรฐานการประเมินการคงสภาพที่ตีพิมพ์มีด้วยกันหลายมาตรฐาน API 579 เป็นมาตรฐานที่โดดเด่นกว่ามาตรฐานอื่น ๆ แต่ผู้ประเมินต้องทำความเข้าใจเงื่อนไขจำนวนมากในการประเมินการคงสภาพ การใช้โปรแกรมประเมินการคงสภาพจะช่วยลดงานของผู้ประเมิน อีกทั้งยังลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น โปรแกรมประเมินการคงสภาพสำเร็จรูปสามารถหาซื้อได้แต่ก็อาจไม่ครอบคลุมโครงสร้างรูปแบบต่าง ๆ และภาระที่ต้องการวิเคราะห์, ไม่สามารถเพิ่มเติมผลเฉลยใหม่ ๆ ได้ และมีราคาสูง การเขียนโปรแกรมขึ้นเองจะช่วยลดปัญหาดังกล่าว

วิเคราะห์ของโปรแกรมประเมินการคงสภาพสำเร็จรูปไม่ครอบคลุมรูปแบบของโครงสร้างและภาระที่ต้องการวิเคราะห์ของโปรแกรมประเมินการคงสภาพสำเร็จรูป การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุมีข้อดีตรงที่ยืดหยุ่นต่อการเพิ่มเติมผลเฉลยใหม่ ๆ ในอนาคต สามารถลดปัญหาดังกล่าวไปได้ การออกแบบจะเริ่มจาก การเขียนรายละเอียดของปัญหา, รายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้, ออกแบบโครงสร้างโปรแกรม

### 8.2 ผลการออกแบบโปรแกรม

หลังจากศึกษาความรู้ที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐาน API 579 จากนั้นทำการแจกแจงข้อมูลที่ต้องการระบุ จะทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างของซอฟต์แวร์ในส่วนสื่อสารกับผู้ใช้ได้ จากนั้นจึงหาความเชื่อมโยงกันของข้อมูลและออกแบบโครงสร้างของซอฟต์แวร์ ซึ่งได้ผลการออกแบบดังนี้

ซอฟต์แวร์เขียนด้วยโปรแกรม Delphi โครงสร้างของซอฟต์แวร์มีคลาสหลัก 3 คลาส คือ คลาสต่อประสานกับผู้ใช้, คลาสโครงสร้าง และคลาสประเมินสภาพ คลาสต่อประสานกับผู้ใช้มีหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้ คลาสโครงสร้างมีหน้าที่สร้างคลาสย่อย สำหรับเก็บข้อมูลสมบัติวัสดุ, รอยร้าว, ภาระใช้งาน และสำหรับคำนวณแรงขับเคลื่อนรอยร้าว, ภาระขีดจำกัด และประมาณค่าความต้านทานการแตกหัก คลาสประเมินสภาพมีหน้าที่สร้างคลาสย่อยการประเมินระดับ 1 สำหรับคำนวณความยาวรอยร้าวที่ยอมรับ และคลาสย่อยการประเมินระดับ 2 สำหรับคำนวณจุดประเมินและเส้นโค้งความเสียหาย

การตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของซอฟต์แวร์ จะใช้ปัญหาย่อย เปรียบเทียบผลการคำนวณกับการประเมินการคงสภาพโดยใช้โปรแกรม MathCAD โดยตรวจสอบ

- 1) เกณฑ์การเลือกแผนภาพการประเมินระดับ 1
- 2) เกณฑ์การเลือก screening curve
- 3) เกณฑ์การเลือกเส้นใน screening curve
- 4) การคำนวณอุณหภูมิอ้างอิง
- 5) การประเมินการคงสภาพระดับ 1
- 6) การเลือกตัวประกอบความปลอดภัย
- 7) ตรวจสอบเปรียบเทียบผลจากการระบุภาระและระบุความเค้น CTCL
- 8) การตรวจสอบการระบุภาระในโครงสร้างที่มีรอยร้าววางตัวตามยาว CSCLE1
- 9) การตรวจสอบการประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง CSCCE
- 10) การตรวจสอบการประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก CTCC พบว่าผลการประเมินจากซอฟต์แวร์ และ โปรแกรม MathCAD ให้ค่าตรงกัน

นอกจากนี้ยังใช้ซอฟต์แวร์แก้ตัวอย่างปัญหาจาก API 579 พบว่าผลการประเมินจากซอฟต์แวร์และผลจากตัวอย่างปัญหาของ API 579 ตรงกัน

### 8.3 ชีตความสามารถของซอฟต์แวร์

- 1) โปรแกรมประเมินโครงสร้างภาชนะความดันทรงกระบอกเท่านั้น
- 2) โปรแกรมรองรับภาระ ความดัน, แรงดึงแนวแกน, โมเมนต์ดัด, โพรไฟล์ความเค้นเนื่องจากภาระทางกล, ความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และความเค้นตกค้าง โดยโพรไฟล์ความเค้นเนื่องจากภาระทางกลและความเค้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ อยู่ในรูปฟังก์ชันการกระจายความเค้นตามแนวความหนาในรูปฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับสี่

- 3) โปรแกรมรองรับรอยร้าว 1 รอยเท่านั้น ชนิดของรอยร้าวที่รองรับคือ รอยร้าวผิวที่ผิวด้านในหรือด้านนอกและรอยร้าวทะลุความหนา วางตัวตามแนวยาว และแนวเส้นรอบวง ทั้งนี้หากพิจารณากรณีโครงสร้างมีความเค้นตกค้างด้วย รอยร้าวจะต้องขนานกับแนวรอยเชื่อมเท่านั้น
- 4) โปรแกรมสามารถประเมินการคงสภาพ ระดับ 1, 2, 3B ด้วยมาตรฐาน API 579, โปรแกรมสามารถประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้างที่รับภาระล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่พิจารณาการเติบโตของรอยร้าวโดยใช้แบบจำลองของ Walker และประเมินการร้าวก่อนแตกหักได้
- 5) ความต้านทานการแตกหักที่ใช้ในซอฟต์แวร์อาจมาจากการหาโดยตรงจากการทดสอบ, การประมาณจากเส้นโค้งขอบเขตล่าง, จากค่าชาร์ปี หรือ การประมาณโดยใช้ Master Curve
- 6) ป้อนข้อมูลในหน่วย SI เท่านั้น

#### 8.4 ข้อเสนอแนะ

จากความเข้าใจที่ได้ระหว่างทำงานวิจัย พบประเด็นที่น่าสนใจซึ่งสามารถทำเป็นงานวิจัยต่อเนื่อง ได้แก่ เพิ่มขีดความสามารถให้ซอฟต์แวร์ในเรื่อง เพิ่มการรองรับกลไกความเสียหายอื่น, เพิ่มการรองรับการประเมินในโครงสร้างอื่น, เพิ่มการรองรับรอยร้าวมากกว่ารอยเดียว, เพิ่มการรองรับค่าการกระจายของอุณหภูมิ จากเดิมที่ต้องรับค่าในรูปแบบของความความเค้นเท่านั้น, เพิ่มการรองรับการระบุผลเฉลยใหม่ ๆ ได้ เช่น ผลเฉลยของพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวที่ถูกค้นพบใหม่ ที่ใกล้เคียงกับปัญหาจริง ๆ , ปรับปรุงแนวคิดที่ใช้หาค่า Limit load ใหม่ ๆ , เพิ่มการรองรับการระบุค่าในหน่วยต่าง ๆ , เพิ่มการนำเสนอแบบมีรูปภาพประกอบ นอกจากนี้ยังมีประเด็น การปรับปรุงให้ซอฟต์แวร์สามารถรายงานผลการประเมินออกในรูปแบบไฟล์ที่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ทันที และ การปรับปรุงให้ซอฟต์แวร์รองรับความเค้นตกค้างที่กระจายตามแนวความหนาของโครงสร้างได้

ภาคผนวก



ภาคผนวก  
การประมาณค่าในช่วง

ในงานวิจัยนี้มีการประมาณค่าในช่วงเส้น (Linear Interpolation) เพื่อใช้ในการประมาณค่า influence coefficient แบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่

ผนวก.1 การประมาณค่าฟังก์ชัน 1 ตัวแปร

สมการประมาณค่าของฟังก์ชันที่มี 1 พารามิเตอร์  $(t/R_i)$  ได้สร้างจาก 2 ชุดข้อมูลโดยใช้

- ตำแหน่ง  $(t/R_i)_L$
- ตำแหน่ง  $(t/R_i)_U$

จากนั้นคำนวณค่า  $G_j$  ที่ตำแหน่ง  $(t/R_i)$  ใด ๆ โดย

$$G_j(t/R_i) = H(t/R_i)[(t/R_i)_U - (t/R_i)_L]^{-1}$$

$$H(t/R_i) = \{[(t/R_i)_U - (t/R_i)_L]G_L\} + \{[(t/R_i) - (t/R_i)_L]G_U\}$$

ผนวก.2 การประมาณค่าฟังก์ชันที่มี 3 ตัวแปร

สมการประมาณค่า 3 พารามิเตอร์  $(t/R_i, a/c, a/t)$  ได้สร้างจาก 8 ชุดข้อมูลที่ตำแหน่ง

- ตำแหน่ง  $(t/R_i)_L, (a/c)_L$  และ  $(a/t)_L$
- ตำแหน่ง  $(t/R_i)_L, (a/c)_L$  และ  $(a/t)_U$
- ตำแหน่ง  $(t/R_i)_L, (a/c)_U$  และ  $(a/t)_L$
- ตำแหน่ง  $(t/R_i)_L, (a/c)_U$  และ  $(a/t)_U$
- ตำแหน่ง  $(t/R_i)_U, (a/c)_L$  และ  $(a/t)_L$
- ตำแหน่ง  $(t/R_i)_U, (a/c)_L$  และ  $(a/t)_U$
- ตำแหน่ง  $(t/R_i)_U, (a/c)_U$  และ  $(a/t)_L$
- ตำแหน่ง  $(t/R_i)_U, (a/c)_U$  และ  $(a/t)_U$

จากนั้นคำนวณค่า  $G_j$  ที่ตำแหน่ง  $t/R_i, a/c, a/t$  ใด ๆ โดย

$$G_j(t/R_i, a/c, a/t) = \left\{ \frac{1}{\begin{aligned} &[(t/R_i)_U - (t/R_i)_L] \cdot [(a/c)_U - (a/c)_L] \cdot [(a/t)_U - (a/t)_L] \\ &+ [(t/R_i)_U - (t/R_i)_L] \cdot [(a/c)_U - (a/c)] \cdot [(a/t)_U - (a/t)] \cdot G_{LLL} \\ &+ [(t/R_i)_U - (t/R_i)_L] \cdot [(a/c)_U - (a/c)] \cdot [(a/t) - (a/t)_L] \cdot G_{LLU} \\ &+ [(t/R_i)_U - (t/R_i)_L] \cdot [(a/c) - (a/c)_L] \cdot [(a/t)_U - (a/t)] \cdot G_{LUL} \\ &+ [(t/R_i)_U - (t/R_i)_L] \cdot [(a/c) - (a/c)_L] \cdot [(a/t) - (a/t)_L] \cdot G_{LUU} \\ &+ [(t/R_i) - (t/R_i)_L] \cdot [(a/c)_U - (a/c)] \cdot [(a/t)_U - (a/t)] \cdot G_{ULL} \\ &+ [(t/R_i) - (t/R_i)_L] \cdot [(a/c)_U - (a/c)] \cdot [(a/t) - (a/t)_L] \cdot G_{ULU} \\ &+ [(t/R_i) - (t/R_i)_L] \cdot [(a/c) - (a/c)_L] \cdot [(a/t)_U - (a/t)] \cdot G_{UUL} \\ &+ [(t/R_i) - (t/R_i)_L] \cdot [(a/c) - (a/c)_L] \cdot [(a/t) - (a/t)_L] \cdot G_{UUU} \end{aligned}} \right\}$$



## รายการอ้างอิง

- [1] CSB, "Allied terminals,Catastrophic tank collapse," U.S. Chemical Safety and hazard investigation board, Washington, D.C.
- [2] CSB, "NDK Crystal case study: High-pressure vessel Rupture " U.S. Chemical Safety and hazard investigation board, Washington, D.C.2013.
- [3] "Rupture of Florida Gas Transmission Pipeline and Release of Natural Gas," National Transportation Safety Board Washington, D.C. 2013.
- [4] CSB, "Crude oil transmission pipeline," U.S. Chemical Safety and hazard investigation board, Washington, D.C.2010.
- [5] "Chevron Richmond refinery pipe rupture and fire," U.S. Chemical Safety and hazard investigation board, Washington, D.C. 2012-03-I-CA 2012.
- [6] J. I. Chang and C.-C. Lin, "A study of storage tank accidents," *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, pp. 51–59, 2006.
- [7] X. J. Zhou, Q. Q. Duan, H. Zhang, L. Zhao, and X. Y. Wu, "Crack-Like Flaws Pressure Vessel Fitness-For-Service Assessments and Software Programming Based on API RP 579," *Procedia Engineering*, vol. 130, pp. 1359-1370, 2015.
- [8] P. J. Budden, J. K. Sharples, and A. R. Dowling, "The R6 procedure: recent developments and comparison with alternative approaches," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 77, pp. 895-903, 2000.
- [9] N. O. Larrosa and R. A. Ainsworth, "Comparisons of the solutions of common FFS standard procedures to benchmark problems," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 139-140, pp. 36-46, 2016.
- [10] U. Zerbst, R. Hamann, and A. Wohlschlegel, "Application of the European flaw assessment procedure SINTAP to pipes," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 77, pp. 697–702, 2000.
- [11] F. Gutierrez-Solana and S. Cicero, "FITNET FFS procedure : A unified European procedure for structural integrity assessment," *Engineering Failure Analysis*, vol. 16, pp. 559–577, 2009.

- [12] P. N. Li, Y. Lei, Q. P. Zhong, and X. R. Li, "A Chinese structural integrity assessment procedure for pressure vessels containing defects," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 77, pp. 945-952, 2000.
- [13] American Petroleum Institute, American Society of Mechanical Engineering, "API 579-1/ASME FFS-1, Recommended Practice for Fitness-For-Service," ed. Washington, D.C., 2007.
- [14] K. Hasegawa, "Summary and comparison of fitness-for-service rules for structural components in the world," *Welding in the World*, vol. 51, pp. 76-84, 2007.
- [15] D. A. Osage, "Fatigue Assessment for In-Service Components - A New Part for API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service," *Procedia Engineering*, vol. 133, pp. 320-347, 2015.
- [16] BMT Fleet Technology Ltd. Structural integrity management software [Online].
- [17] Quest Integrity Group. Fitness-For-Service Software and Fracture Mechanics-Signal [Online]. Available: <http://www.questintegrity.com/products/signal-fitness-for-service/>
- [18] Fracture Assessment Software IWM VERB 8.0 [Online]. Available: <http://www.en.iwm.fraunhofer.de/profile/networking/projects-with-their-own-websites/verb/>
- [19] Betch Engineering. Betch-Software and Solutions [Online]. Available: <http://betch.com/betch-services/software-and-solutions>
- [20] TWI Ltd. Engineering Fitness-For-Service Assessment Software [Online]. Available: <http://www.twisoftware.com>
- [21] Inesco ingenieros. VINDIO 1.1 [Online]. Available: <http://www/inescoingenieros.com/en/vindio/brochure%20Vindio.pdf>
- [22] H. Kobayashi, S. Sakai, M. Asano, K. Miyazaki, T. Nagasaki, and Y. Takahashi, "Development of a Flaw Evaluation Handbook of the High Pressure Institute of Japan," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 77, pp. 929-936, 2000.
- [23] เนติพันธ์ พุทธรักษา, "การออกแบบโปรแกรมเชิงวัตถุสำหรับการประเมินการคงสภาพท่อที่มีรอยร้าวด้วยระเบียบวิธี R6," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขา

วิศวกรรมเครื่องกล, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

- [24] A. R. C. Murthy, G.S.Palani, and N. R.Iyer, "Object-Oriented Programing paradigm for damage tolerant evaluation of engineering structure components," *Advances in Engineering Software* vol. 42, pp. 12-24, 2011.
- [25] จตุพร แก้วอ่อน, "ซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพและอายุใช้งานที่เหลือของท่อที่มีรอยร้าวด้วย API 579," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [26] ยุทธนา ลีลาสวัฒนกุล, เริ่มต้นการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++, 2547.
- [27] I. Milne, R. A. Ainsworth, A. R. Dowling, and A. T. Stewart, "Assessment of the integrity of structures containing defects," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 32, pp. 3-104 1988.
- [28] U. Zerbst, R. A. Ainsworth, and K.-H. Schwalbe, "Basic principles of analytical flaw assessment methods," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 77, pp. 855-867, 2000.
- [29] A. Cosham and P. Hopkins, "An overview of the pipeline defect assesssne manual (PDAM)," 2004.
- [30] C. S. Wiesner, S. J. Maddox, W. Xu, G. A. Webster, F. M. Burdekin, R. M. Andrews, *et al.*, "Engineering critical analyses to BS 7910- the UK guide on methods for assessing the acceptability of faws in metallic structures," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 77, pp. 883-893, 2000.
- [31] R. A. Ainsworth, A. C. Bannister, and U. Zerbst, "An overview of the European flaw assessment procedure SINTAP and its validation," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 77, pp. 869-876, 2000.
- [32] M. international, "Sintap software manual," ed, 1999.
- [33] New in version 8.1 [Online]. Available: [www.iwm-verb.de/scope/#c6425](http://www.iwm-verb.de/scope/#c6425)
- [34] (2016). *Signal FFS 4.2.1 Release notes*. Available: [www.questintegrity.com/assets/PDFs/Release-Notes/Signal\\_FFS\\_4.2.1\\_Release\\_Notes.pdf](http://www.questintegrity.com/assets/PDFs/Release-Notes/Signal_FFS_4.2.1_Release_Notes.pdf)
- [35] Vindio version 1.1 [Online]. Available: [www.inseccoingenieror.com/en/vindio/brochure%20vindio.pdf](http://www.inseccoingenieror.com/en/vindio/brochure%20vindio.pdf)

- [36] Zarko Gajic, *Object Orientation with Delphi*, 2006.
- [37] P. E. J. Flewitt, "The impact of secondary and residual stresses on structural integrity," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 85, 2008.
- [38] U. Zerbst, M. Schädel, S. Webster, and R. A. Ainsworth, "Fitness-for-Service Fracture Assessment of Structures Containing Cracks," 2007.
- [39] R. A. Ainsworth and K. H. Schwalbe, *Comprehensive structural integrity fracture of materials from nano to macro*, 2007.
- [40] G. Qian, V. F. González-Albuixech, M. Niffenegger, and E. Giner, "Comparison of KI calculation methods," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 156, pp. 52–67, 2016.
- [41] P. K. Nair, "Fatigue Crack Growth model for part-Through Flaws in Plates and pipes," *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 101, pp. 53-58, 1979.
- [42] K. Hasegawa, Y. Li, R. Serizawa, M. Kikuchi, and V. Lacroix, "Proximity factor on transformation from subsurface to surface flaw," *Procedia Materials Science*, vol. 12, pp. 36-41, 2016.
- [43] U. Zerbst, R. Hamann, F. Beeck, I. Scheider, and W. Brocks, "Engineering failure assessment methods applied to pressurised components," *Nuclear Engineering Design*, vol. 200, pp. 371-381, 2000.
- [44] ชาวสวน กาญจน์มัย, ความเสียหายของวัสดุทางวิศวกรรม, 2552.
- [45] William F. Smith and Javad Hashemi, วัสดุวิศวกรรม *Foundations of Materials science and engineering 4/e*. Mc Graw Hill Education.
- [46] E. P. Asta, F. A. Cambiasso, and J. J. Balderrama, "Comparative Analysis on Structural Integrity Assessment Using Fracture Toughness Parameters Obtained by Different Methodology," presented at the SMiRT 19, Toronto, 2007.
- [47] P. Arora, P. K. Singh, V. Bhasin, K. K. Vaze, A. K. Ghosh, D. M. Pikazhendhi, et al., "Predictions For Fatigue Crack Growth Life of Cracked Pipes and Pipe Welds Using RMS SIF approach and experimental validation," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, vol. 88, pp. 384-394, 2011.
- [48] จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, กลศาสตร์การแตกหัก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มิสเตอร์ก็อปปี๋พับลิชชิ่ง, 2553.

- [49] Philip M. Besuner, David O. Harris, and Jerrell M. Thomas, *A Review of Fracture Mechanics Life Technology*, 1986.
- [50] G. S. P. A. Rama Chandra Murthy, Nagesh R. Iyer, "Object-oriented programming paradigm for damage tolerant evaluation of engineering structural components," *Elsevier*, vol. 42, pp. 12-24, 2011.
- [51] C. L. Tsai, "Fitness-for-service assessment of in-service pressure components: petrochemical components," *J. of China Pres. Ves. Technol.*, vol. 1, pp. 71-79, 2003.
- [52] M. Yu, Z. Luo, and Y. J. Chao, "Correlations between Charpy V-notch impact energy and fracture toughness of nuclear reactor pressure vessel (RPV)," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 147, pp. 187-202, 2015.
- [53] S. C. F. Gutierrez-Solana, "The knowledge and its application: Materials Engineering and Structural Integrity. Brief review of the Spanish case and contributions from Prof. Elices," *Elsevier*, vol. 16, pp. 2705-2720, 2009.
- [54] P.J. Budden, "Failure assessment diagram methods for strain-based fracture," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, pp. 537-552, 2006.
- [55] "Report of the benchmark on the fatigue propagation of a semi-elliptical crack in a plate subjected to cyclic bending," 1998.
- [56] พนิดา พานิชกุล, *Object-Oriented ฉบับพื้นฐาน*. กรุงเทพฯ: เคทีพี คอมพ์ แอนด์คอนซัลท์, 2548.
- [57] Timothy Budd, *An Introduction to Object-Oriented Programming (3rd ed.)* 2002.
- [58] D. A. Hancq, A. L. Walters, and J. L. Beuth, "Development of an Object-Oriented Fatigue Tool," *Engineering with Computers*, vol. 16, pp. 131-144, 2000.
- [59] จ. ส. สัจจะ จรัสรุ่งรวีวร, เริ่มต้นอย่างมืออาชีพด้วย *Deiphi 7* ฉบับสมบูรณ์.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพงษ์ทิพย์ ช่างพานิช เกิดวันที่ 8 ตุลาคม 2533 สถานที่เกิด โรงพยาบาลศิริราช ถนนวังหลัง แขวงศิริราช เขตบางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556

