

ซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพและอายุใช้งานที่เหลือของท่อมีรอยร้าวด้วย API RP 579

นายจตุพร แก้วอ่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

SOFTWARE FOR CRACKED-PIPE INTEGRITY AND REMAINING LIFE ASSESSMENT  
BASED ON API RP 579

Mr.Jatuporn Kaw-on

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพและอายุใช้งานที่  
เหลือของท่อมีรอยร้าวด้วย API RP 579

โดย

นายจตุพร แก้วอ่อน

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จिरพงษ์ กสิวิทย์อำนวย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จिरพงษ์ กสิวิทย์อำนวย)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.สุรินทร์ พงศ์สุภสมิทธิ์)

จตุพร แก้วอ่อน : ซอฟต์แวร์ประเมินการคงสภาพและอายุใช้งานที่เหลือของท่อมีรอยร้าวด้วย API RP 579. (SOFTWARE FOR CRACKED-PIPE INTEGRITY AND REMAINING LIFE ASSESSMENT BASED ON API RP 579) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, 118 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตาม API RP 579 สำหรับประเมินชิ้นส่วนทรงกระบอกที่มีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีวางตัวตามยาว ภายใต้ความเค้นปฐมภูมิ และความเค้นทุติยภูมิ สำหรับภาระปฐมภูมิ โปรแกรมรองรับการป้อนค่าความดันภายใน หรือการกระจายความเค้นตามแนวความหนาในรูปฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสี่ สำหรับภาระทุติยภูมิ โปรแกรมรองรับการป้อนค่าความเค้นเชิงความร้อนในรูปของการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวความหนาในรูปฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสี่ และความเค้นตกค้าง ซึ่งประมาณให้มีขนาดคงที่ตามแนวความกว้างของรอยเชื่อม โปรแกรมสามารถประเมินการคงสภาพ ประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ และประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก สำหรับการประเมินการคงสภาพ โปรแกรมรองรับการประเมินระดับ 1 ระดับ 2 และระดับ 3 (ทางเลือก B) สำหรับการประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ โปรแกรมรองรับการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันภายในที่มีแอมพลิจูดคงที่ด้วยแบบจำลองของ Walker นอกจากนี้ โปรแกรมสามารถระบุลักษณะรอยร้าวกรณีที่มีจำนวนรอยร้าวได้สูงสุด 2 รอย และโปรแกรมใช้ระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนักเพื่อคำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว

โปรแกรมเขียนด้วยภาษา Delphi 7 การพัฒนาโครงสร้างของโปรแกรมใช้แนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ และออกแบบคลาสไดอะแกรมด้วยแบบแผน Player-Role โครงสร้างของโปรแกรมจึงมีความยืดหยุ่น

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือตรวจสอบผลการคำนวณของโปรแกรมกับคำตอบของตัวอย่างใน API RP 579 และส่วนที่สอง คือประยุกต์โปรแกรมกับปัญหาทางปฏิบัติ การตรวจสอบพบว่า โปรแกรมสามารถทำงานได้ถูกต้อง และได้ผลลัพธ์สอดคล้องกับกายภาพจริงของปัญหา

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2555.....

# # 5570138321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : Pipe Crack/Integrity assessment/API RP 579/Object-oriented programming.

JATUPORN KAW-ON : SOFTWARE FOR CRACKED-PIPE INTEGRITY AND  
REMAINING LIFE ASSESSMENT BASED ON API RP 579. ADVISOR :  
ASST.PROF. JIRAPONG KASIVITAMNUAY, D.ENG., 118 pp.

This thesis develops a computer program based on API RP 579 for evaluation of a cylindrical component containing a longitudinal-semi-elliptical surface crack subjected to primary and secondary stresses. The program can analyze the primary stress in the form of the internal pressure or the 4<sup>th</sup> order polynomial function of stress distribution along the thickness. The program can analyze the thermal stress due to 4<sup>th</sup> order polynomial function of the temperature profile along the thickness and the uniform residual stress profile along the weld's width. The program can perform the integrity, the remaining life and the leak-before-beak assessments. In case of the integrity assessment, the program can perform Level 1, Level 2 and Level 3 (Option B). In case of the remaining life assessment, the program can analyze the crack growth due to fluctuating internal pressure with constant amplitude using the Walker's model. Furthermore, the program can characterize the maximum of 2 cracks. The program adopted the weight function method for calculation the crack tip parameter.

The program is developed using Delphi 7. The structure of the program is developed based on the object-oriented programming concept and uses the Player-Role pattern to design class diagram. Therefore, the structure of the program is flexible.

Validation the program is divided into 2 parts. First, the calculation results from the program are validated with the example in API RP 579. Second, the program is applied to several practical problems. It is found that the program works correctly and the results are consistent with a physical observation.

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

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

Academic Year: ..... 2012 .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านโดยเฉพาะการช่วยเหลืออย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ผู้รับผิดชอบงานวิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูงที่สละเวลา ให้ความรู้ คำปรึกษา และแนวคิดการดำเนินงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อน และบุคคลรอบข้างที่ให้กำลังใจ และช่วยเหลือด้วยความเต็มใจตลอดระยะเวลาการศึกษา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนด้านการศึกษา เป็นกำลังใจ และคอยช่วยเหลือในทุกเรื่องตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาทำให้ผู้รับผิดชอบงานวิจัยทำงานวิจัยสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง         |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ         |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ         |
| สารบัญ.....  | ช         |
| สารบัญตาราง.....   | ฎ         |
| สารบัญรูป.....   | ฏ         |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....                                   | ฅ         |
| <b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ.....                                       | 1         |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....  | 6         |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....                                       | 6         |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                               | 6         |
| <b>บทที่ 2 กลศาสตร์การแตกหักยึดหยุ่นเชิงเส้น.....</b>            | <b>7</b>  |
| 2.1 โหมดการเสียรูป.....  | 7         |
| 2.2 พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว.....                                  | 8         |
| 2.3 ระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนัก.....                              | 9         |
| 2.4 ความต้านทานการแตกหัก.....                                    | 10        |
| 2.5 ความเสียหายของชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว.....                      | 10        |
| 2.5.1 การแตกหัก.....   | 11        |
| 2.5.2 การครากทั้งหน้าตัด.....                                    | 12        |
| 2.6 การเติบโตของรอยร้าวล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่.....               | 12        |
| <b>บทที่ 3 API RP 579 กับการประเมินชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว.....</b> | <b>15</b> |
| 3.1 ภาพรวมการประเมิน.....  | 15        |
| 3.2 การวิเคราะห์ความเค้น.....                                    | 16        |
| 3.3 การระบุลักษณะรอยร้าว.....                                    | 17        |
| 3.4 การประเมินการคงสภาพ.....                                     | 18        |

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 3.4.1 การประเมินระดับ 1 .....                                   | 18        |
| 3.4.2 การประเมินระดับ 2 .....                                   | 21        |
| 3.4.3 การประเมินระดับ 3 (ทางเลือก B) .....                      | 25        |
| 3.5 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ .....                          | 26        |
| 3.6 การประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก .....                        | 27        |
| <b>บทที่ 4 การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ .....</b>                   | <b>29</b> |
| 4.1 แนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ .....                        | 29        |
| 4.2 คลาสและวัตถุ .....  | 30        |
| 4.3 สมบัติพิเศษของโปรแกรมเชิงวัตถุ .....                        | 32        |
| 4.4 พื้นฐานของการพัฒนาโปรแกรม .....                             | 34        |
| <b>บทที่ 5 การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมและผลการออกแบบ .....</b> | <b>36</b> |
| 5.1 แนวความคิดรวบยอด .....                                      | 36        |
| 5.2 การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม .....                          | 36        |
| 5.2.1 เนื้อหาของปัญหา .....                                     | 36        |
| 5.2.2 การสร้างคลาส .....  | 37        |
| 5.2.3 การออกแบบคลาสไดอะแกรม .....                               | 39        |
| 5.3 การปรับปรุงคลาสไดอะแกรม .....                               | 40        |
| 5.3.1 การปรับปรุงคลาส TIntegrity .....                          | 41        |
| 5.3.2 การปรับปรุงคลาส TCrackPipe .....                          | 41        |
| 5.4 การทำงานของโปรแกรม .....                                    | 42        |
| 5.4.1 การประเมินการคงสภาพ .....                                 | 43        |
| 5.4.2 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ .....                        | 44        |
| 5.4.3 การประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก .....                      | 45        |
| 5.5 การทำงานในแต่ละคลาส .....                                   | 45        |
| 5.5.1 คลาส TMaterial .....                                      | 46        |
| 5.5.1.1 ความเค้นที่ยอมรับได้ .....                              | 46        |
| 5.5.1.2 อุณหภูมิอ้างอิง .....                                   | 46        |
| 5.5.1.3 ความต้านทานการแตกหัก .....                              | 46        |
| 5.5.2 คลาส TCharacterizeCrack .....                             | 47        |



|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 5.5.3 คลาส TCrackPipe .....                                     | 48        |
| 5.5.3.1 ความเค้นตกค้าง .....                                    | 48        |
| 5.5.3.2 ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ .....                         | 49        |
| 5.5.3.3 พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว .....                            | 50        |
| 5.5.4 คลาส TCrackGrowth .....                                   | 51        |
| 5.5.5 คลาส TLBB .....   | 52        |
| 5.6 อินเตอร์เฟซของโปรแกรม .....                                 | 53        |
| 5.6.1 ขอบเขตประเมิน .....                                       | 55        |
| 5.6.2 ระบุสมบัติวัสดุ .....                                     | 56        |
| 5.6.3 ขนาดชิ้นส่วน .....  | 60        |
| 5.6.4 ภาระใช้งาน .....  | 61        |
| 5.6.5 ข้อมูลรอยร้าว .....                                       | 62        |
| 5.6.6 ผลการประเมิน .....  | 64        |
| 5.6.7 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือและการรื้อก่อนการแตกหัก ..... | 66        |
| <b>บทที่ 6 การตรวจสอบและการประยุกต์ใช้งานโปรแกรม .....</b>      | <b>68</b> |
| 6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม .....                       | 68        |
| 6.1.1 โจทย์ข้อที่ 1 .....                                       | 68        |
| 6.1.2 โจทย์ข้อที่ 2 .....                                       | 70        |
| 6.1.3 โจทย์ข้อที่ 3 .....                                       | 73        |
| 6.1.4 โจทย์ข้อที่ 4 .....                                       | 76        |
| 6.2 การประยุกต์โปรแกรมกับปัญหาที่ซับซ้อน .....                  | 78        |
| 6.2.1 โจทย์ข้อที่ 5 .....                                       | 78        |
| 6.2.2 โจทย์ข้อที่ 6 .....                                       | 80        |
| 6.2.3 โจทย์ข้อที่ 7 .....                                       | 84        |
| <b>บทที่ 7 สรุปผล .....</b>                                     | <b>89</b> |
| 7.1 ผลการออกแบบโปรแกรม .....                                    | 89        |
| 7.2 ผลการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม .....                        | 90        |
| 7.3 ขีดความสามารถของโปรแกรม .....                               | 91        |
| 7.4 ภาระงานวิจัยต่อเนื่อง .....                                 | 92        |

|  |      |
|--|------|
|  | หน้า |
| รายการอ้างอิง.....   | 93   |
| ภาคผนวก .....  | 96   |
| ภาคผนวก ก การกระจายความเค้น.....                           | 97   |
| ก.1 การกระจายความเค้นในรูปฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสี่..... | 97   |
| ก.2 ตัวอย่างผลเฉลยความเค้นตามเส้นรอบวง.....                | 98   |
| ภาคผนวก ข การระบุลักษณะรอยร้าว.....                        | 100  |
| ภาคผนวก ค ผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว.....                | 107  |
| ค.1 ท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกน.....                | 107  |
| ค.2 ท่อมีรอยร้าวทะลุความหนาขนานแกน.....                    | 111  |
| ภาคผนวก จ ผลเฉลยความเค้นอ้างอิง.....                       | 112  |
| จ.1 ท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนที่ผนังด้านใน.....   | 112  |
| จ.2 ท่อมีรอยร้าวทะลุความหนาขนานแกน.....                    | 113  |
| ภาคผนวก ฉ โพรไฟล์ของสนามความเค้นตกค้าง.....                | 114  |
| ภาคผนวก ช การประมาณค่าความต้านทานการแตกหัก.....            | 116  |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....                            | 118  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |  | หน้า |
|----------|--|------|
| 3.1      | เงื่อนไขการเลือกแผนภาพประเมินสำหรับการประเมินระดับ 1.....  | 19   |
| 5.1      | สมบัติและพฤติกรรมของคลาส.....  | 38   |
| 6.1      | ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 1.....  | 70   |
| 6.2      | ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 สำหรับโจทย์ข้อที่ 2.....  | 73   |
| 6.3      | ผลการประเมินอายุใช้งานที่เหลือและการรั่วก่อนการแตกหัก.....   | 77   |
| 6.4      | เปรียบเทียบความยาวและความลึกรอยร้าวที่จำนวนรอบต่างๆ.....   | 77   |
| 6.5      | พารามิเตอร์สำหรับโจทย์ปัญหาข้อที่ 5.....   | 78   |
| 6.6      | สมบัติวัสดุของโจทย์ปัญหาข้อที่ 5.....  | 79   |
| 6.7      | ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 สำหรับโจทย์ข้อที่ 5.....  | 80   |
| 6.8      | สมบัติวัสดุสำหรับโจทย์ข้อที่ 6.....  | 81   |
| 6.9      | ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 สำหรับโจทย์ข้อที่ 6.....  | 83   |
| 6.10     | สมบัติวัสดุสำหรับโจทย์ข้อที่ 7.....  | 85   |
| 6.11     | ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 สำหรับโจทย์ข้อที่ 7.....  | 88   |
| ข.1      | การระบุรอยร้าวอุดมคติ.....   | 100  |
| ข.2      | การจัดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าวต่างระนาบ.....   | 103  |
| ข.3      | การจัดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าวระนาบเดียวกัน.....   | 104  |
| ข.4      | การเปลี่ยนชนิดรอยร้าว.....   | 105  |
| ช.1      | ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างความต้านทานการแตกหักค่ากลาง<br>และความต้านทานการแตกหักขอบเขตล่าง..... | 117  |

## สารบัญรูป

| รูปที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 1.1    | แผนภาพการทำงานของโปรแกรม MASI .....   | 4    |
| 1.2    | โครงสร้างของโปรแกรมเชิงวัตถุสำหรับการประเมินการคงสภาพ<br>ของท่อที่มีรอยร้าวด้วยระเบียบวิธี R6 ..... | 5    |
| 1.3    | คลาสไดอะแกรมเมื่อเพิ่มคลาส Elbow .....  | 5    |
| 2.1    | โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว .....  | 7    |
| 2.2    | องค์ประกอบความเค้นที่ปลายรอยร้าว .....  | 8    |
| 2.3    | การนำแนวคิดหลักการซ้อนทับประยุกต์ใช้กับการหา<br>ผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว .....                  | 9    |
| 2.4    | แผนภาพแรงขับเคลื่อนที่ปลายรอยร้าว .....   | 12   |
| 2.5    | ภาระล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่ .....  | 13   |
| 2.6    | ลักษณะของเส้นโค้ง $da/dN - \Delta K$ ที่พบโดยทั่วไป (บนสเกลล็อก-ล็อก) .....                         | 14   |
| 3.1    | ภาพรวมการจัดการกับชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว .....  | 16   |
| 3.2    | แผนภาพประเมินกรณีชิ้นส่วนเป็นทรงกระบอกมีรอยร้าว<br>และรอยเชื่อมขนาดชิ้นส่วน .....                   | 19   |
| 3.3    | การเลือกกราฟประเมิน .....   | 20   |
| 3.4    | แผนภาพความเสียหาย .....   | 21   |
| 4.1    | สัญลักษณ์ของคลาสรถยนต์ .....  | 30   |
| 4.2    | คลาสไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลาสคนขับและคลาสรถยนต์ .....                                     | 31   |
| 4.3    | รถยนต์ A และรถยนต์ B ถูกสร้างจากคลาสรถยนต์ .....  | 31   |
| 4.4    | การสืบทอดของคลาสสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม .....  | 32   |
| 4.5    | การสร้างวัตถุเพื่อวาดรูปเรขาคณิต .....  | 33   |
| 4.6    | ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรม .....   | 34   |
| 4.7    | คลาสไดอะแกรมที่ใช้แบบแผน Player-Role เพื่อคำนวณค่าแรง .....   | 35   |
| 5.1    | คลาสไดอะแกรมที่ออกแบบ .....   | 40   |
| 5.2    | การปรับปรุงคลาส TIntegrity .....  | 41   |
| 5.3    | การปรับปรุงคลาส TCrackPipe .....  | 41   |
| 5.4    | คลาสไดอะแกรมหลังจากปรับปรุงด้วยแนวคิดเชิงวัตถุ .....  | 42   |
| 5.5    | การคำนวณความเค้นที่ยอมรับได้ .....  | 46   |

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 5.6    | การทำงานของคลาส TCharacterizeCrack..... 48  |
| 5.7    | การแทนที่โปรไฟล์การกระจายความเค้นตกค้างด้วยโปรไฟล์อย่างง่าย..... 48                           |
| 5.8    | ขั้นตอนการทำนายอายุที่เหลือของรอยร้าว..... 52   |
| 5.9    | ขั้นตอนการวิเคราะห์การรื้อก่อนการแตกหัก..... 53   |
| 5.10   | ส่วนประกอบของอินเตอร์เฟส..... 54  |
| 5.11   | อินเตอร์เฟสการระบุขอบเขตประเมิน..... 55   |
| 5.12   | อินเตอร์เฟสสมบัติวัสดุ แถบย่อยสมบัติแรงดึง..... 56  |
| 5.13   | อินเตอร์เฟสสมบัติวัสดุ แถบย่อยความต้านทานการแตกหัก..... 57                                    |
| 5.14   | อินเตอร์เฟสสมบัติวัสดุ แถบย่อยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น<br>และความเครียด..... 58            |
| 5.15   | อินเตอร์เฟสฐานข้อมูล..... 59  |
| 5.16   | อินเตอร์เฟสการระบุขนาดชิ้นส่วน..... 60  |
| 5.17   | อินเตอร์เฟสการระบุภาระใช้งาน..... 61  |
| 5.18   | อินเตอร์เฟสข้อมูลรอยร้าว 1 รอย..... 62  |
| 5.19   | อินเตอร์เฟสข้อมูลรอยร้าว 2 รอย..... 63  |
| 5.20   | อินเตอร์เฟสผลการประเมินระดับ 1..... 64  |
| 5.21   | อินเตอร์เฟสผลการประเมินระดับ 2..... 65  |
| 5.22   | อินเตอร์เฟสแถบประเมินอายุใช้งานที่เหลือและการรื้อก่อนการแตกหัก..... 66                        |
| 5.23   | ตัวอย่างการแสดงผลแถบประเมินอายุใช้งานที่เหลือ<br>และการรื้อก่อนการแตกหัก..... 67              |
| 6.1    | รอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อ..... 68  |
| 6.2    | แผนภาพประเมินสำหรับท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีที่ผนัง<br>ด้านในขนานแกนท่อและรอยเชื่อม..... 69 |
| 6.3    | แผนภาพความเสียหายของโหนดข้อที่ 2..... 73  |
| 6.4    | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม..... 74                                   |
| 6.5    | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง..... 74  |
| 6.6    | เส้นโค้งความเสียหายที่ขึ้นกับสมบัติวัสดุ..... 75  |
| 6.7    | แผนภาพความเสียหายสำหรับโหนดข้อที่ 3..... 75   |

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 6.8    | เปรียบเทียบเส้นโค้งความเสียหายจากการคำนวณโดยตรง<br>และการใช้โปรแกรม..... 75                      |
| 6.9    | อุณหภูมิที่เวลาต่างๆ บนผนังถึงเก็บความดันสำหรับโจทย์ข้อที่ 6..... 80                             |
| 6.10   | การเติบโตของรอยร้าวจริงของถึงเก็บความดันสำหรับโจทย์ข้อที่ 6..... 81                              |
| 6.11   | ถึงเก็บความดันที่มีรอยร้าวรูปครึ่งวงรีที่ผนังด้านนอก..... 84                                     |
| 6.12   | ความดันที่เวลาต่างๆ ภายในถึงเก็บความดัน..... 84  |
| 6.13   | อุณหภูมิที่เวลาต่างๆ บนผนังถึงเก็บความดันสำหรับโจทย์ข้อที่ 7..... 85                             |
| 6.14   | การเติบโตของรอยร้าวจริงของถึงเก็บความดันสำหรับโจทย์ข้อที่ 7..... 86                              |
| ก.1    | การกระจายความเค้นบนผนังท่อ..... 97   |
| ก.2    | การเปลี่ยนฟังก์ชันความเค้นให้อยู่ในรูปผลบวกของฟังก์ชันอย่างง่าย..... 97                          |
| ข.1    | การเปลี่ยนแนววางตัวของรอยร้าว..... 100   |
| ข.2    | การหาความลึกลับสมมูล..... 100  |
| ข.3    | การเปลี่ยนแนววางตัวรอยร้าวแตกแขนง..... 102   |
| ข.4    | การหาความลึกลับสมมูลรอยร้าวแตกแขนง..... 102  |
| ค.1    | ท่อรับความดันภายในมีรอยร้าวรูปครึ่งวงรีที่ผนังด้านใน<br>และรอยร้าววางตัวตามแนวแกนของท่อ..... 105 |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| สัญลักษณ์           | คำอธิบาย  |
|---------------------|---|
| $a$                 | ความลึกรอยร้าว (Crack depth)  |
| $da / dN$           | อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า (Fatigue crack growth rate)   |
| $B$                 | อัตราส่วนความเค้นหลัก (Biaxiality ratio)  |
| $CVN$               | พลังงานชาร์ปี (Charpy energy)   |
| $COA$               | พื้นที่ของปากรอยร้าว (Crack opening area)   |
| $COV$               | สัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (Coefficient of variation)   |
| $c$                 | ครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าวรูปครึ่งวงรี (Half of crack length)                                      |
| $D_h$               | เส้นผ่านศูนย์กลางของไหล (Hydraulic diameter)  |
| $E_y$               | มอดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus)   |
| $f_F$               | สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหล (Friction factor)   |
| $Q$                 | อัตราการรั่ว (Leak rate)  |
| $\nu$               | อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)   |
| $\varepsilon_{ref}$ | ความเครียดอ้างอิง (Reference strain)  |
| $J^{SR}$            | พารามิเตอร์ $J$ ทุดิยภูมิ (Secondary $J$ -integral)   |
| $\Delta K$          | พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น<br>(Stress intensity factor range)                                |
| $\Delta K_{th}$     | ค่าขีดเริ่มของพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น<br>(Threshold stress intensity factor range)        |
| $K_{IC}$            | ความต้านทานการแตกหักโหมด 1 ในสถานะความเครียดระนาบ<br>(Fracture toughness)                           |
| $K_{mat}$           | ความต้านทานการแตกหักที่ใช้ในการประเมิน<br>(Assessment fracture toughness)                           |
| $K_I^P$             | พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเนื่องจากความเค้น (หรือภาระ) ปฐมภูมิ<br>(Primary stress intensity factor)     |
| $K_I^{SR}$          | พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเนื่องจากความเค้น (หรือภาระ) ทุดิยภูมิ<br>(Secondary stress intensity factor) |
| $L_r^P$             | อัตราส่วนภาระปฐมภูมิ (Primary load ratio)   |
| $L_{r(max)}^P$      | อัตราส่วนภาระปฐมภูมิสูงสุด (Maximum primary load ratio)   |
| $L_r^{SR}$          | อัตราส่วนภาระทุติยภูมิ (Secondary load ratio)   |
| $MYS$               | ความแข็งแรงครากต่ำสุด (Minimum yield strength)  |

| สัญลักษณ์           | คำอธิบาย  |
|---------------------|---|
| $m(x, a)$           | ฟังก์ชันน้ำหนัก (Weight function)   |
| $N$                 | จำนวนรอบภาระ (Number of cycle)  |
| $P_b$               | ความเค้นดัดปฐมภูมิ (Primary bending stress)   |
| $P_m$               | ความเค้นเมมเบรนปฐมภูมิ (Primary membrane stress)  |
| $PSF_a$             | ตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับปรับแก้ขนาดรอยร้าว<br>(Partial safety factor for crack)                       |
| $PSF_k$             | ตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับปรับแก้ความต้านทานการแตกหัก<br>(Partial safety factor for fracture toughness) |
| $PSF_s$             | ตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับปรับแก้ความเค้น (หรือภาระ)<br>(Partial safety factor for loading)             |
| $p$                 | ความดันภายในท่อ (Internal pressure)   |
| $Q_b$               | ความเค้นดัดทุติยภูมิ (Secondary bending stress)   |
| $Q_m$               | ความเค้นเมมเบรนทุติยภูมิ (Secondary membrane stress)  |
| $R_i$               | รัศมีในของท่อ หรือภาชนะรูปทรงกระบอก (Inner radius)  |
| $R_o$               | รัศมีนอกของท่อ หรือภาชนะรูปทรงกระบอก (Outer radius)   |
| $\rho$              | ความหนาแน่นของไหล (Density of fluid)  |
| $\sigma_{ys}$       | ความแข็งแรงคราก (Yield strength)  |
| $\sigma_{ust}$      | ความแข็งแรงสูงสุด (Maximum ultimate strength)   |
| $\sigma_{ref}^P$    | ความเค้นอ้างอิงเนื่องจากความเค้น (หรือภาระ) ปฐมภูมิ<br>(Primary reference stress)                       |
| $\sigma_{ref}^{SR}$ | ความเค้นอ้างอิงเนื่องจากความเค้น (หรือภาระ) ทุติยภูมิ<br>(Secondary reference stress)                   |
| $T$                 | อุณหภูมิประเมิน (Assessment temperature)  |
| $T_{ref}$           | อุณหภูมิอ้างอิง (Reference temperature)   |
| $t$                 | ความหนาท่อ หรือภาชนะรูปทรงกระบอก (Thickness)  |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ท่อเป็นโครงสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้ขนถ่ายของไหลซึ่งพบได้ทั่วไปตั้งแต่ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ เช่น โรงงานปิโตรเคมี และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ความเสียหายของท่อสามารถสร้างความเสียหายรุนแรงให้กับชีวิต ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม ดังที่ปรากฏเป็นข่าวตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เช่น ในปี 2004 เกิดการรั่วไหลของสาร anhydrous ammonia ลงสู่แหล่งน้ำใกล้เคียงทำให้ปลาหลายหมื่นตัวต้องตาย โดยมีปลาที่ใกล้จะสูญพันธุ์รวมอยู่ด้วย ซึ่งคิดเป็นมูลค่าความเสียหายหลายแสนเหรียญสหรัฐ [1] ในปี 2005 เกิดเหตุระเบิดของท่อ LPG ในประเทศเบลเยียมทำให้มีผู้เสียชีวิต และบาดเจ็บรวมแล้วกว่าหนึ่งร้อยคน [2] ในปี 2010 ท่อส่งก๊าซธรรมชาติในรัฐแคลิฟอร์เนียเกิดการรั่ว และทำให้เกิดเพลิงไหม้ทำลายบ้านเรือนร่วมร้อยหลัง มีผู้เสียชีวิต ผู้ได้รับบาดเจ็บ และผู้อพยพอีกจำนวนมาก [3] เป็นต้น นอกจากนี้ตัวอย่างอุบัติเหตุดังกล่าวแล้วยังมีอุบัติเหตุอื่นๆ ที่เกิดจากความเสียหายของท่ออีกเป็นจำนวนมาก [4] อุบัติเหตุเหล่านี้สะท้อนว่าโครงสร้าง หรืออุปกรณ์ในงานวิศวกรรมจำเป็นต้องได้รับการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม

ความเสียหายของท่อสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ ความเสียหายทางกล (Mechanical damage) และความเสียหายจากสภาพแวดล้อม (Environmental damage) [5] ความเสียหายทางกลมักจะเกิดขึ้นขณะติดตั้ง หรือซ่อมบำรุงท่อ เช่น การเกยของผนังท่อที่เชื่อมกัน [6] การเจียรผิวรอยเชื่อมไม่เรียบเสมอกับผิวท่อ [7] รอยบุ๋ม (Dent) [5] และรอยครูด (Gouge) [1],[5] เป็นต้น ขณะใช้งานบริเวณดังกล่าวจะเป็นตำแหน่งของความเค้นหนาแน่น (Stress concentrator) จึงต้องรับความเค้นสูงกว่าบริเวณอื่น และกลายเป็นต้นกำเนิดของรอยร้าวในที่สุด

ความเสียหายจากสภาพแวดล้อมพบในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive environment) ร่วมกับภาระที่กระทำกับท่อ ท่อที่รับภาระสถิต (Static load) มีโอกาสแตกร้าวนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (Stress Corrosion Cracking, SCC) [8],[9] กรณีท่อรับภาระล้า (Fatigue load) มีโอกาสแตกร้าวนื่องจากความล้าร่วมกับการกัดกร่อน (Corrosion fatigue cracking) [10] เป็นต้น จะเห็นว่าการเสียหายทางกล และความเสียหายจากสภาพแวดล้อมล้วนนำไปสู่การเกิดรอยร้าว ซึ่งสามารถเติบโตจนทำให้ท่อแตกหักในที่สุด

เมื่อตรวจพบรอยร้าวในท่อ สิ่งที่ได้รับผิดชอบต้องดำเนินการคือ วิเคราะห์ว่ารอยร้าวส่งผลอย่างไรต่อการทำงานของท่อ การวิเคราะห์นี้เรียกว่า การประเมินการคงสภาพ (Structural integrity assessment) หากการประเมินแสดงว่าท่อที่มีรอยร้าวขนาดที่ตรวจพบสามารถใช้งานต่อไปได้ จึงวิเคราะห์ต่อไปว่า ภายใต้สภาวะใช้งานปัจจุบันหรือที่จะปรับเปลี่ยนในอนาคต ท่อสามารถใช้งานต่อไปได้อีกนานเพียงใด ก่อนที่รอยร้าวจะเติบโตถึงขนาดที่ยอมรับได้ การ

วิเคราะห์นี้เรียกว่า การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ (Remaining life assessment) นอกจากนั้น กรณีที่ท่อร์รับความดันภายใน ผู้รับผิดชอบอาจวิเคราะห์หาขนาดรอยร้าว ณ อัตราการรั่วที่ตรวจพบได้ การวิเคราะห์นี้เรียกว่า การประเมินการรั่วก่อนแตกหัก (Leak-Before-Break assessment, LBB) การประเมินการคงสภาพ การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ และการประเมินการรั่วก่อนแตกหัก จึงเป็นสิ่งจำเป็นซึ่งจะช่วยสร้างความเชื่อมั่นในการทำงาน และเป็นแนวทางการวางแผนซ่อมบำรุงที่เหมาะสมได้

ปัจจุบันวิธีการประเมินการคงสภาพและอายุที่เหลือของโครงสร้างที่มีรอยร้าวถูกรวบรวมเป็นมาตรฐานต่างๆ เช่น R6 [11], BSI PD6493 (BS 7910) [12], SAQ [13], EXXON [13], MPC [13], GE-EPRI [13], ETM [13], API RP 579 [14] และ SINTAP [15] เป็นต้น API RP 579 เป็นมาตรฐานหนึ่งที่น่าสนใจ ถึงแม้ความสามารถในการประเมินการคงสภาพจะน้อยกว่า R6 และ BS 7910 แต่ API RP 579 มีจุดเด่นกว่ามาตรฐานอื่นดังนี้

1) มาตรฐานรองรับโครงสร้างหลายชนิด API RP 579 เป็นมาตรฐานสำหรับภาชนะรับความดันในโรงงานไฟฟ้า และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งครอบคลุมกว่าบางมาตรฐาน เช่น R6 ที่รองรับชิ้นส่วนในโรงไฟฟ้าเท่านั้น และ BS 7910 ที่รองรับชิ้นส่วนแท่นขุดเจาะน้ำมัน (Offshore) ถึงความดัน (Pressure vessel) และระบบท่อ (Pipe line) เท่านั้น เป็นต้น

2) มาตรฐานรองรับความเสียหายหลายรูปแบบ API RP 579 มีคำแนะนำสำหรับประเมินความเสียหายของชิ้นส่วนได้ 13 ชนิด เช่น การแตกหักเปราะ (Brittle fracture) การเสียเนื้อโลหะ (General metal loss) การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) ความเสียหายจากรอยร้าว (Crack-like flaw) การคืบ (Creep) และความเสียหายจากไฟไหม้ (Fire damage) เป็นต้น ในขณะที่มาตรฐานอื่น เช่น R6 และ SINTAP รองรับชิ้นส่วนที่เสียหายจากรอยร้าวเท่านั้น เป็นต้น

3) มาตรฐานประเมินได้หลายรูปแบบ เช่น กรณีชิ้นส่วนมีรอยร้าว API RP 579 มีรายละเอียดการประเมิน 3 แบบ คือ ประเมินการคงสภาพ ประเมินอายุใช้งานที่เหลือ และประเมินการรั่วก่อนแตกหัก สำหรับการประเมินการคงสภาพ มาตรฐานมีจุดเด่นกว่ามาตรฐานอื่น คือการประเมินแบ่งออกเป็น 3 ระดับ โดยการประเมินระดับ 1 หรือ Screening ซึ่งใช้ข้อมูลน้อยจึงประเมินได้ง่าย

4) มาตรฐานมีคำแนะนำประกอบการประเมินครบถ้วน API RP 579 มีคำแนะนำการซ่อมบำรุง การวางแผนการซ่อมบำรุง การทำเอกสารซ่อมบำรุง ตัวอย่างข้อมูลวัสดุ ตัวอย่างการใช้งานมาตรฐาน และผลเฉลยความเค้น เป็นต้น ขณะที่มาตรฐานอื่นไม่มีตัวอย่างการใช้งานมาตรฐานหรือมีน้อย เป็นต้น

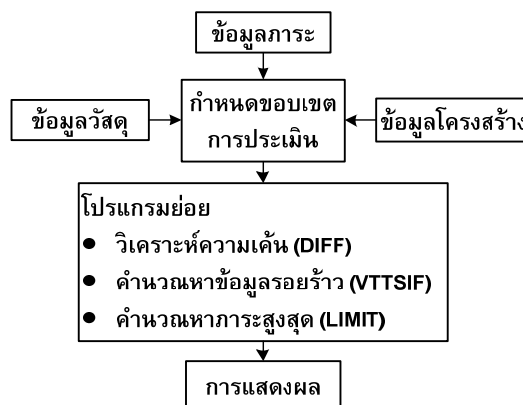
อย่างไรก็ดี ขั้นตอนของการประเมินแต่ละขั้นใน API RP 579 มีรายละเอียดปลีกย่อย และเกี่ยวข้องกับสมการจำนวนมาก การประเมินจึงใช้เวลานาน นอกจากนี้ผู้ประเมินควรมีความรู้ด้านกลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics) พอสมควร อุปสรรคดังกล่าวสามารถ

แก้ไขได้ด้วยการพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปที่ทำงานตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในมาตรฐาน แนวทางนี้จะอำนวยความสะดวกให้กับผู้ประเมิน เพราะผู้ประเมินมีหน้าที่จัดเตรียมข้อมูลเท่านั้น

ปัจจุบันโปรแกรมสำหรับการประเมินการคงสภาพและอายุการใช้งานที่เหลือของท่อมีรอยร้าวแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ โปรแกรมเชิงพาณิชย์ (Commercial software) และโปรแกรมระดับงานวิจัย จากการสำรวจยังไม่พบโปรแกรมระดับงานวิจัยที่พัฒนาโดยอ้างอิงกับ API RP 579 แต่พบโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่อ้างอิงกับมาตรฐานดังกล่าว ได้แก่ FlawCheck [16], EngFit [17], FFS TOOLBOX [18] และ IWM VERB 8.0 [19] เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า API RP 579 เป็นมาตรฐานที่น่าเชื่อถือ และเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์เป็นโปรแกรมสำเร็จรูป โปรแกรมเชิงพาณิชย์เหล่านี้ยกเว้นโปรแกรม IWM VERB 8.0 สามารถประเมินการคงสภาพได้เพียงขั้นต้น กล่าวคือ ประเมินฯได้เพียงระดับ 1 และไม่รองรับกรณีโครงสร้างรับภาระที่ซับซ้อน เช่น ความเค้นตกค้าง (Residual stress) ความเค้นเชิงความร้อน (Thermal stress) เป็นต้น ผลการประเมินจึงค่อนข้างเพื่อความปลอดภัย (Conservative) น้อยเกินไป โปรแกรม IWM VERB 8.0 แม้จะรองรับภาระที่ซับซ้อนแต่ยังขาดส่วนระบุลักษณะรอยร้าว ซึ่งจำเป็นในกรณีของรอยร้าวเฉียง หรือรอยร้าว 2 รอย อีกทั้งราคาของโปรแกรมเชิงพาณิชย์ค่อนข้างสูง เช่น โปรแกรม FlawCheck และ FFS TOOLBOX มีราคา \$3,000 และ \$1,495 ตามลำดับ เป็นต้น

สำหรับโปรแกรมระดับงานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะพัฒนาขึ้นเพื่อการประเมินโครงสร้างหรือลักษณะความเค้น หรือความเสียหายเฉพาะอย่าง เช่น Technical center of Finland (VVT) [20] ประดิษฐ์โปรแกรม MASI สำหรับประเมินการคงสภาพของโครงสร้างมีรอยร้าวในโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ที่รับภาระเนื่องจากสนามความร้อน (Temperature field) หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบทันทีทันใด (Thermal shock) จากรูปที่ 1.1 การทำงานของโปรแกรม MASI คือ โปรแกรมรับข้อมูลสำหรับการประเมิน ได้แก่ ข้อมูลวัสดุ ข้อมูลภาระ และข้อมูลโครงสร้าง จากนั้นกำหนดขอบเขตการประเมิน โดยมีโปรแกรมย่อยคือ DIFF, VTTSIF และ LIMIT ทำหน้าที่วิเคราะห์ความเค้น คำนวณหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว และภาวะครากสูงสุด ตามลำดับ โปรแกรมใช้ภาษาฟอร์แทรน (Fortran) เขียนโปรแกรมย่อย และใช้ Visual basic เขียนส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (Graphical User Interface, GUI)

จุดเด่นของโปรแกรม MASI คือ โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิซึ่งมีความซับซ้อนได้ แต่โปรแกรมเขียนด้วยแนวคิดเชิงกระบวนการ (Procedural concept) จึงไม่เอื้อต่อการเพิ่มขีดความสามารถในอนาคต เพราะขณะที่โปรแกรมหลักทำงานจะเรียกใช้โปรแกรมย่อยเป็นระยะๆ จึงมีโอกาสที่ตัวแปรในโปรแกรมหลักจะถูกเปลี่ยนแปลงอย่างไม่ตั้งใจ โดยโปรแกรมย่อยที่เพิ่มเข้าไปใหม่ ทำให้โปรแกรมทำงานผิดพลาด



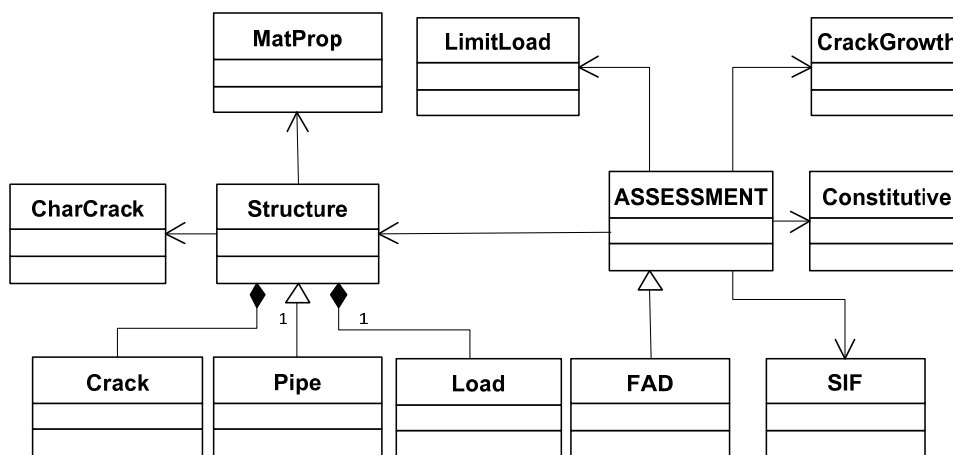
รูปที่ 1.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม MASI [20]

จากการศึกษาพบว่า การเขียนโปรแกรมด้วยแนวคิดเชิงวัตถุ (Object-Oriented Programming, OOP) เป็นแนวคิดหนึ่งที่เกี่ยวข้องการพัฒนาโปรแกรมในอนาคต เพราะ OOP มีคุณสมบัติพิเศษ [21] ที่ทำให้ OOP แตกต่างและได้เปรียบเมื่อเทียบกับวิธีเขียนโปรแกรมแบบอื่น เช่น สามารถควบคุมการเข้าถึงข้อมูล (Data encapsulation) สามารถสืบทอด (Inheritance) และสามารถมีหลายรูปแบบ (Polymorphism) เป็นต้น

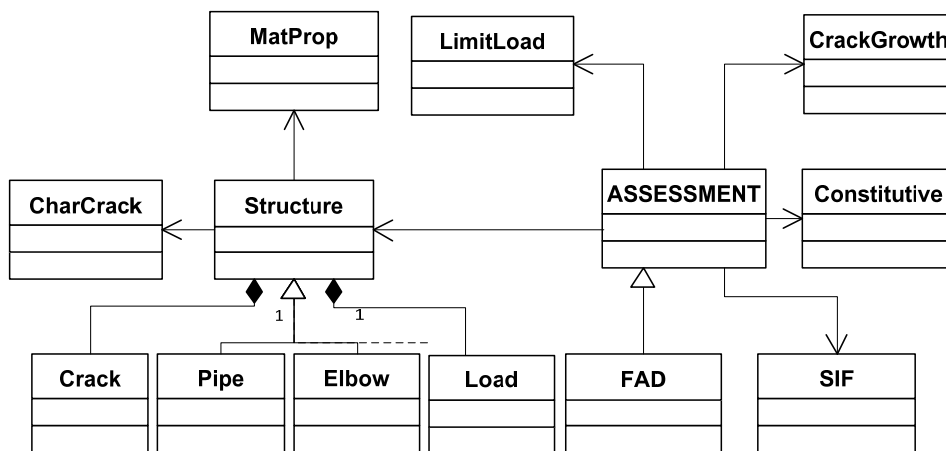
เนติพันธ์ [22] พัฒนาโปรแกรมสำหรับประเมินการคงสภาพของท่อ โดยใช้วิธีประเมินตามมาตรฐาน R6 โปรแกรมเขียนด้วยภาษา Delphi และงานวิจัยนี้ประยุกต์ OOP ในการออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม รูปที่ 1.2 แสดงแผนภาพการทำงานของโปรแกรม เรียกว่า คลาสไดอะแกรม (Class diagram) ซึ่งประกอบด้วยบล็อกสี่เหลี่ยมเชื่อมกัน บล็อกแต่ละบล็อกแทนคลาสหนึ่งคลาส การทำงานของโปรแกรมเกิดขึ้นเมื่อคลาส ASSESSMENT สร้างวัตถุจากคลาสต่างๆ และสั่งให้ทำงานตามขั้นตอนการประเมิน กล่าวคือ เรียกคลาส Structure เมื่อต้องการข้อมูลโครงสร้าง LimitLoad เมื่อต้องการภาระสูงสุด CrackGrowth เมื่อต้องการประเมินอายุใช้งานที่เหลือ Constitutive เมื่อต้องการข้อมูลความเครียดอ้างอิง FAD เมื่อต้องการชนิดของ FAD และ SIF เมื่อต้องการพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว วัตถุที่สร้างจากคลาสต่างๆ ข้างต้นจะคืนค่าให้กับคลาส ASSESSMENT เพื่อแสดงผลต่อไป

จุดเด่นของโปรแกรมนี้อีกหนึ่งคือ โปรแกรมมีมาตรฐานรองรับ อีกทั้งมีส่วนของโปรแกรมจัดการกับรอยร้าวกรณีที่มีรอยร้าวมากกว่า 1 รอย หรือรอยร้าววางตัวแนวเฉียง และโครงสร้างของโปรแกรมถูกออกแบบให้เพิ่มขีดความสามารถได้โดยง่ายในอนาคต เพราะประยุกต์ OOP ในการออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม เช่น รูปที่ 1.3 หากผู้ประเมินต้องการให้โปรแกรมประเมินข้องอ (Elbow) ที่มีรอยร้าว สามารถทำได้ง่ายโดยอาศัยความสามารถสืบทอดของ OOP คลาส Structure เพื่อสร้างคลาสใหม่คือ คลาส Elbow เป็นต้น แต่โปรแกรมหดงกล่าวมีข้อจำกัดคือ โครงสร้างของโปรแกรมไม่อิสระจากกัน เช่น คลาส SIF ซึ่งมีหน้าที่ในการคำนวณผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวซึ่งขึ้นกับโครงสร้าง และลักษณะรอยร้าว ดังนั้นเมื่อต้องการเพิ่ม

ความสามารถให้โปรแกรมประเมินโครงสร้างแบบอื่นๆ จำเป็นต้องแก้ไขโค้ดในคลาส SIF ทุกครั้ง เป็นต้น อีกทั้งโปรแกรมไม่รองรับการประเมินการร้าวก่อนการแตกหัก



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของโปรแกรมเชิงวัตถุสำหรับการประเมินการคงสภาพของท่อที่มีรอยร้าวด้วยระเบียบวิธี R6 [22]



รูปที่ 1.3 คลาสไดอะแกรมเมื่อเพิ่มคลาส Elbow [22]

จากการศึกษาข้างต้นจะเห็นว่าโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการของการประเมินโครงสร้างได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพัฒนาโปรแกรมประเมินการคงสภาพของท่อที่มีรอยร้าวโดยอ้างอิงขั้นตอนใน API RP 579 โปรแกรมสามารถประเมินการคงสภาพระดับ 1 ระดับ 2 และระดับ 3 (ทางเลือก B) ประเมินอายุใช้งานที่เหลือสำหรับรอยร้าวลำเนื่องจากภาวะล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่ ประเมินการร้าวก่อนการแตกหัก และระบุลักษณะรอยร้าวกรณีโครงสร้างมีรอยร้าวมากที่สุด 2 รอย หรือรอยร้าวเฉียง ลักษณะรอยร้าวที่สนใจคือ รอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีวางตัวตามแนวแกน การพัฒนาโปรแกรมจะนำแนวคิดเชิงวัตถุมาช่วยออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม เพื่อรองรับการปรับปรุงในอนาคต การพัฒนาโปรแกรมขึ้นเองนี้จะช่วย

ลดเวลาในการประเมิน ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อโปรแกรมสำเร็จรูป และทำให้สามารถเพิ่มเติมความสามารถ หรือผลเฉลยใหม่ๆ ได้เอง

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เขียนโปรแกรมประเมินการคงสภาพและอายุใช้งานที่เหลือของท่อมีรอยร้าว ด้วย API RP 579
- 2) ประยุกต์โปรแกรมกับปัญหาในทางปฏิบัติ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โปรแกรมมีความสามารถดังนี้

- 1) ใช้ได้กับโครงสร้างรูปทรงกระบอก เช่น ท่อ และภาชนะความดันทรงกระบอก เป็นต้น
- 2) ใช้ได้กับรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีวางตัวตามแนวแกนที่ผนังด้านใน และด้านนอกของโครงสร้าง
- 3) รองรับการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้ความเค้นปฐมภูมิเนื่องจากความดันภายใน หรือความเค้นปฐมภูมิในรูปฟังก์ชันการกระจายความเค้นตามแนวความหนา
- 4) รองรับการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้ความเค้นทุติยภูมิ คือความเค้นจากอุณหภูมิ และความเค้นตกค้าง โดยประมาณการกระจายความเค้นตกค้างตามแนวความหนาเป็นฟังก์ชันคงที่
- 5) ประเมินการคงสภาพตาม API RP 579 ระดับ 1 ระดับ 2 และระดับ 3 (ทางเลือก B)
- 6) ประเมินอายุใช้งานที่เหลือของโครงสร้างที่รับภาระล้าแอมพลิจูดคงที่
- 7) ประเมินการรื้อก่อนแตกหัก

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ลดความยุ่งยากและเวลาในการประเมิน
- 2) ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อโปรแกรมสำเร็จรูป
- 3) ได้โปรแกรมที่สามารถเพิ่มเติมความสามารถหรือผลเฉลยใหม่ๆ ได้เอง

## บทที่ 2

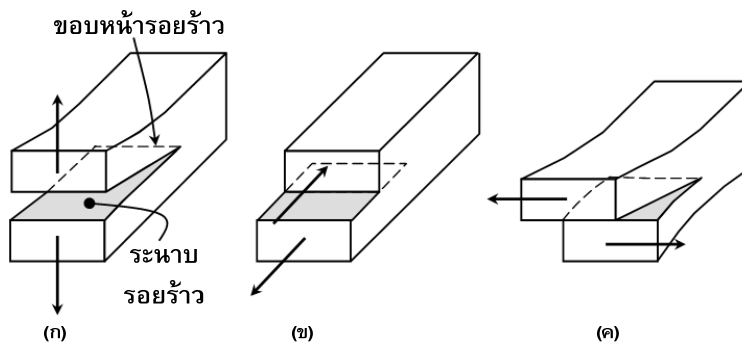
### กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น

กลศาสตร์การแตกหักศึกษาความเค้น (Stress) การเสียรูป (Deformation) และความเครียด (Strain) ของวัสดุที่ปลายรอยร้าว เพื่ออธิบายผลจากรอยร้าวต่อความแข็งแรงของวัสดุที่ปลายรอยร้าว กลศาสตร์การแตกหักแบ่งออกเป็น 3 สาขาตามพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุคือ กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanic, LEFM) สำหรับการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น กลศาสตร์การแตกหักอีลาสติก-พลาสติก (Elastic-Plastic Fracture Mechanic, EPFM) สำหรับการเสียรูปแบบอีลาสติก-พลาสติก และกลศาสตร์การแตกหักที่ขึ้นกับเวลา (Time-Dependent Fracture Mechanic, TDFM) สำหรับการเสียรูปที่ขึ้นกับเวลา ทั้งนี้กลศาสตร์การแตกหักทุกแขนงมีองค์ประกอบที่สำคัญเหมือนกันคือ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว ความต้านทานการแตกหัก และเกณฑ์การแตกหัก

บทนี้จะกล่าวถึงกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานที่ครอบคลุมขอบเขตงานวิจัย โดยหัวข้อที่จะศึกษาได้แก่ โหมดการเสียรูป พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว เกณฑ์ความเสียหายของชิ้นส่วนมีรอยร้าว และการเติบโตของรอยร้าวล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่

#### 2.1 โหมดการเสียรูป

หากพิจารณาทิศทางการเคลื่อนตัวของระนาบรอยร้าวเทียบกับขอบหน้ารอยร้าว หรือผิวหน้ารอยร้าว ชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวจะเกิดการแตกหักได้ 3 รูปแบบ คือ โหมดเปิด (Open mode) หรือโหมด 1 โหมดนี้ผิวหน้ารอยร้าวจะเคลื่อนตัวตั้งฉากกับระนาบรอยร้าว ดังรูปที่ 2.1(ก) โหมดเฉือนบนระนาบ (In-plane shear mode) หรือโหมดไถล (Sliding mode) หรือโหมด 2 โหมดนี้ผิวหน้ารอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมผัสกันในทิศทางตั้งฉากกับขอบหน้ารอยร้าว ดังรูปที่ 2.1(ข) และโหมดเฉือนนอกระนาบ (Out-of-plane shear mode) หรือโหมดฉีก (Tearing mode) หรือโหมด 3 โหมดนี้ผิวหน้ารอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมผัสกันในทิศทางขนานกับขอบหน้ารอยร้าว ดังรูปที่ 2.1(ค)



รูปที่ 2.1 โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว

## 2.2 พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว

องค์ประกอบความเค้น  $\sigma_{ij}$  บริเวณปลายรอยร้าวบนพิกัด  $(r, \theta)$  ในรูปที่ 2.2 เขียนได้ดังสมการ (2.1) [23]

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{k}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.1)$$

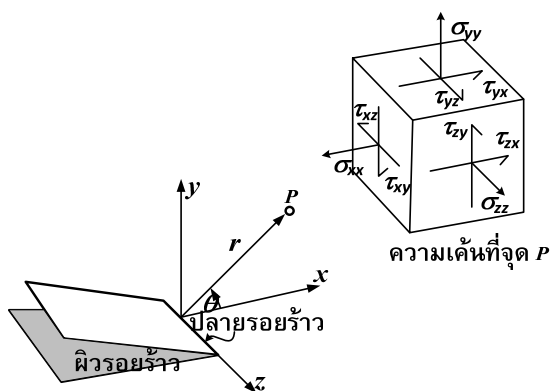
ซึ่งเป็นจุดเอกฐาน (Singularity point) ที่ตำแหน่งปลายรอยร้าว กล่าวคือ ชั้นส่วนที่มีรอยร้าวจะเกิดการแตกหักทันทีที่มีรอยร้าวเกิดขึ้น เนื่องจากที่ตำแหน่งปลายรอยร้าว ( $r$  เป็นศูนย์) ความเค้นมีค่าเป็นอนันต์ ซึ่งไม่ตรงกับความเป็นจริง เพราะชั้นส่วนที่มีรอยร้าวสามารถต้านทานการแตกหักได้ระดับหนึ่งก่อนแตกหัก ด้วยเหตุนี้ Irwin [23] จึงนิยามพารามิเตอร์ตัวใหม่เพื่ออธิบายความรุนแรงที่ปลายรอยร้าวคือ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว (Crack tip parameter) สมการ (2.2), (2.3) และ (2.4) แสดงพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวในโหมด 1 โหมด 2 และโหมด 3 ตามลำดับ โดยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวมีค่าเมื่อทราบการกระจายความเค้นบนผิวหน้ารอยร้าว นิยมใช้สัญลักษณ์  $K_I$ ,  $K_{II}$  และ  $K_{III}$  แทนพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวในโหมด 1 โหมด 2 และโหมด 3 ตามลำดับ สำหรับ LEFM นิยมเรียกพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวว่า ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (Stress Intensity Factor, SIF)

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, \theta)) \quad (2.2)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} (\sqrt{2\pi r} \tau_{xy}(r, \theta)) \quad (2.3)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} (\sqrt{2\pi r} \tau_{yz}(r, \theta)) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\sigma_{yy}$  คือความเค้นตั้งฉากตามแนวแกน  $y$  โดย  $\tau_{xy}$  และ  $\tau_{yz}$  คือความเค้นเฉือนตามแนวแกน  $x$  และ  $z$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบความเค้นที่ปลายรอยร้าว



### 2.3 ระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนัก

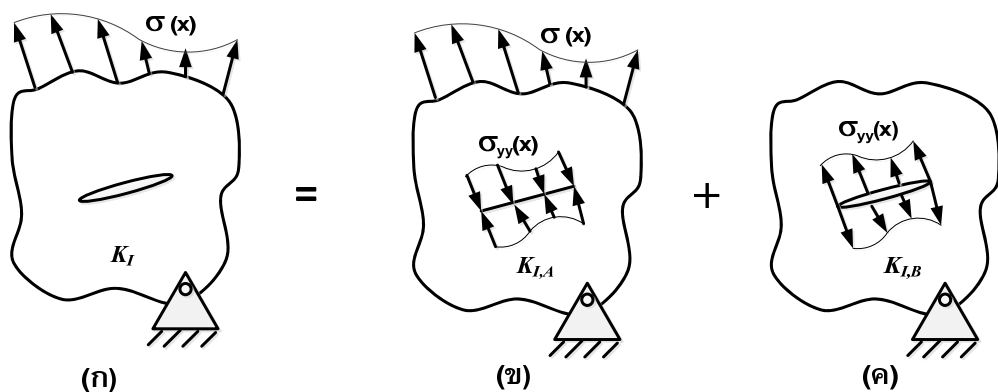
การหาผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวด้วยระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนักเป็นการประยุกต์หลักการซ้อนทับในการหาผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว รูปที่ 2.3 เป็นตัวอย่างการใช้หลักการซ้อนทับเพื่อหาผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของปัญหาชิ้นส่วนรับความเค้น  $\sigma(x)$  ผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวโหมด 1  $K_I$  จะสมมูลกับการซ้อนทับกันของปัญหาในรูปที่ 2.3(ข) ซึ่งแสดงชิ้นส่วนรับความเค้น  $\sigma(x)$  และรับความเค้นกด  $\sigma_{yy}(x)$  ที่ผิวหน้ารอยร้าวทำให้รอยร้าวปิดสนิทพอดีกับปัญหาในรูปที่ 2.3(ค) ซึ่งแสดงชิ้นส่วนรับความเค้นดึงที่ตรงข้ามกับปัญหาก่อนหน้า (รูปที่ 2.3(ข)) กระทำผิวหน้ารอยร้าว แต่ไม่มีความเค้นกระทำ  $\sigma(x)$  กับชิ้นส่วน เนื่องจากผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของปัญหาย่อยแรก (รูปที่ 2.3(ข))  $K_{I,A}$  มีเท่ากับศูนย์ ดังนั้น  $K_I$  ของปัญหาตั้งต้น (รูปที่ 2.3(ก)) จึงสมมูลกับผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของปัญหาย่อยกรณีมีความเค้นดึงกระทำผิวหน้ารอยร้าว  $K_{I,B}$  (รูปที่ 2.3(ค)) ดังนั้นหากทราบองค์ประกอบความเค้น  $\sigma_{yy}(x)$ ,  $\tau_{xy}(x)$ ,  $\tau_{yz}(x)$  จะหาผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวในแต่ละโหมดได้จากสมการ (2.5), (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ

$$K_I = \int_0^a \sigma_{yy}(x) m_I(x, a) dx \quad (2.5)$$

$$K_{II} = \int_0^a \tau_{xy}(x) m_{II}(x, a) dx \quad (2.6)$$

$$K_{III} = \int_0^a \tau_{yz}(x) m_{III}(x, a) dx \quad (2.7)$$

โดย  $m_I(x, a)$ ,  $m_{II}(x, a)$  และ  $m_{III}(x, a)$  คือ ฟังก์ชันน้ำหนักของรอยร้าวสำหรับโหมด 1 โหมด 2 และโหมด 3 ตามลำดับ ซึ่งหาได้จากสมการ (2.8), (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 การนำแนวคิดหลักการซ้อนทับประยุกต์ใช้กับการหาผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว

$$m_I(x, a) = \frac{E'_y}{2K_I} \frac{\partial v(x, a)}{\partial a} \quad (2.8)$$

$$m_{II}(x, a) = \frac{E'_y}{2K_{II}} \frac{\partial u(x, a)}{\partial a} \quad (2.9)$$

$$m_{III}(x, a) = \frac{E'_y}{2K_{III}} \frac{\partial w(x, a)}{\partial a} \quad (2.10)$$

โดยที่  $v(x, a)$ ,  $u(x, a)$  และ  $w(x, a)$  คือ ระยะเคลื่อนตัวของผิวรอยร้าวตามแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ  $E'_y$  เท่ากับ โมดูลัสยืดหยุ่น  $E_y$  กรณีความเค้นระนาบ และเท่ากับ  $E_y/(1-\nu^2)$  กรณีความเครียดระนาบ เมื่อ  $\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง

จุดเด่นของวิธีนี้ คือฟังก์ชันน้ำหนักของรอยร้าวจะขึ้นอยู่กับชนิดโครงสร้าง ชนิดรอยร้าว และโหมดการเสียรูป แต่ไม่ขึ้นกับการกระจายความเค้นบนผิวหน้ารอยร้าว ดังนั้นสำหรับโครงสร้างที่มีรอยร้าวชนิดหนึ่งหากทราบฟังก์ชันน้ำหนักของรอยร้าวจะสามารถหาผลเฉลยได้ทุกรูปแบบภาระที่กระทำบนผิวหน้ารอยร้าว

## 2.4 ความต้านทานการแตกหัก

ความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) เป็นสมบัติวัสดุที่บ่งบอกความสามารถในการต้านทานการกำเนิด และการเติบโตของรอยร้าวอย่างมีเสถียรภาพต่อจากรอยร้าวเดิม ซึ่งหาได้จากการทดลองเท่านั้น ความต้านทานการแตกหักขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดวัสดุ อัตราเร็วของภาระที่กระทำ โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว สถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าว สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ และกรรมวิธีแปรรูปทางกล เป็นต้น [23]

สำหรับสถานะความเค้น พบว่าสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวสัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานบางมีแนวโน้มทำให้เกิดสถานะความเค้นระนาบ (Plane stress) ชิ้นงานหนามีแนวโน้มทำให้เกิดสถานะความเครียดระนาบ (Plane strain) สำหรับวัสดุกลุ่มโลหะชิ้นงานที่ความเครียดระนาบเด่นมีค่าความต้านทานการแตกหักในโหมด 1  $K_{IC}$  น้อยกว่าความต้านทานการแตกหักในโหมด 1 กรณีชิ้นงานเกิดความเค้นระนาบ  $K_C$  ดังนั้นในการประเมินชิ้นงานที่มีรอยร้าวจึงนิยมใช้ความต้านทานการแตกหักที่ได้จากการทดลองชิ้นงานที่มีความเครียดระนาบเด่น เพราะให้ผลการประเมินด้านปลอดภัย

## 2.5 ความเสียหายของชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว

ชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวเกิดความเสียหายได้จาก 2 สาเหตุคือ ชิ้นส่วนเสียหายจากการแตกหัก และการครากทั้งหน้าตัด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.5.1 การแตกหัก

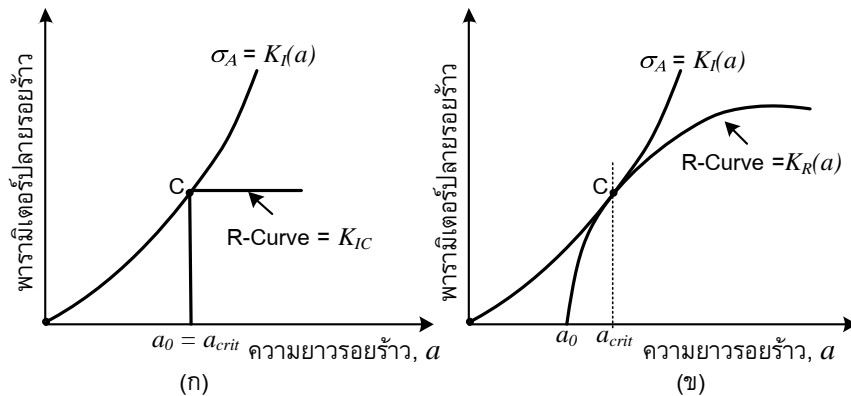
การแตกหักของชิ้นงานที่มีรอยร้าวหมายถึง การเติบโตของรอยร้าวอย่างรวดเร็ว หรือเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ (Unstable growth) พฤติกรรมการแตกหักแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ รอยร้าวเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพจากความยาวเดิมทันทีที่ชิ้นงานรับภาระเท่ากับภาระวิกฤติ และรอยร้าวเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ (Stable crack growth) ระยะหนึ่งก่อนจะเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ การแตกหักแบบแรกเรียกว่า การแตกหักเปราะ (Brittle fracture) และแบบหลังเรียกว่า การแตกหักเหนียว (Ductile fracture) ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์แม่นยำมากที่สุด ผู้วิเคราะห์ต้องเลือกเกณฑ์การแตกหักที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการแตกหัก ซึ่งแบ่งตามพฤติกรรมการแตกหักได้ 2 เกณฑ์ คือ เกณฑ์การกำเนิดรอยร้าว และเกณฑ์การเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพของรอยร้าว

เกณฑ์การกำเนิดรอยร้าวเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ทำจากวัสดุเปราะ หรือวัสดุเหนียวที่ถูกใช้งานที่อุณหภูมิต่างๆ เพราะชิ้นส่วนจะแตกหักเมื่อภาระถึงภาระวิกฤติ และรอยร้าวจะเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพในทันที เช่น รูปที่ 2.4(ก) แรงขับเคลื่อนที่ปลายรอยร้าว (Crack Driving Force, CDF) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว ซึ่งบอกความรุนแรงของรอยร้าว กับความยาวรอยร้าวที่ภาระ (หรือ ความเค้น) ที่สนใจ ชิ้นงานจะเสียหายจากการแตกหักภายใต้เกณฑ์การกำเนิดรอยร้าวเมื่อ CDF ของภาระที่สนใจมีขนาดมากกว่าขนาดของ CFD ที่อ่านได้จากเส้นโค้งความต้านทานการเติบโตของรอยร้าว, R-Curve เช่น ชิ้นงานมีรอยร้าวเริ่มต้น  $a_0$  รับความเค้น (วิกฤติ)  $\sigma_A$  มี CDF ดังรูปที่ 2.4(ก) รอยร้าวของชิ้นงานนี้จะเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพทันทีที่รอยร้าวโตขึ้นเพียงเล็กน้อย (เท่ากับขนาดรอยร้าววิกฤติ  $a_{crit}$ ) เป็นต้น ดังนั้นเกณฑ์การแตกหักจะอยู่ในรูปพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเท่ากับความต้านทานการแตกหัก ดังสมการ (2.11)

$$K_I(a) = K_{IC} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $K_I(a)$  คือ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวรอยร้าว  $a$   
 $K_{IC}$  คือ ความต้านทานการแตกหักโหมด 1 กรณีความเครียดระนาบ

เกณฑ์การเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพเหมาะสำหรับวิเคราะห์ชิ้นส่วนที่ทำจากวัสดุเหนียว เนื่องจากการเติบโตของรอยร้าวในกรณีนี้แบ่งเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกรอยร้าวจะเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ และช่วงที่สองรอยร้าวจะเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ เช่น รูปที่ 2.4(ข) ชิ้นงานมีรอยร้าวเริ่มต้น  $a_0$  รับความเค้น (วิกฤติ)  $\sigma_A$  มี CDF ดังรูปที่ 2.4(ข) รอยร้าวของชิ้นงานนี้จะเติบโตอย่างมีเสถียรภาพจนมีขนาดเท่ากับ  $a_{crit}$  ชิ้นงานจึงแตกหัก เป็นต้น ดังนั้นเกณฑ์การเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพของรอยร้าวจะอยู่ในรูปพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเท่ากับความต้านทานการ-



รูปที่ 2.4 แผนภาพแรงขับเคลื่อนที่ปลายรอยร้าว

แตกหัก และอัตราการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการแตกหักดังสมการ (2.12) และสมการ (2.13) ตามลำดับ

$$K_I(a) = K_R(a) \quad (2.12)$$

$$\frac{dK_I(a)}{da} = \frac{dK_R(a)}{da} \quad (2.13)$$

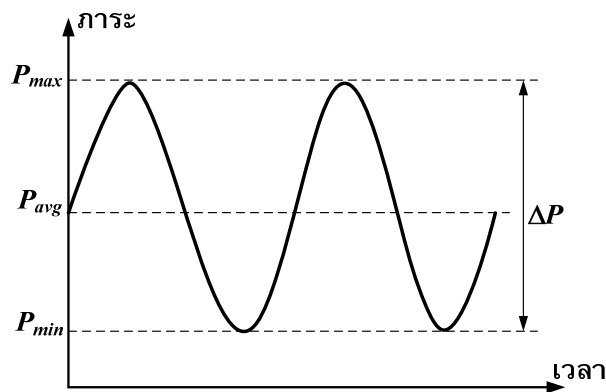
เมื่อ  $K_I(a)$  คือ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวรอยร้าว  $a$   
 $K_R(a)$  คือ เส้นโค้งความต้านทานการเติบโตของรอยร้าว

### 2.5.2 การครากทั้งหน้าตัด

ชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวมีโอกาสเสียหายจากการครากทั้งหน้าตัด (Plastic collapse) ก่อนที่รอยร้าวจะเริ่มเติบโตอย่างไรเสียก็ตาม การครากทั้งหน้าตัด หมายถึง การเสียรูปทั้งหน้าตัดของเนื้อวัสดุ เนื่องจากความเค้น (ภาระ) ทั้งหน้าตัดมากกว่าขนาดความเค้น (ภาระ) สูงสุดที่ชิ้นส่วนรับได้ ดังนั้นการวิเคราะห์การครากทั้งหน้าตัดคือ การเปรียบเทียบความเค้นทั้งหน้าตัดของชิ้นงานกับความเค้นมากที่สุดที่ชิ้นงานรับได้

### 2.6 การเติบโตของรอยร้าวล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่

การเติบโตของรอยร้าวอย่างมีเสถียรภาพกรณีหนึ่งที่น่าสนใจคือ ชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวที่รับภาระสถิติกระทำเป็นวัฏจักร (Cycle) หรือภาระล้า (Fatigue load) ซึ่งทำให้รอยร้าวเติบโตอย่างมีเสถียรภาพไประยะหนึ่งก่อนเติบโตอย่างไรเสียก็ตาม รูปที่ 2.5 แสดงภาระล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่ กล่าวคือ ภาระสูงสุด  $P_{max}$  และภาระต่ำสุด  $P_{min}$  มีขนาดคงที่ทุกวัฏจักร ภาระล้าดังกล่าวจะทำให้ชิ้นส่วนสะสมความเสียหายไปที่ละน้อยในแต่ละรอบภาระจนกระทั่งใช้งานไม่ได้ในที่สุด

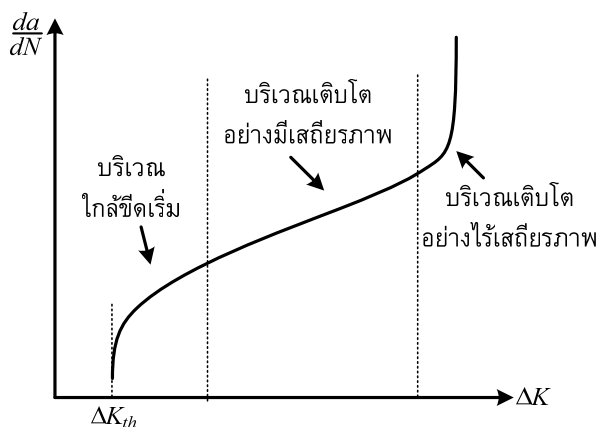


รูปที่ 2.5 ภาระล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่

กลศาสตร์การแตกหักมีบทบาทในการคำนวณหาอายุการเติบโตของรอยร้าวล้าจาก สหสัมพันธ์ของพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor range)  $\Delta K$  กับอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า (Fatigue crack growth rate)  $da/dN$  พฤติกรรม การเติบโตของรอยร้าวนิยมเขียนในรูปกราฟ ซึ่งพล็อต  $\Delta K$  เป็นแกนนอน และ  $da/dN$  เป็นแกน ตั้ง กราฟ  $da/dN - \Delta K$  โดยทั่วไปจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณที่ 1 เรียกว่า บริเวณใกล้ขีดเริ่ม (Near threshold regime) เป็นบริเวณที่  $da/dN$  น้อยกว่า  $10^{-6}$  มม./รอบ หรือ  $da/dN$  น้อยกว่าพิสัยตัวประกอบพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเริ่มต้น (Threshold stress intensity factor range)  $\Delta K_{th}$  บริเวณที่ 2 เรียกว่า บริเวณรอยร้าวเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ (Stable crack growth regime) บริเวณนี้กราฟ  $da/dN - \Delta K$  ส่วนใหญ่จะเป็นเส้นตรง (บนสเกลล็อก-ล็อก)  $da/dN$  อยู่ในช่วง  $10^{-6}$  ถึง  $10^{-3}$  มม./รอบ และบริเวณที่ 3 เรียกว่า บริเวณรอยร้าวเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ (Unstable crack growth regime) บริเวณนี้  $da/dN$  จะสูงมาก (มากกว่า  $10^{-3}$  มม./รอบ) จนกระทั่งชิ้นส่วนเกิดการแตกหัก สำหรับงานวิจัยนี้จะทำนายอายุรอยร้าวล้าบริเวณใกล้ขีดเริ่ม และบริเวณรอยร้าวเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ เพราะผลการประเมินที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการซ่อมบำรุงเพื่อหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุได้อย่างทันท่วงที

เพื่อให้การใช้งานสะดวกยิ่งขึ้น  $da/dN - \Delta K$  ในแต่ละช่วงที่สนใจจึงถูกเขียนให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีผู้เสนอแบบจำลองในรูปสมการต่างๆ มากมาย [14] เช่น Paris, Waller, Foreman, Trilinear and Bilinear และ NASGRO เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองของ Walker ซึ่งครอบคลุมขอบเขตงานวิจัย

แบบจำลองของ Walker สมการ (2.14) ปรับปรุงมาจากแบบจำลองของ Paris [14] แบบจำลองนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระ 2 ตัว คือ  $\Delta K$  และอัตราส่วนภาระ (Load ratio)  $R$  ซึ่งนิยามจากอัตราส่วนระหว่างภาระต่ำสุดต่อภาระสูงสุดและเนื่องจากภาระมีความสัมพันธ์เชิงเส้น



รูปที่ 2.6 ลักษณะของเส้นโค้ง  $da/dN - \Delta K$  ที่พบโดยทั่วไป (บนสเกลล็อก-ล็อก)

กับพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว  $R$  จึงเท่ากับอัตราส่วนพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวต่ำสุดต่อพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวสูงสุด ซึ่งทำให้แทนผลการทดลองได้ดียิ่งขึ้น

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{\Delta K}{(1-R)^m} \right)^n \quad \text{for } \Delta K > \Delta K_{th} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\Delta K$  คือ พิสัยตัวประกอบพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว  $C$ ,  $m$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ซึ่งได้จากการทดลอง  $R$  คือ อัตราส่วนภาระ

### บทที่ 3

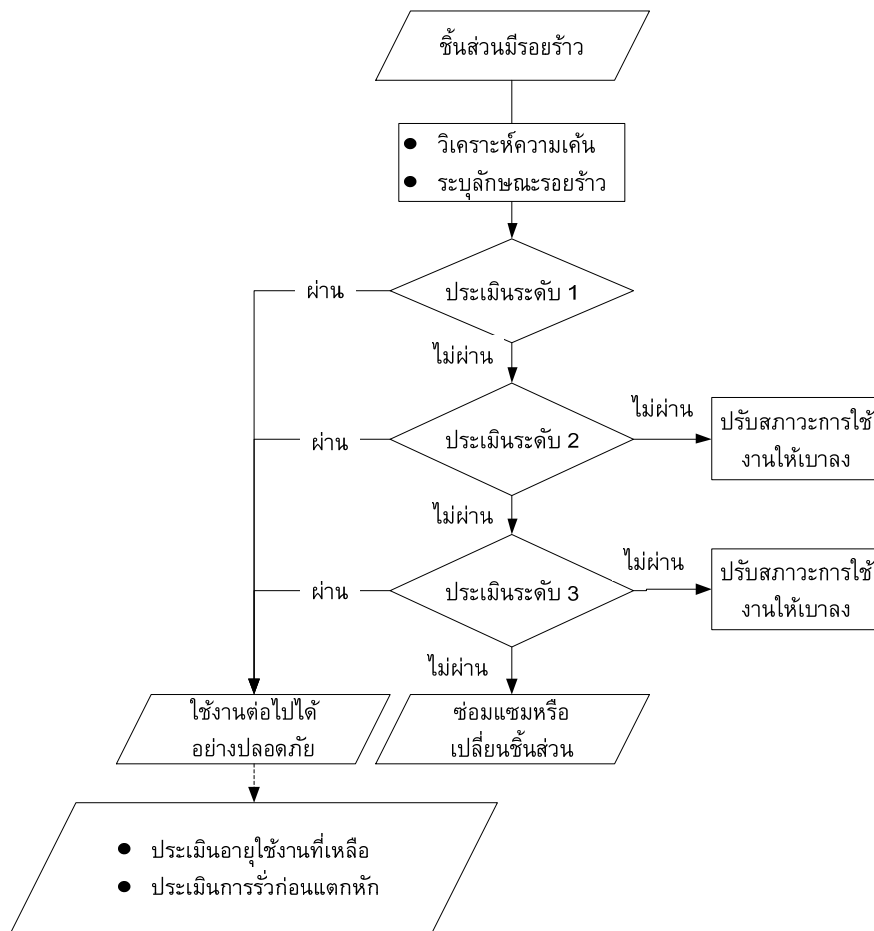
## API RP 579 กับการประเมินชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว

API RP 579 (American Petroleum Institute's Recommended Practice 579, Fitness-For-Service) [14] เป็นมาตรฐานที่รวบรวมคำแนะนำในการประเมินชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่รับความดันภายในโรงกลั่น โรงงานไฟฟ้า และโรงงานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น ถัง (Tank) ระบบท่อ (Pipe line) และภาชนะรับความดัน (Pressure vessel) เป็นต้น ทั้งนี้ ชิ้นส่วนดังกล่าวต้องออกแบบและสร้างตามมาตรฐาน ดังนี้ ASME B&PV Code Section VIII Div.1, ASME B&PV Code Section VIII Div.2, ASME B31.3 Piping codes, ASME B&PV Code Section I, API 620 และ API 650 สำหรับชิ้นส่วนที่ออกแบบและสร้างจากมาตรฐานอื่น ต้องปรับแก้ตามคำแนะนำของมาตรฐานก่อน

บทนี้จะกล่าวถึง API RP 579 เฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับการประเมินชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว ได้แก่ ภาพรวมการประเมิน การประเมินการคงสภาพ การประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ และการประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก ตามลำดับ

### 3.1 ภาพรวมการประเมิน

รูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมการจัดการกับชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว ขั้นตอนแรก คือการวิเคราะห์ความเค้น (Stress analysis) และการระบุลักษณะรอยร้าว (Crack characterization) ตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ จากนั้นจึงประเมินการคงสภาพระดับที่ 1 หากผลการประเมินคือ ผ่าน ชิ้นส่วนดังกล่าวจะสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย แต่ถ้าประเมินแล้วไม่ผ่าน ผู้ประเมินควรซ่อมบำรุง หรือเปลี่ยนชิ้นส่วนดังกล่าว หรือประเมินในระดับที่สูงขึ้นคือ ระดับ 2 ต่อไป หากผลการประเมินระดับ 2 คือ ไม่ผ่าน ผู้ประเมินควรซ่อมบำรุง หรือเปลี่ยนชิ้นส่วนดังกล่าว หรือลดภาระการใช้งานลง หรือประเมินในระดับที่สูงขึ้นคือ ระดับ 3 ต่อไป ถ้าประเมินระดับ 3 แล้วไม่ผ่าน แสดงว่าชิ้นส่วนดังกล่าวไม่สามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย ผู้ประเมินควรซ่อมบำรุง หรือเปลี่ยนชิ้นส่วนดังกล่าว แต่ถ้าประเมินแล้วผ่าน ควรประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ และประเมินการรื้อก่อนการแตกหักต่อไป ทั้งนี้การประเมินในระดับที่สูงขึ้นข้อมูลที่ใช้ควรตรงกับความเป็นจริงมากขึ้น เพื่อให้ผลการประเมินที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด



รูปที่ 3.1 ภาพรวมการจัดการกับชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว

### 3.2 การวิเคราะห์ความเค้น

เนื่องจากความเค้นจากภาระที่ต่างกันนำไปสู่ความเสียหายของชิ้นส่วนได้ต่างกัน มาตรฐานจึงแนะนำให้แบ่งความเค้นออกเป็น 2 ชนิด คือ ความเค้นปฐมภูมิ (Primary stress) และความเค้นทุติยภูมิ (Secondary stress)

ความเค้นปฐมภูมิ คือความเค้นที่เกิดจากภาระภายนอกที่มากระทำกับชิ้นส่วน แรงลัพท์และโมเมนต์ลัพท์บนหน้าตัดใดๆ จะสมดุลกับภาระภายนอกชิ้นส่วน โดยความเค้นปฐมภูมิ จะเพิ่มขึ้นเมื่อภาระภายนอกเพิ่มขึ้น ตัวอย่างความเค้นปฐมภูมิ เช่น ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงของชิ้นส่วนรับแรงดันภายใน (Internal pressure) และความเค้นตรงเนื่องจากการถ่วงน้ำหนัก เป็นต้น หากขนาดความเค้นปฐมภูมิมากกว่าความเค้นวิกฤติชิ้นส่วนจะเสียหายจากการคราก และกรณีที่ชิ้นส่วนมีรอยร้าวความเค้นปฐมภูมิมากพอจะทำให้รอยร้าวเติบโตอย่างไร เสถียรภาพชิ้นส่วนจะเสียหายจากการแตกหัก

ความเค้นทุติยภูมิ คือความเค้นที่สมดุลในตัวเอง (Self-equilibrium) แรงลัพท์และโมเมนต์ลัพท์บนหน้าตัดใดๆ จะเท่ากับศูนย์ ตัวอย่างความเค้นทุติยภูมิ เช่น ความเค้นตกค้าง



บริเวณรอยเชื่อม (Residual stress) และความเค้นเนื่องจากภาวะเชิงความร้อน (Thermal stress) เป็นต้น ความเค้นทุติยภูมิที่มากพอจะสามารถทำให้รอยร้าวเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ และเสียหายจากการแตกหักได้ แต่เนื่องจากความเค้นทุติยภูมิมีความสมดุลในตัวเองจึงไม่สามารถทำให้ชิ้นส่วนเสียหายจากการครากทั้งหน้าตัดได้

### 3.3 การระบุลักษณะรอยร้าว

การระบุลักษณะรอยร้าว (Crack characterization) คือ การเปลี่ยนรูปร่างหรือชนิดรอยร้าวที่เกิดขึ้นจริงบนชิ้นส่วนเป็นรอยร้าวใหม่ที่สามารถระบุขนาดได้ง่ายขึ้น และมีผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวรองรับ ซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยากในการประเมิน และทำให้การประเมินดำเนินต่อไปได้อย่างน่าเชื่อถือ คำแนะนำในการระบุรอยร้าวใหม่จากรอยร้าวจริงเรียกว่า การระบุลักษณะรอยร้าวซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้ [24]

1) ระบุรอยร้าวอุดมคติ (Flaw idealization) คือ การเปลี่ยนรูปร่างของรอยร้าวที่พบให้เป็นรูปเรขาคณิตอย่างง่าย โดยรอยร้าวใหม่ที่ได้ต้องคงเค้าโครงของรอยร้าวเดิมไว้ดังคำแนะนำในตารางที่ ข.1 ขั้นตอนนี้ทำให้สามารถระบุชนิด และขนาดรอยร้าวได้ง่ายขึ้น โดยที่รอยร้าวใหม่ที่ได้จะนำไปสู่ผลการประเมินที่ปลอดภัยขึ้น

2) เปลี่ยนแนววางตัวของรอยร้าวให้มาอยู่ในแนวที่การเสีรูปร่างปลายรอยร้าวอยู่ในโหมดที่ 1 (โหมดเปิด) กรณีรอยร้าววางตัวเฉียงการเสีรูปร่างปลายรอยร้าวจะอยู่ในโหมดผสม เนื่องจากผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวในโหมดผสมมีอยู่จำกัด มาตรฐานจึงมีคำแนะนำในการเปลี่ยนแนววางตัวของรอยร้าวให้มาอยู่ในแนวที่การเสีรูปร่างปลายรอยร้าวอยู่ในโหมดที่ 1 ตามขั้นตอนในภาคผนวก ข ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้คือ ขนาดรอยร้าวสมมูล

3) พิจารณาปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าว (Crack interaction) กรณีที่มีรอยร้าว 2 รอย สนามความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวที่พิจารณาจะถูกรบกวนจากรอยร้าวอื่น เมื่อสนามความเค้นเปลี่ยนแปลงไปค่าพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวจึงมีขนาดเปลี่ยนไปด้วย เนื่องจากผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวกรณีดังกล่าวมีอยู่จำกัด มาตรฐานจึงมีเกณฑ์สำหรับตัดสินใจว่าควรแยกพิจารณาแต่ละรอยร้าว หรือรวมรอยร้าวเป็นรอยร้าวเดี่ยวดังตาราง ข.2 และข.3

4) เปลี่ยนชนิดรอยร้าว (Crack recategorization) กรณีที่ขอบหน้ารอยร้าวอยู่ใกล้กับผิวชิ้นส่วนมากเกินไป ภาวะขีดจำกัดที่ทำให้เนื้อวัสดุที่เหลืออยู่ครากจะต่ำกว่าภาวะที่โครงสร้างสามารถรับได้จริงทำให้ผลการประเมินปลอดภัยมากเกินไป นอกจากนั้นผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว สำหรับรอยร้าวที่มีเนื้อวัสดุเหลือน้อย (รอยร้าวลึก) จะไม่แม่นยำ มาตรฐานจึงมีเกณฑ์สำหรับเปลี่ยนชนิดรอยร้าวดังตาราง ข.4

### 3.4 การประเมินการคงสภาพ

การประเมินการคงสภาพ หมายถึง การวิเคราะห์ชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายที่สามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ เพื่อใช้ผลจากการวิเคราะห์ประกอบการตัดสินใจสำหรับวางแผนการซ่อมบำรุงได้อย่างเหมาะสม สำหรับชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวการประเมินการคงสภาพ คือการวิเคราะห์ว่าขนาดรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนมีขนาดมากกว่าขนาดรอยร้าววิกฤติหรือไม่ หากมากกว่าแสดงว่าชิ้นส่วนดังกล่าวไม่สามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัยควรซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนดังกล่าว

API RP 579 แบ่งการประเมินการคงสภาพออกเป็น 3 ระดับ [14] คือ ระดับ 1 Screening Curve ระดับ 2 General Curve และระดับ 3 Specific Curve ซึ่งการประเมินในระดับสูงขึ้นจะให้ผลการประเมินที่มีความปลอดภัยน้อยลง และมีความซับซ้อนในการประเมินมากขึ้น ตามลำดับ

#### 3.4.1 การประเมินระดับ 1

การประเมินระดับ 1 ใช้หลักการเปรียบเทียบขนาดความยาวรอยร้าวที่ระบุลักษณะรอยร้าวแล้วกับความยาวรอยร้าวที่ยอมให้มีได้ในชิ้นส่วน ซึ่งมาตรฐานเตรียมไว้สำหรับชนิดชิ้นส่วนและรอยร้าวแบบต่างๆ หากความยาวรอยร้าวที่ระบุลักษณะรอยร้าวแล้วน้อยกว่าจะถือว่าชิ้นส่วนสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย แต่ถ้ามากกว่าจะถือว่าชิ้นส่วนเสียหายผู้รับผิดชอบต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนหรือปรับลดภาระใช้งาน อย่างไรก็ตามถ้าเป็นไปได้ควรประเมินซ้ำด้วยระดับการประเมินที่สูงขึ้น ทั้งนี้การประเมินระดับ 1 ใช้ได้กับชิ้นส่วนที่มีขนาดรัศมีภายในใหญ่กว่าความหนาอย่างน้อย 5 เท่า และความยาวรอยร้าวสูงสุดที่วิเคราะห์ได้ คือ 200 mm ขึ้นตอนการประเมินระดับ 1 สรุปได้ดังนี้

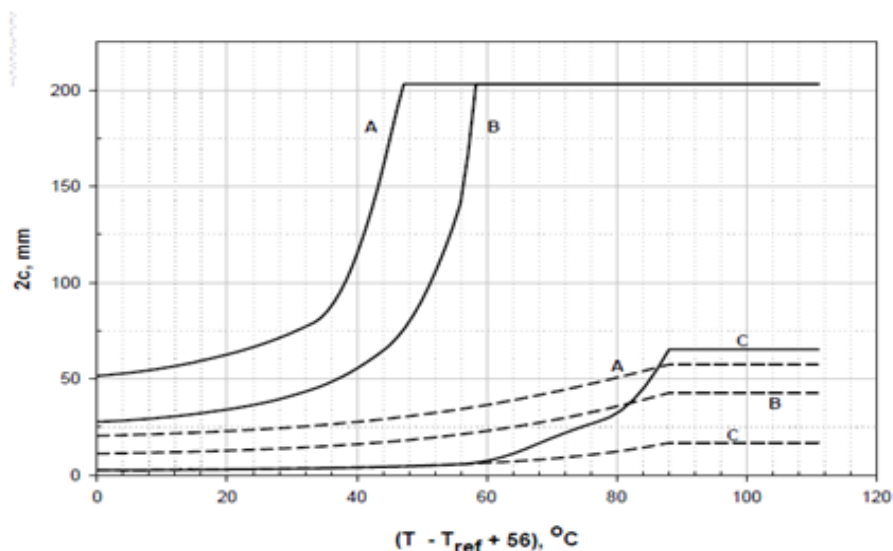
ขั้นตอนที่ 1 ระบุสภาวะใช้งานของชิ้นส่วน ได้แก่ ภาระ ขนาดรอยร้าว การวางตัวของรอยเชื่อม และการวางตัวของรอยร้าวสัมพันธ์กับรอยเชื่อม เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 เลือกแผนภาพประเมิน โดยพิจารณาจากข้อมูลต่อไปนี้ รูปร่างชิ้นส่วน การวางตัวของรอยเชื่อมและการวางตัวของรอยร้าวสัมพันธ์กับรอยเชื่อม ทั้งนี้การประเมินระดับ 1 ครอบคลุมเฉพาะเงื่อนไขที่สรุปในตารางที่ 3.1 เช่น ชิ้นส่วนรูปทรงกระบอกมีรอยร้าวขนาน ชิ้นส่วนและรอยเชื่อมจะมีแผนภาพประเมิน ดังรูปที่ 3.2 จากรูปแกนนอนคืออุณหภูมิประเมิน  $(T - T_{ref} - 56) ^\circ C$  แกนตั้งคือ ความยาวรอยร้าวสูงสุดที่ยอมรับได้  $2c$  การหาค่า  $2c$  จะต้องระบุที่ใช้เส้นโค้ง A หรือ B หรือ C และใช้ลักษณะของเส้นเป็นเส้นเต็มหรือเส้นประ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในขั้นตอนที่ 3

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการเลือกแผนภาพประเมินสำหรับการประเมินระดับ 1

| ชิ้นส่วน  | แนวรอยเชื่อม | แนวรอยร้าวสัมพันธ์กับแนวรอยเชื่อม |
|-----------|--------------|-----------------------------------|
| แผ่นแบน   | -            | ขนาน                              |
| ทรงกระบอก | ตามยาว       | ขนาน                              |
|           |              | ตั้งฉาก                           |
|           | ตามเส้นรอบวง | ขนาน                              |
|           |              | ตั้งฉาก                           |
| ทรงกลม    | ตามเส้นรอบวง | ขนาน                              |

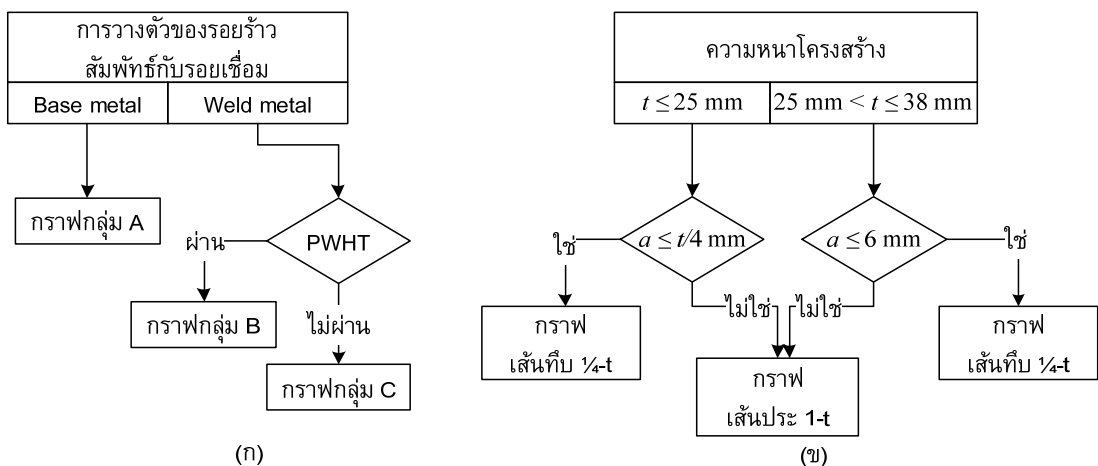
ขั้นตอนที่ 3 เลือกกราฟในแผนภาพประเมินที่ระบุในขั้นตอนที่ 2 ดังนี้ พิจารณาจากการวางตัวของรอยร้าวสัมพันธ์กับรอยเชื่อม สภาพวัสดุและความหนาชิ้นส่วน เส้นกราฟที่ปรากฏในแผนภาพประเมินแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม A, B และ C ซึ่งแต่ละกลุ่มมีกราฟที่เป็นเส้นทึบ (Solid line 1/4-t flaw) และกราฟที่เป็นเส้นประ (Dashed line 1-t flaw) จากรูปที่ 3.3(ก) การพิจารณาว่ากราฟประเมินที่จะใช้อยู่ในกลุ่มใด พิจารณาจากทิศทางการวางตัวของรอยร้าวสัมพันธ์กับรอยเชื่อมและสภาพของวัสดุ กล่าวคือ ถ้ารอยร้าวอยู่บนกรวยเชื่อม (Base metal) เลือกใช้กราฟกลุ่ม A ถ้ารอยร้าววางตัวอยู่บนรอยเชื่อม (Weld metal) หรือระยะจากรอยร้าวถึงกึ่งกลางแนวรอยเชื่อมน้อยกว่าสองเท่าของความหนาชิ้นส่วนให้ใช้กราฟกลุ่ม B หรือกลุ่ม C โดยวัสดุที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน (Post Weld Heat Treatment, PWHT)



รูปที่ 3.2 แผนภาพประเมินกรณีชิ้นส่วนเป็นทรงกระบอกมีรอยร้าว และรอยเชื่อมขนานชิ้นส่วน [14]

มาแล้วให้ใช้กราฟกลุ่ม B และวัสดุที่ไม่ผ่าน PWHT ให้ใช้กราฟกลุ่ม C จากนั้นจึงพิจารณาความหนาของชิ้นส่วน (จากรูปที่ 3.3(ข)) เทียบกับความลึกของรอยร้าวเพื่อเลือกลักษณะกราฟที่จะใช้ในการประเมินต่อไป เช่น ถ้าความหนาของชิ้นส่วนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 28 mm และความลึกของรอยร้าวน้อยกว่าหนึ่งในสี่ของความหนาระบุของชิ้นส่วนให้ใช้กราฟที่เป็นเส้นทึบเป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 ระบุอุณหภูมิอ้างอิง  $T_{ref}$  หรืออุณหภูมิ  $RT_{NDT}$  [25] เพื่อใช้หาขนาดรอยร้าวที่ยอมรับได้จากกราฟประเมินที่เลือกไว้ในขั้นตอนก่อนหน้า ขั้นตอนการระบุ  $T_{ref}$  เริ่มจากการระบุกลุ่มชนิดวัสดุด้วยการเลือกชนิดเส้นโค้งอุณหภูมิวัสดุ (Material temperature exemption curve) ซึ่งมี 4 กลุ่มคือ A, B, C และ D จากตาราง 3.2 ของมาตรฐาน จากนั้นระบุความแข็งแรงครากต่ำสุด (Minimum Yield Strength, MYS) แล้วนำค่าทั้งสองไประบุ  $T_{ref}$  จากตารางที่ 9.2 ของมาตรฐาน



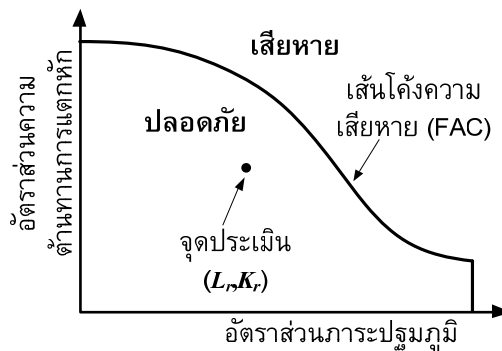
รูปที่ 3.3 การเลือกกราฟประเมิน

ขั้นตอนที่ 5 หาความยาวรอยร้าวที่ยอมรับ โดยนำอุณหภูมิอ้างอิง  $T_{ref}$  กับอุณหภูมิใช้งาน  $T$  มาคำนวณค่า  $(T - T_{ref} - 56) ^\circ C$  แล้วอ่านค่าความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้จากกราฟประเมินที่เลือกไว้

ขั้นตอนที่ 6 ประเมินการคงสภาพด้วยการเปรียบเทียบขนาดความยาวรอยร้าวที่พบกับความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้ถ้าความยาวรอยร้าวที่พบน้อยกว่าความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้แสดงว่าชิ้นส่วนปลอดภัย ถ้าความยาวรอยร้าวที่พบมากกว่าความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้แสดงว่าชิ้นส่วนดังกล่าวไม่ปลอดภัย (ไม่ควรใช้งานชิ้นส่วนต่อไป) ควรเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ หรือเลือกประเมินในระดับที่สูงขึ้นไป หรือลดภาระการใช้งานลง

### 3.4.2 การประเมินระดับ 2

การประเมินระดับที่ 2 จะใช้แผนภาพความเสียหาย (Failure Assessment Diagram, FAD) ซึ่งแสดงสถานะการใช้งานของชิ้นส่วน จากรูปที่ 3.4 เส้นโค้งความเสียหาย (Failure Assessment Curve, FAC) จะแบ่งพื้นที่ของ FAD ออกเป็น 2 ส่วน คือ บริเวณปลอดภัยและบริเวณเสียหาย หากจุดประเมินอยู่ที่ FAC จะถือว่าชิ้นส่วนปลอดภัยจากการแตกหัก (ภายใต้เกณฑ์การกำหนดรอยร้าว) และการคราก แต่ถ้าจุดประเมินอยู่เหนือ FAC จะถือว่าชิ้นส่วนเสียหาย



รูปที่ 3.4 แผนภาพความเสียหาย

การประเมินจะมุ่งไปสู่การหาอัตราส่วนระหว่างภาระกับภาระขีดจำกัด  $L_r$  และอัตราส่วนระหว่างพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวกับความต้านทานการแตกหัก  $K_r$  จากนั้นพล็อตจุดประเมิน  $(L_r, K_r)$  บน FAD หากจุดประเมินอยู่ใต้หรืออยู่บนเส้นโค้งความเสียหาย จะถือว่าชิ้นส่วนปลอดภัย แต่ถ้าจุดประเมินอยู่เหนือเส้นโค้งความเสียหายจะถือว่าชิ้นส่วนไม่ปลอดภัย ผู้ประเมินควรปฏิบัติตามคำแนะนำที่มาตรฐานให้ไว้ ขั้นตอนการประเมินระดับ 2 สรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์สภาวะใช้งาน ได้แก่ ความดัน และอุณหภูมิ ฯลฯ

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์ความเค้น มาตรฐานจำแนกความเค้นออกเป็นความเค้นปฐมภูมิและความเค้นทุติยภูมิ (หัวข้อ 3.2) โดยทั่วไปฟังก์ชันการกระจายของความเค้นปฐมภูมิและความเค้นทุติยภูมิบนผิวหน้ารอยร้าวจะมีรูปฟังก์ชันของความเค้นที่ซับซ้อน (เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น) มาตรฐานจึงแนะนำให้ประมาณค่าฟังก์ชันความเค้นดังกล่าวให้อยู่ในรูปผลบวกขององค์ประกอบคือ ความเค้นเมมเบรน (Membrane stress) และความเค้นดัด (Bending stress) (รายละเอียดดังภาคผนวก ก)

ขั้นตอนที่ 3 ระบुकุณสมบัติวัสดุ ได้แก่

- อัตราส่วนของปีวียง มอดูลัสยืดหยุ่น ฯลฯ
- ความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness,  $K_{mat}$ ) ซึ่งมาตรฐานแนะนำให้หลายวิธี (ภาคผนวก ข) กรณีที่ผู้ประเมินใช้ความต้านทานการแตกหักของ

ล่าง  $K_{IC}$  จะต้องปรับแก้เป็นความต้านทานการแตกหักค่ากลาง  $K_{mat}^{mean}$  ด้วยสมการ (ข.7)

ขั้นตอนที่ 4 ระบุลักษณะรอยร้าว ได้แก่ ชนิดรอยร้าว ความยาวรอยร้าว ความลึกรอยร้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าว (ภาคผนวก ข)

ขั้นตอนที่ 5 ปรับแก้ตัวแปรป้อนเข้าด้วยตัวประกอบความปลอดภัยย่อย (Partial Safety Factor,  $PSF$ ) ซึ่งหาได้จากตารางที่ 9.3 ของมาตรฐาน ดังนี้

- ปรับแก้ความเค้นปฐมภูมิด้วยตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับปรับแก้ความเค้น,  $PSF_s$

$$P_b = PSF_s \cdot P_b \quad (3.1)$$

$$P_m = PSF_s \cdot P_m \quad (3.2)$$

เมื่อ  $P_b$  และ  $P_m$  คือ ความเค้นดัดปฐมภูมิ และความเค้นเมมเบรนปฐมภูมิ ตามลำดับ

- ปรับแก้ความต้านทานการแตกหักตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับปรับแก้ความต้านทานการแตกหัก,  $PSF_k$

$$K_{mat} = \frac{K_{mat}}{PSF_k} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $K_{mat}$  คือ ความต้านทานการแตกหักหลังจากปรับถูกแก้แล้ว

- ปรับแก้ขนาดรอยร้าวตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับปรับแก้ขนาดรอยร้าว,  $PSF_a$

$$a = PSF_a \cdot a \text{ และ } 2c = PSF_a \cdot 2c \quad (3.4)$$

เมื่อ  $a$  และ  $c$  คือ ความลึกและครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าวหลังจากปรับถูกแก้แล้วตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาความเค้นอ้างอิงปฐมภูมิ (Primary reference stress,  $\sigma_{ref}^P$ ) ตามขั้นตอนในภาคผนวก จ

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวปฐมภูมิ  $K_I^P$  ซึ่งมาตรฐานแนะนำไว้หลายวิธี (ภาคผนวก ค) ถ้า  $K_I^P < 0$  จะกำหนด  $K_I^P = 0$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาอัตราส่วนภาระปฐมภูมิ (Load ratio,  $L_r^P$ )

$$L_r^P = \frac{\sigma_{ref}^P}{\sigma_{ys}} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $\sigma_{ref}^P$  และ  $\sigma_{ys}$  คือ ความเค้นอ้างอิงปฐมภูมิ และความเค้นคราก ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณหาความเค้นอ้างอิงทุติยภูมิ (Secondary reference stress,  $\sigma_{ref}^{SR}$ )  
 $\sigma_{ref}^{SR}$  ตามขั้นตอนที่ 6 โดยปรับแก้พารามิเตอร์ป้อนเข้าตามขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 10 คำนวณหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวทุติยภูมิ  $K_I^{SR}$  ตามขั้นตอนที่ 7 โดย  
 ปรับแก้พารามิเตอร์ป้อนเข้าตามขั้นตอนที่ 5 (ถ้า  $K_I^{SR} < 0$  จะกำหนด  $K_I^{SR} = 0$ )

ขั้นตอนที่ 11 คำนวณ Plasticity interaction factor  $\Phi$  (ถ้า  $K_I^{SR} = 0$  จะกำหนด  
 $\Phi = 1$ ) กรณี  $K_I^{SR} > 0$  หา  $\Phi$  ได้ดังนี้

1) หาอัตราส่วนภาระทุติยภูมิ  $L_r^{SR}$

$$L_r^{SR} = \frac{\sigma_{ref}^{SR}}{\sigma_{ys}} \quad (3.6)$$

2) หา  $\Phi_0$

$$\Phi_0 = \frac{K_{Ip}^{SR}}{K_I^{SR}} \quad (3.7)$$

$$K_{Ip}^{SR} = \sqrt{\frac{J^{SR} E_y}{1 - \nu^2}} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $K_I^{SR}$  คือ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวทุติยภูมิ (ขั้นตอนที่ 10)  $J^{SR}$  คือ พารามิเตอร์  $J$   
 ทุติยภูมิ  $E_y$  คือ มอดูลัสความยืดหยุ่น  $\nu$  คือ อัตราส่วนของปัวซอง

หรือ 
$$\Phi_0 = \left( \frac{a_{eff}}{a} \right)^{0.5} \quad (3.9)$$

$$a_{eff} = a + \left( \frac{1}{2\pi\tau} \right) \left( \frac{K_I^{SR}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3.10)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ ค่าคงตัวมีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับความเค้นระนาบ และเท่ากับ 3.0 สำหรับปัญหา  
 ความเครียดระนาบ  $K_I^{SR}$  คือ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวทุติยภูมิ  $\sigma_{ys}$  คือ ความแข็งแรงคราก  
 $a$  คือ ความยาวรอยร้าว

3) หา  $\Phi$

$$\Phi = \Phi_0 \left( 1 + \frac{\psi}{\phi} \right) \quad (3.11)$$

เมื่อ  $\psi$  และ  $\phi$  คือสัมประสิทธิ์ซึ่งหาได้จากตารางที่ 9.4 - 9.7 ในมาตรฐาน

ขั้นตอนที่ 12 คำนวณหาอัตราส่วนความต้านทานการแตกหัก  $K_r$

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{mat}} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $K_I^P$  คือ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวปฐมภูมิ (ขั้นตอนที่ 7)  $K_I^{SR}$  คือ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวทุติยภูมิ (ขั้นตอนที่ 10)  $K_{mat}$  คือ ความต้านทานการแตกหัก (ขั้นตอนที่ 5)

ขั้นตอนที่ 13 ประเมินการคงสภาพพลีตจุด ( $K_r, L_r^P$ ) บน FAD สำหรับการประเมินระดับ 2 ใช้ เส้นโค้งความเสียหาย จากสมการ (3.13) ถ้าจุดที่ได้อยู่บนหรืออยู่ใต้เส้นโค้งความเสียหาย แสดงว่าชิ้นส่วนปลอดภัย แต่ถ้าอยู่นอกเส้นโค้งความเสียหาย แสดงว่าชิ้นส่วนไม่ปลอดภัย

$$K_r = \left( 1 - 0.14(L_r^P)^2 \right) \left\{ 0.3 + 0.7 \exp \left[ -0.65(L_r^P)^6 \right] \right\} \quad \text{for } L_r^P \leq L_{r(\max)}^P \quad (3.13)$$

เมื่อ  $L_{r(\max)}^P$  คือ อัตราส่วนภาระสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้โดยไม่เกิดการคราก ซึ่งมีค่าแตกต่างกันสำหรับวัสดุแต่ละชนิดดังนี้

- $L_{r(\max)}^P$  มีค่าเท่ากับ 1.00 สำหรับวัสดุที่ไม่ทราบค่า Strain hardening exponent หรือค่า Strain hardening exponent มากกว่า 15
- $L_{r(\max)}^P$  มีค่าเท่ากับ 1.25 สำหรับเหล็กเบอร์ ASTM A508 และ C-Mn steels
- $L_{r(\max)}^P$  มีค่าเท่ากับ 1.80 สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)
- $L_{r(\max)}^P$  มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่าง Flow stress  $\sigma_f$  และความแข็งแรงคราก  $\sigma_{ys}$  สำหรับวัสดุที่ทราบสมบัติวัสดุทั้ง 2 อย่างข้างต้น (ที่อุณหภูมิห้อง) โดย Flow stress คือ ค่าเฉลี่ยระหว่างความแข็งแรงครากกับความแข็งแรงสูงสุด



### 3.4.3 การประเมินระดับ 3 (ทางเลือก B)

การประเมินระดับ 3 ใช้หลักการประเมินเหมือนกับการประเมินระดับ 2 แต่ เส้นโค้งความเสียหาย ที่ใช้จะมีลักษณะเฉพาะมากขึ้นดังนี้

- ทางเลือก A จะใช้เส้นโค้งความเสียหายที่จากการวิเคราะห์แบบ Probabilistic
- ทางเลือก B จะใช้เส้นโค้งความเสียหายที่มีรูปร่างขึ้นกับสมบัติวัสดุ
- ทางเลือก C จะใช้เส้นโค้งความเสียหายที่มีรูปร่างขึ้นกับสมบัติวัสดุ ชนิดของชิ้นส่วน และรอยร้าว
- ทางเลือก D จะใช้เส้นโค้งความเสียหายที่มาจากการประยุกต์การเติบโตอย่างมีเสถียรภาพในการวิเคราะห์
- ทางเลือก E จะใช้เส้นโค้งความเสียหายที่มาจากการนำคำแนะนำเพิ่มเติมของมาตรฐานอื่นๆ มาประกอบการประเมิน

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกการประเมินระดับ 3 (ทางเลือก B) เพราะเส้นโค้งความเสียหายที่มีรูปร่างขึ้นกับสมบัติวัสดุจะให้ผลการประเมินใกล้เคียงปัญหาที่สนใจมากขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นโค้งความเสียหายที่มีรูปร่างขึ้นกับอัตราส่วนภาระเพียงอย่างเดียว (การประเมินระดับ 2) และเหมาะสมกับระยะเวลาการดำเนินงานของงานวิจัย โดยขั้นตอนการประเมินระดับ 3 (ทางเลือก B) เหมือนกับการประเมินระดับ 2 ต่างกันเพียงขั้นตอนการหาเส้นโค้งความเสียหาย (ขั้นตอนที่ 13) ซึ่งมีรายละเอียดเพิ่มเติมสรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมของวัสดุ (Engineering stress-strain curve) กรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุไม่สามารถระบุความแข็งแรงครากที่ชัดเจนให้ใช้ค่าความเค้นที่อ่านได้จากการลากเส้นตรงขนานกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ณ 0.2% ของความเครียด (0.2% Offset yield strength) เป็นค่าความแข็งแรงครากสำหรับประเมิน

ขั้นตอนที่ 2 หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงของวัสดุ (True stress-strain curve) โดยแทนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในขั้นตอนที่ 1 ด้วยแบบจำลอง Ramberg-Osgood

$$\varepsilon_{ts} = \frac{\sigma_t}{E_y} + \left( \frac{\sigma_t}{H_{RO}} \right)^{\frac{1}{n_{RO}}} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $\sigma_t = (1 + \varepsilon_{es}) \sigma_{es}$  (3.15)

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_{es}) \quad (3.16)$$

เมื่อ  $\varepsilon_{ref}$  คือ ความเครียดอ้างอิง  $\sigma_{ys}$  คือ ความแข็งแรงคราก  $\sigma_{uts}$  คือ ความแข็งแรงดึงสูงสุด  $E_y$  คือ มอดูลัสยืดหยุ่น  $n_{RO}$  และ  $H_{RO}$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง Ramberg-Osgood ซึ่งหาได้จากทดลอง

กรณีไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของวัสดุ มาตรฐานแนะนำให้ประมาณ  $n_{RO}$  และ  $H_{RO}$  จากข้อมูล  $\sigma_{ys}$  และ  $\sigma_{uts}$  ด้วยสมการ (3.17) และ (3.18) ตามลำดับ

$$n_{RO} = \frac{1 + 1.3495 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}} \right) - 5.3117 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}} \right)^2 + 2.9643 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}} \right)^3}{1.1249 + 11.0097 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}} \right) - 11.7464 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}} \right)^2} \quad (3.17)$$

และ 
$$H_{RO} = \frac{\sigma_{uts} \exp[n_{RO}]}{n_{RO}^{n_{RO}}} \quad (3.18)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาเส้นโค้งความเสียหายที่ขึ้นกับสมบัตวัสดุ

$$K_r(L_r^P) = \left( \frac{E_y \varepsilon_{ref}}{L_r^P \sigma_{ys}} + \frac{(L_r^P)^3 \sigma_{ys}}{2E_y \varepsilon_{ref}} \right)^{-1/2} \quad \text{for } 0.0 < L_r^P \leq L_{r(max)}^P \quad (3.19)$$

$$K_r(L_r^P) = 1.0 \quad \text{for } L_r^P = 0.0 \quad (3.20)$$

เมื่อ  $L_r^P$  คือ อัตราส่วนการประจุรวม  $L_{r(max)}^P$  คือ อัตราส่วนการประจุรวมสูงสุดที่ชิ้นส่วนสามารถรับได้โดยไม่เกิดการคราก

### 3.5 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ

การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ หมายถึง การคำนวณระยะเวลาที่รอยร้าวเติบโตจากความยาวรอยร้าวที่ตรวจพบถึงความยาวรอยร้าวที่ยอมรับ มาตรฐานรองรับกลไกการเติบโตของรอยร้าว 4 อย่าง คือการเติบโตของรอยร้าวล้า เกิดจากชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวรับภาระล้า ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาและกระทำซ้ำเป็นวัฏจักร การเติบโตจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน เกิดจากชิ้นส่วนรับภาระสถิต และถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน การเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Assisted Cracking, HAC) เกิดจากการดูดซับไฮโดรเจนของวัสดุระหว่างการใช้งานในสภาพแวดล้อมกัดกร่อน หรือการสัมผัสกับก๊าซไฮโดรเจนโดยตรงที่อุณหภูมิสูง และการเติบโตของรอยร้าวล้าร่วมกับการกัดกร่อน (Corrosion fatigue crack growth) เกิดกับชิ้นส่วนที่รับภาระล้าในสภาพแวดล้อมกัดกร่อน สำหรับงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการเติบโตของรอยร้าวล้าที่รับภาระล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่ ซึ่งมีขั้นตอนการประเมินอายุใช้งานที่เหลือ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ประเมินการคงสภาพด้วยการประเมินระดับ 2 หรือ 3 ถ้าผลการประเมินคือชิ้นส่วนปลอดภัยจึงกำหนดให้ความยาวรอยร้าวดังกล่าวเป็นขนาดรอยร้าวเริ่มต้น  $a_0$

ขั้นตอนที่ 2 เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อคำนวณหาขนาดการเติบโตของรอยร้าวลำ เช่น แบบจำลองของ Walker

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{\Delta K}{(1-R)^m} \right)^n \quad (3.21)$$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่าคงที่ของแบบจำลองจากสมบัติวัสดุ เช่น สมการ (3.21) ค่าคงที่ของแบบจำลอง คือ  $C$ ,  $m$  และ  $n$  ซึ่งหาได้จากการทดลอง หรือคู่มือสมบัติวัสดุ

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น และอัตราส่วนภาระจากภาระสูงสุด  $P_{\max}$  และภาระต่ำสุด  $P_{\min}$  จากสมการ (3.22) และ (3.23) ตามลำดับ โดย  $K_{\max}$  และ  $K_{\min}$  คือ ตัวประกอบความเข้มของความเค้นเมื่อชิ้นส่วนรับภาระสูงสุดและภาระต่ำสุดตามลำดับ

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (3.22)$$

$$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (3.23)$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณขนาดรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น  $\Delta a$  จากสมการ (3.21)

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาขนาดรอยร้าวใหม่  $a_i$  จากสมการ (3.24)

$$a_i = a_{i-1} + \Delta a \quad (3.24)$$

เมื่อ  $a_i$  คือ ขนาดรอยร้าวใหม่  $a_{i-1}$  คือ ขนาดรอยร้าวเก่า  $\Delta a$  คือ ความยาวรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น  $i$  คือ จำนวนรอบภาระมีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงจำนวนรอบที่สนใจ

ขั้นตอนที่ 7 ประเมินการคงสภาพระดับ 2 หรือ 3 โดยใช้ความยาวรอยร้าวใหม่จากขั้นตอนที่ 6 หากชิ้นส่วนปลอดภัยให้เริ่มพิจารณาตั้งแต่ขั้นตอนที่ 4 ใหม่อีกครั้ง แต่หากชิ้นส่วนไม่ปลอดภัยให้พิจารณาในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณอายุใช้งานของชิ้นส่วน อายุใช้งานของชิ้นส่วนคือ จำนวนรอบภาระทั้งหมดที่พิจารณาจนกระทั่งผลการประเมินในขั้นตอนที่ 7 คือ ชิ้นส่วนไม่สามารถใช้งานต่อไปได้

### 3.6 การประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก

การรื้อก่อนการแตกหักเป็นแนวคิดหนึ่งในการออกแบบที่เสียหายแล้วยังปลอดภัย (Fail-safe design) ชิ้นส่วนที่ถูกออกแบบให้รื้อก่อนแตกหักต้องมีขนาดรอยร้าว ณ อัตราการรื้อที่ตรวจพบได้น้อยกว่าขนาดรอยร้าววิกฤติ การรื้อ คือ สัญญาณให้ทราบว่า มีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นใน

ระบบ จึงช่วยให้การซ่อมบำรุงสามารถทำได้ทัน นอกจากนั้นการรั่วช่วยลดความดันภายในภาชนะ พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวจึงมีค่าลดลง รอยร้าวจึงไม่เติบโตจนทำให้ชิ้นส่วนเสียหายเป็นวงกว้าง ขั้นตอนการประเมินการรั่วก่อนการแตกหักมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ประเมินการคงสภาพด้วยการประเมินระดับ 2 หรือ 3 เพื่อหาขนาดรอยร้าวเริ่มต้นใหญ่ที่สุดที่ไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหาย

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินการคงสภาพด้วยการประเมินระดับ 2 หรือ 3 เพื่อหาขนาดรอยร้าวทะลุผ่านความหนาวิกฤติ ที่ไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหายจากการคราก

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาพื้นที่เปิดปากรอยร้าว (Crack Opening Area,  $COA$ ) เนื่องจากรอยร้าวด้วยสมการ (3.25)

สำหรับท่อมีรอยร้าวตามแนวแกนรับภาระความดันภายใน

$$COA = H_p \left( \frac{pR_o}{t} \right) \left( \frac{2\pi c^2}{E_y} \right) \quad (3.25)$$

เมื่อ  $H_p$  คือ เป็นค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับรัศมีภายในและความหนาท่อหาได้จาก ตารางที่ K.1 – K.2 ในมาตรฐาน  $E_y$  คือ มอดูลัสความยืดหยุ่น  $p$  คือ ความดันภายใน  $R_o$  คือ รัศมีภายนอกท่อ  $t$  คือ ความหนาท่อ  $c$  คือ ครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาอัตราการรั่วเนื่องจากพื้นที่เปิดปากรอยร้าวในขั้นตอนที่ 2 ที่สามารถตรวจพบได้จากสมการ (3.26) [26]

$$Q = \sqrt{\frac{2\rho p}{2.5 + f_F (t/D_h)}} COA \quad (3.26)$$

เมื่อ  $D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของไหล (Hydraulic diameter)  $f_F$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหล (Friction factor)  $Q$  คือ อัตราการรั่วเนื่องจากพื้นที่เปิดปากรอยร้าว  $p$  คือ ความดันภายใน  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของไหล  $t$  คือ ความหนาท่อ

## บทที่ 4

### การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ

แนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1960 [27] ซึ่งมีการคิดค้นภาษาคอมพิวเตอร์ชื่อ Simula [28] ที่สามารถรองรับแนวคิดเชิงวัตถุ ต่อมาในปี ค.ศ. 1963 มีการพัฒนาซอฟต์แวร์ชื่อ Sketchpad [29] ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์แรกที่น่าการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ด้วยภาพมาใช้ และรองรับแนวคิดเชิงวัตถุได้สมบูรณ์ ในปี ค.ศ.1970 ศูนย์วิจัย Xerox PARC ได้คิดค้นภาษาใหม่ชื่อ Smalltalk [30] ซึ่งมีพื้นฐานมาจากภาษา Simula และมีระบบปฏิบัติการแบบ GUI จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1990 แนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุจึงแพร่หลายมากขึ้นเมื่อถูกนำมาใช้ในระบบปฏิบัติการของ Mac OS X และมีภาษาใหม่ๆ เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เช่น Visual Basic.NET, Modula-2, Delphi, Java และ Eiffel เป็นต้น

ในบทนี้จะอธิบายพื้นฐานของแนวคิดเชิงวัตถุสำหรับออกแบบโครงสร้างโปรแกรม และการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ ซึ่งประกอบด้วย แนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ สมบัติพิเศษของโปรแกรมเชิงวัตถุ และพื้นฐานการพัฒนาโปรแกรม

#### 4.1 แนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ

แนวคิดการเขียนโปรแกรมในปัจจุบันแบ่งเป็น 2 แนวคิด คือการเขียนโปรแกรมเชิงกระบวนการ (Procedural programming) และการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object-Oriented Programming, OOP) ลักษณะของการเขียนโปรแกรมเชิงกระบวนการ คือข้อมูลหรือตัวแปร และโปรแกรมย่อยจะแยกกันชัดเจน กล่าวคือ ผู้เขียนโปรแกรมจะประกาศตัวแปรชนิด (Data type) ต่างๆ ไว้ที่โปรแกรมหลัก ซึ่งโปรแกรมย่อยทั้งหมดสามารถเข้าถึงข้อมูลนั้นได้ การทำงานโปรแกรมหลักจะเรียกใช้โปรแกรมย่อยตามลำดับขั้นตอนของการแก้ปัญหา การเขียนโปรแกรมเชิงกระบวนการจึงเหมาะกับการเขียนโปรแกรมขนาดเล็กไม่ใหญ่มาก เนื่องจากเมื่อโปรแกรมมีขนาดใหญ่ขึ้นการพัฒนา หรือแก้ไขโปรแกรมจะยากขึ้น เพราะหากผู้เขียนโปรแกรมไม่ระมัดระวังโปรแกรมย่อยที่เพิ่มเข้าไปอาจเปลี่ยนค่าของตัวแปรในโปรแกรมหลักได้

ในขณะที่การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุจะมองระบบต่างๆ เป็นกลุ่มวัตถุที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน การทำงานของโปรแกรมจึงเกิดจากการสื่อสารกันระหว่างวัตถุ (Object) เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมเชิงกระบวนการ วัตถุจะเปรียบเสมือนตัวแปรหนึ่งของโปรแกรม แต่ต่างจากตัวแปรในโปรแกรมเชิงกระบวนการตรงที่วัตถุเป็นตัวแปรที่มีได้ทั้งสมบัติ (Property) และความสามารถในการทำงาน หรือพฤติกรรม (Method) วัตถุจึงมีลักษณะเป็นตัวปฏิบัติการซึ่งติดต่อกันผ่านพฤติกรรมที่กำหนดไว้ ส่งผลให้ผู้เขียนโปรแกรมไม่มีโอกาสเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัตถุโดยไม่ตั้งใจ เพราะการเข้าถึงสมบัติของวัตถุต้องผ่านพฤติกรรมที่วัตถุเตรียมไว้เท่านั้น การเขียนโปรแกรมด้วยแนวคิดเชิงวัตถุจึงเอื้อต่อการนำโปรแกรมกลับมาใช้ใหม่ เพราะผู้เขียนโปรแกรม

สามารถเลือกแก้ไขเฉพาะส่วนของโปรแกรมได้ โดยไม่ต้องเขียนโค้ด (code) ของโปรแกรมใหม่ทั้งหมด

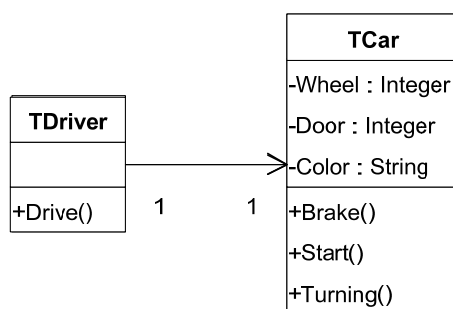
## 4.2 คลาสและวัตถุ

การเขียนโปรแกรมเชิงกระบวนการผู้เขียนโปรแกรมจำเป็นต้องประกาศข้อมูล หรือตัวแปรก่อนเรียกใช้งานตัวแปรนั้นๆ เสมอ การประกาศตัวแปรคือ การจองพื้นที่ในหน่วยความจำสำหรับเก็บค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งผู้เขียนโปรแกรมต้องระบุชนิดให้กับตัวแปรที่ประกาศ เช่น จำนวนเต็ม (Integer) จำนวนจริง (Real) และข้อความ (String) เป็นต้น สำหรับการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ การประกาศตัวแปรเสมือนกับการสร้างวัตถุซึ่งมีชนิดข้อมูลประกอบด้วยสมบัติ และพฤติกรรม เรียกชนิดข้อมูลที่ประกอบด้วยสมบัติและพฤติกรรมนี้ว่า คลาส (Class) คลาสเป็นชนิดข้อมูลหนึ่งที่โปรแกรมใช้สร้างวัตถุ องค์ประกอบของคลาสมี 2 ส่วน คือ สมบัติ และพฤติกรรม เช่น คลาสรถยนต์ มีจำนวนล้อ จำนวนประตู สี เป็นสมบัติ และมีการสตาร์ทเครื่อง บังคับเลี้ยว เบรก เป็นพฤติกรรม เป็นต้น สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคลาส คือ บล็อกรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังรูปที่ 4.1 ส่วนบนสุดแสดงชื่อคลาส ส่วนกลางแสดงรายการสมบัติ และส่วนล่างแสดงรายการพฤติกรรม ข้างหน้ารายการสมบัติ และพฤติกรรมมีเครื่องหมาย “-” หรือ “+” สำหรับบอกระดับการเข้าถึงสมบัติ หรือพฤติกรรมนั้น เครื่องหมาย “+” หมายถึง รายการนั้นเป็นสาธารณะ (Public) ซึ่ง คลาสอื่นสามารถเข้าถึงข้อมูลดังกล่าวได้ เครื่องหมาย “-” หมายถึง รายการนั้นเป็นเฉพาะตัว (Private) ซึ่งคลาสอื่นไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลดังกล่าวได้โดยตรง การเข้าถึงต้องผ่านพฤติกรรมของคลาสนั้น

| TCar             |
|------------------|
| -Wheel : Integer |
| -Door : Integer  |
| -Color : String  |
| +Brake()         |
| +Start()         |
| +Turning()       |

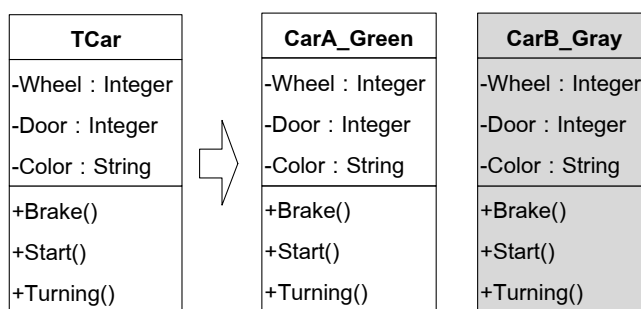
รูปที่ 4.1 สัญลักษณ์ของคลาสรถยนต์

ความสัมพันธ์ระหว่างคลาสต่างๆ สามารถแสดงได้ด้วยแผนภาพที่เรียกว่า คลาสไดอะแกรมซึ่งแสดงองค์ประกอบ ความสัมพันธ์ และหน้าที่ของคลาสต่างๆ เช่น คลาสคนขับเรียกใช้คลาสรถยนต์สามารถเขียนคลาสไดอะแกรมได้ ดังรูปที่ 4.2 บล็อกแต่บล็อกในคลาสไดอะแกรมจะแทนคลาสหนึ่งคลาส คือคลาสคนขับ และคลาสรถยนต์ เส้นตรงซึ่งมีปลายข้างหนึ่งเป็นตัวลูกศรแทนความสัมพันธ์แบบถูกเรียกใช้ และหมายเลขกำกับปลายแต่ละข้างของเส้นตรงแสดงจำนวนคลาสที่ถูกใช้



รูปที่ 4.2 คลาสไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลาสคนขับและคลาสรถยนต์

วัตถุ คือตัวแปรที่ทำให้เกิดเหตุการณ์บางอย่างอาจเป็นนามธรรม หรือรูปธรรม วัตถุสร้างมาจากคลาส ซึ่งเปรียบเสมือนพิมพ์เขียวที่ถ่ายทอดโครงสร้างของตัวเองให้กับวัตถุที่จะสร้าง ดังรูปที่ 4.3 รถยนต์ A และรถยนต์ B ถูกสร้างจากคลาสรถยนต์ที่มีสมบัติ คือจำนวนล้อ จำนวนประตู สี และมีพฤติกรรม คือ สตาร์ทเครื่อง บังคับเลี้ยว เบรก เหมือนคลาสรถยนต์ ทั้งนี้โดยสมบัติของวัตถุสามารถระบุสมบัติ หรือพฤติกรรมเฉพาะของตัวเองได้ กล่าวคือ รถยนต์ A อาจมีสมบัติสีเป็นสีเขียว รถยนต์ B อาจมีสมบัติสีเป็นสีเทา เป็นต้น

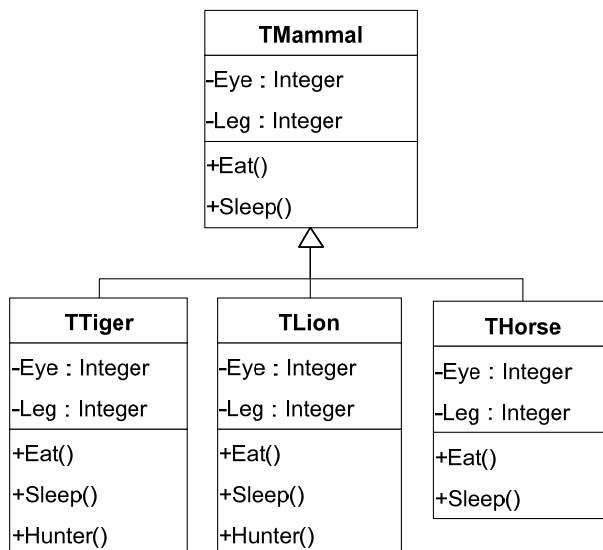


รูปที่ 4.3 รถยนต์ A และรถยนต์ B ถูกสร้างจากคลาสรถยนต์

### 4.3 สมบัติพิเศษของโปรแกรมเชิงวัตถุ

จุดเด่นที่ทำให้แนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ แตกต่างและได้เปรียบเมื่อเทียบกับวิธีเขียนโปรแกรมแบบอื่น [21], [24] ดังนี้

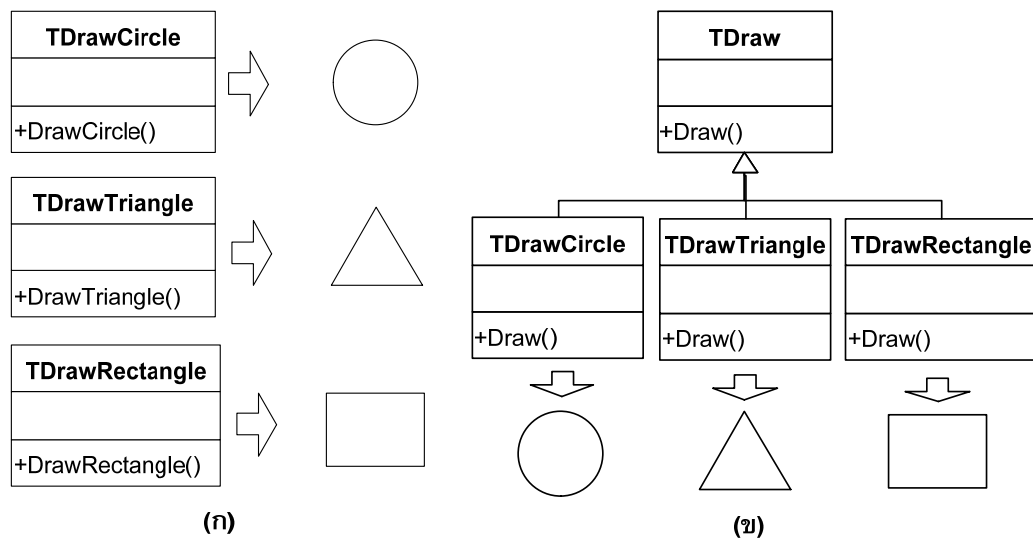
1) สามารถสืบทอด (Inheritance) คลาสใหม่จากคลาสเดิมโดยเพิ่มเติมเฉพาะสิ่งที่แตกต่างจากเดิม แต่คลาสใหม่สามารถใช้สมบัติ และพฤติกรรมของคลาสเดิมได้สมบัตินี้ช่วยลดความซ้ำซ้อนของการเขียนโปรแกรม โปรแกรมจึงเป็นระเบียบและมีขนาดเล็กกลง เช่น ต้องการสร้างคลาสเพื่ออธิบายลักษณะของเสือ สิงโต และม้า จะเห็นว่าสัตว์ทั้ง 3 ชนิดมีสิ่งที่เหมือนกัน คือ เป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม มีอวัยวะ และพฤติกรรมหลายอย่างเหมือนกัน เช่น จำนวนตา จำนวนขา การกิน การนอน เป็นต้น หากไม่ใช้สมบัติการสืบทอดจำเป็นต้องเขียนคลาส TTiger คลาส TLion และคลาส THorse ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ ที่เหมือนกันถึง 3 ครั้ง แต่การใช้สมบัติการสืบทอดจะช่วยให้ผู้เขียนโปรแกรมเขียนสมบัติดังกล่าวเพียงครั้งเดียวในคลาสเดิม ซึ่งเรียกว่า คลาสแม่ (Super class) จากรูปที่ 4.4 คลาส TMammal ซึ่งเป็นคลาสแม่สามารถสืบทอดคุณสมบัติต่างๆ ไปยังคลาสใหม่ ซึ่งเรียกว่า คลาสลูก (Subclass) คือ คลาส TTiger คลาส TLion และคลาส THorse ทั้งนี้คลาสลูกสามารถมีสมบัติหรือพฤติกรรมเฉพาะอื่นเพิ่มเติมได้ เช่น คลาส TTiger และคลาส TLion อาจมีพฤติกรรมล่า (Hunter) เพิ่มขึ้นมาภายหลัง เป็นต้น สัญลักษณ์เส้นตรงมีหัวลูกศรโปร่งอยู่ที่ปลายข้างหนึ่งแทนความสัมพันธ์แบบการสืบทอด โดยหัวลูกศรจะชี้ไปหาคลาสต้นแบบ



รูปที่ 4.4 การสืบทอดของคลาสสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม



2) สามารถมีหลายรูปแบบ (Polymorphism) กล่าวคือ ด้วยคำสั่งแบบเดียวกัน การทำงานของโปรแกรมจะเปลี่ยนไปตามวัตถุที่รับคำสั่งนั้น คุณสมบัตินี้ทำให้เมื่อเพิ่มคลาส (เพื่อเพิ่มความสามารถของโปรแกรม) ผู้เขียนโปรแกรมไม่จำเป็นต้องแก้ไขชื่อคำสั่งในโปรแกรมหลัก แต่เมื่อโปรแกรมทำงาน วัตถุที่สร้างจากคลาสใหม่จะตอบสนองต่อคำสั่งเดิมด้วยพฤติกรรมใหม่โดยอัตโนมัติ คุณสมบัตินี้ช่วยลดเวลาในการพัฒนาโปรแกรม เช่น คลาส TDraw เป็นคลาสสำหรับวาดรูปเรขาคณิต จากรูปที่ 4.5(ก) หากไม่ใช้สมบัติการมีหลายรูปแบบจำเป็นต้องเขียนคลาสสำหรับวาดรูปจำนวน 3 คลาส ได้แก่ คลาส TDrawCircle คลาส TDrawTriangle และคลาส TDrawRectangle แล้วเรียกใช้คำสั่ง DrawCircle, DrawTriangle และ DrawRectangle เพื่อวาดรูปวงกลม รูปสามเหลี่ยม และรูปสี่เหลี่ยม ตามลำดับ แต่ถ้าใช้สมบัติการมีหลายรูปแบบ ดังรูปที่ 4.5(ข) จะสามารถเรียกใช้คำสั่ง Draw เหมือนกันได้ โดยภาพที่ถูกวาดจะขึ้นกับวัตถุที่ถูกสร้างขึ้น กล่าวคือ ถ้าวัตถุจากคลาส TDrawCircle ถูกสร้างคำสั่ง Draw จะวาดรูปวงกลม แต่ถ้าวัตถุจากคลาส TDrawTriangle ถูกสร้างคำสั่ง Draw จะวาดรูปสามเหลี่ยม เป็นต้น

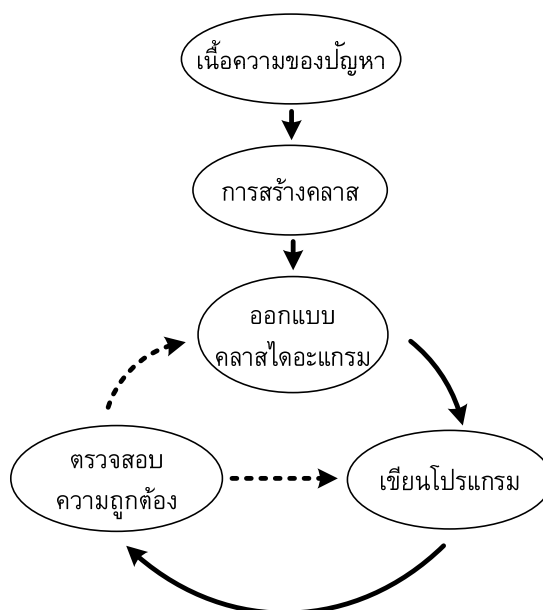


รูปที่ 4.5 การสร้างวัตถุเพื่อวาดรูปเรขาคณิต

3) สามารถควบคุมการเข้าถึงข้อมูล (Data encapsulation) หรือสมบัติของคลาส โดยทั่วไปจะแบ่งระดับข้อมูลเป็น 3 ระดับ คือ ระดับสาธารณะ (Public) หมายถึง ข้อมูลที่ทุกคลาสเข้าถึงได้ ระดับป้องกัน (Protected) หมายถึง ข้อมูลที่คลาสลูกเท่านั้นที่เข้าถึงได้ และระดับเฉพาะที่ (Private) หมายถึง ข้อมูลที่คลาสอื่นเข้าถึงไม่ได้โดยตรง การเข้าถึงสมบัติของวัตถุระดับป้องกัน และระดับเฉพาะที่จะต้องผ่านพฤติกรรมการเข้าถึงข้อมูลของวัตถุเท่านั้น คุณสมบัตินี้ทำให้สมบัติของวัตถุไม่ถูกเปลี่ยนแปลงโดยไม่ได้ตั้งใจระหว่างที่โปรแกรมทำงาน หรือการตั้งชื่อตัวแปรซ้ำซ้อนในระหว่างการเขียนโปรแกรม

#### 4.4 พื้นฐานของการพัฒนาโปรแกรม

การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมตามแนวคิดเชิงวัตถุมีขั้นตอนแสดงดังรูป 4.6 เริ่มจากการทำความเข้าใจเนื้อหาของปัญหา ขั้นตอนต่อไป คือการระบุคลาสที่จำเป็น และพิจารณาว่าแต่ละคลาสควรประกอบด้วยสมบัติ หรือพฤติกรรมใดบ้าง ขั้นตอนต่อไป คือการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคลาสเรียกว่า การออกแบบคลาสไดอะแกรม ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่า คลาสทำงานร่วมกันอย่างไรเพื่อให้ได้คำตอบที่ต้องการ ขั้นตอนถัดไป คือการเขียนโค้ดด้วย ภาษาคอมพิวเตอร์ ภาษาคอมพิวเตอร์ที่เลือกใช้ต้องเป็นภาษาที่รองรับแนวคิดเชิงวัตถุ เช่น ภาษา Java ภาษา C++ และภาษา Delphi เป็นต้น ขั้นตอนสุดท้าย คือการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมว่าให้ผลการทำงานถูกต้องหรือไม่ หากพบว่าโปรแกรมทำงานผิดพลาดจึงกลับไปแก้ไขโค้ด หรือปรับปรุงคลาสไดอะแกรม กระทำเช่นนี้กลับไปกลับมาจนกว่าโปรแกรมจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือ โปรแกรมให้ผลการทำงานที่ถูกต้อง ใช้หน่วยความจำ และเวลาในการประมวลผลน้อยที่สุด และโครงสร้างของโปรแกรมเอื้อต่อการพัฒนาในอนาคต

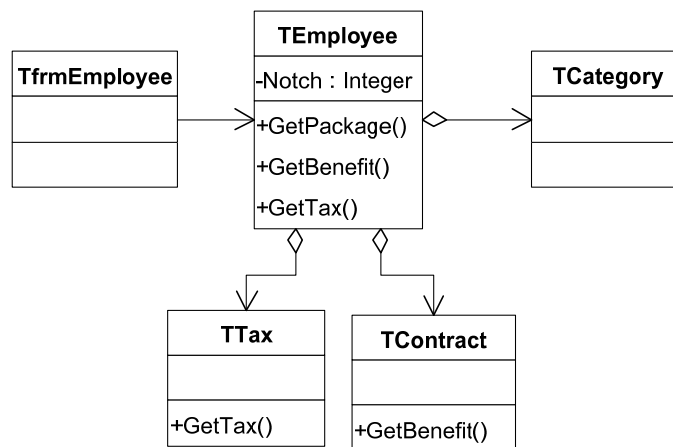


รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรม

จากขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมข้างต้น จะเห็นว่าระหว่างการออกแบบโปรแกรม อาจต้องลองผิดลองถูกซ้ำไปซ้ำมาหลายครั้งจนกว่าจะได้จะคลาส และความสัมพันธ์ระหว่างคลาที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดจำนวนการลองผิดลองถูกดังกล่าว จึงมีผู้เชี่ยวชาญด้านการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุพยายามจำแนกปัญหาประเภทต่าง ๆ สังเคราะห์คลาส และความสัมพันธ์ระหว่างคลาที่เหมาะสมกับปัญหานั้นๆ ผลลัพธ์ดังกล่าวนี้เรียกว่าแบบแผน (Pattern) ซึ่งมีเป็นจำนวนมาก [21] เช่น Template Method Pattern, Strategy Pattern และ

Player-Role Pattern เป็นต้น ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะแบบแผน Player-Role เนื่องจากจะนำไปใช้พัฒนาโปรแกรมในงานวิจัย

Player-Role Pattern [21] เป็นแบบแผนที่ใช้ความสัมพันธ์แบบเป็นส่วนหนึ่ง และการมีได้หลายรูปแบบ แบบแผนนี้จะแยกคลาสสั่งการ (Player) ซึ่งมีหน้าที่ติดต่อกับส่วนเชื่อมต่อ (Interface) และเรียกใช้คลาสกลุ่มปฏิบัติการ (Role) ซึ่งแต่ละคลาสมีหน้าที่เฉพาะ เช่น รูปที่ 4.7 เป็นคลาสไดอะแกรมของโปรแกรมคำนวณค่าแรงของพนักงานบริษัท พนักงานกลุ่มแรกจะคิดค่าแรงเป็นรายเดือน พนักงานกลุ่มที่สองคิดค่าแรงรายสัปดาห์ และพนักงานกลุ่มสุดท้ายเป็นนักศึกษาฝึกงาน จากรูปคลาส TfrmEmployee ทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน และติดต่อกับคลาสกลุ่มสั่งการ คลาส TfrmEmployee จะเรียกใช้ คลาส TEmployee ซึ่งมีคลาสกลุ่มปฏิบัติการ คือ คลาส TCategeory คลาส TContract และคลาส TTax เป็นส่วนประกอบ คลาส TEmployee จะเรียกใช้คลาส TCategeory คลาส TTax คลาส TContract เพื่อคำนวณค่าแรง ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม และค่าตอบแทนอื่นๆ ตามลำดับ ทั้งนี้แต่ละคลาสจะมีวิธีการคำนวณที่ต่างกัน เช่น คลาส TCategeory จะคำนวณค่าแรงตามกลุ่มของพนักงานที่ต่างกัน คลาส TEmployee จะคิดผลตอบแทนจากลักษณะสัญญาจ้างงานระหว่างบริษัทกับพนักงาน เป็นต้น



รูปที่ 4.7 คลาสไดอะแกรมที่ใช้แบบแผน Player-Role เพื่อคำนวณค่าแรง [21]

## บทที่ 5

### การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมและผลการออกแบบ

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างและผลการออกแบบ โดยเริ่มจากแนวความคิด รวบรวม การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม การทำงานของโปรแกรม และผลการเขียน อินเทอร์เน็ต ตามลำดับ

#### 5.1 แนวความคิดรวบยอด

การออกแบบโปรแกรมเพื่อให้มีความสามารถตามหัวข้อ 1.3 ได้วางแนวคิดหลักไว้ 2 ประการ คือ ประการแรก โปรแกรมควรมีอินเทอร์เน็ต (Interface) ที่ใช้งานง่าย กล่าวคือ มีฐานข้อมูลวัสดุ (Database) ให้เลือกใช้ มีคำเตือนกรณีผู้ใช้ป้อนข้อมูลเข้า (Input data) ไม่ครบถ้วน สามารถพิมพ์รายงานการประเมินได้ และมีตัวช่วย (Help) ให้ผู้ใช้ศึกษาเมื่อไม่เข้าใจ การใช้โปรแกรม เป็นต้น ประการที่สอง โครงสร้างของโปรแกรมควรยืดหยุ่นพอที่จะรองรับการปรับปรุงโปรแกรมในอนาคต เช่น การเพิ่มชนิดโครงสร้าง และกลไกความเสียหาย เป็นต้น กรณีการเพิ่มเติมอัลกอริทึมใหม่ๆ เช่น ผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว และเกณฑ์ในการระบุลักษณะรอยร้าว เป็นต้น โดยการปรับปรุงดังกล่าวจะกระทบกับส่วนอื่นของโปรแกรมน้อยที่สุด

#### 5.2 การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม

การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมด้วยแนวคิดเชิงวัตถุประกอบด้วย 5 ขั้นตอนคือ การทำความเข้าใจเนื้อหาของปัญหา การสร้างคลาสจากเนื้อหาของปัญหา การออกแบบคลาสไดอะแกรม การเขียนโปรแกรม และการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.4 สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายเฉพาะ เนื้อหาของปัญหา การสร้างคลาส และการออกแบบคลาสไดอะแกรม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 5.2.1 เนื้อหาของปัญหา

การทำความเข้าใจเนื้อหาของปัญหาถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมที่จะช่วยให้โปรแกรมเมอร์ (Programmer) ออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมให้มีประสิทธิภาพตามที่วางไว้ได้ อีกทั้งช่วยให้สร้างคลาสในขั้นตอนต่อไป (หัวข้อ 5.2.2) ได้ง่าย สำหรับปัญหาชิ้นส่วนมีรอยร้าวเมื่อเจ้าหน้าที่ตรวจพบรอยร้าวบนชิ้นส่วนกิจกรรมที่ต้องกระทำ คือ การระบุขนาดรอยร้าว การวิเคราะห์ความเค้น และการประเมินการคงสภาพ ทั้งนี้หากโครงสร้างปลอดภัย เจ้าหน้าที่ควรประเมินอายุที่เหลือ และประเมินการรื้อก่อนการแตกหักต่อไป ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

สำหรับขั้นตอนการประเมินแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การระบุข้อมูล การประมวลผล และการสรุปผล การระบุข้อมูล คือ การระบุข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการประเมิน อาจได้มาจากการ

ตรวจวัดหรือการทดลอง สำหรับการทำงานของโปรแกรมขั้นตอนนี้จะหมายถึง การรับข้อมูลป้อนเข้าจากผู้ใช้โปรแกรม เช่น ขนาดชิ้นส่วน ได้แก่ รัศมีภายใน รัศมีภายนอก และความหนาของชิ้นส่วน เป็นต้น สมบัติวัสดุ ได้แก่ มอดูลัสความยืดหยุ่น ความแข็งแรงคราก และความต้านทานการแตกหัก เป็นต้น ภาระการใช้งาน ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และฟังก์ชันการกระจายของความเค้น เป็นต้น ข้อมูลรอยร้าว ได้แก่ ตำแหน่ง ความยาว และความลึกของรอยร้าว เป็นต้น และข้อมูลรอยเชื่อม ได้แก่ ความกว้าง ตำแหน่ง และทิศทางการวางตัวของรอยเชื่อม เป็นต้น

การประมวลผล คือ การนำข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้ามาคำนวณ หรือวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่กำหนดไว้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ สำหรับการทำงานของโปรแกรมขั้นตอนนี้จะหมายถึง การสื่อสารกันระหว่างคลาสต่างๆ ภายในโปรแกรม เช่น การคำนวณความเค้นอ้างอิง การคำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว การระบุลักษณะรอยร้าว การประเมินการคงสภาพ การประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ และการประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก เป็นต้น

การสรุปผล คือ การรวบรวมข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้าทั้งหมดมาสรุปใหม่อีกครั้งเพื่อสื่อสารให้ผู้อื่นเข้าใจได้ง่าย ทั้งนี้อาจจะมีคำแนะนำในการซ่อมบำรุงหรือ ข้อแนะนำอื่นๆ ไว้ในการสรุปผลการประเมินด้วย สำหรับการทำงานของโปรแกรมขั้นตอนนี้จะหมายถึง การแสดงผลจากการทำงานของโปรแกรมบนหน้าจอ

### 5.2.2 การสร้างคลาส

ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.2 คลาสสร้างจากสิ่งต่างๆ ที่สนใจ โดยคลาสที่สร้างขึ้นจะถูกเขียนในรูปของความสัมพันธ์เรียกว่า คลาสไดอะแกรม ในขั้นตอนต่อไป คลาสประกอบด้วยสมบัติและพฤติกรรมซึ่งจะใช้เป็นแม่แบบสำหรับสร้างวัตถุเพื่อให้โปรแกรมทำงานตามขั้นตอนที่ต้องการ จากเนื้อความของปัญหาสามารถสร้างคลาสได้ดังตารางที่ 5.1 เช่น สร้างคลาส TMaterial เพื่อทำหน้าที่จัดการกับข้อมูลวัสดุ สร้างคลาส TGUI เพื่อทำหน้าที่รับข้อมูลและแสดงผลการประเมิน เป็นต้น และคลาส TAssessment เพื่อทำหน้าที่บริหารจัดการคอยเรียกใช้คลาสอื่นๆ ให้ประเมินชิ้นส่วนตามขั้นตอนที่มาตรฐานแนะนำ คลาส TDatabase เพื่อรวบรวมข้อมูลวัสดุไว้ให้ผู้ประเมินได้เลือกใช้ คลาส TCrackPipe เพื่อจัดการกับข้อมูลชิ้นส่วน คลาส TLBB เพื่อประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก และคลาส TCrackGrowth เพื่อประเมินอายุใช้งานที่เหลือ เป็นต้น

ตารางที่ 5.1 สมบัติและพฤติกรรมของคลาส

| คลาส                | สมบัติ  | พฤติกรรม  |
|---------------------|---|---|
| TGUI                |   | - รับข้อมูล และแสดงผลการประเมิน   |
| TDatabase           |   | - เก็บข้อมูลตัวอย่างวัสดุ   |
| TAssessment         |   | - เรียกใช้งานคลาสอื่นๆ ตามขั้นตอนการประเมินที่กำหนดไว้  |
| TMaterial           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- สมบัติแรงดึง เช่น มอดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง ความแข็งแรงคราก ความแข็งแรงสูงสุด และความเค้นที่ยอมรับได้ เป็นต้น</li> <li>- สมบัติความต้านทานการแตกหัก เช่น อุณหภูมิอ้างอิง และความต้านทานการแตกหักของวัสดุ เป็นต้น</li> <li>- ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม เช่น ค่าคงตัวของแบบจำลอง Ramberg-Osgood เป็นต้น</li> </ul> | - กำหนดความเค้นที่ยอมรับได้ อุณหภูมิอ้างอิง และความต้านทานการแตกหักขอบเขตล่าง   |
| TCrackPipe          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ขนาดชิ้นส่วน เช่น รัศมีภายใน รัศมีภายนอก และความหนาของชิ้นส่วน เป็นต้น</li> <li>- ข้อมูลรอยร้าว เช่น ความยาว และความลึก รอยร้าว ทิศทางการวางตัว และตำแหน่งของรอยร้าว เป็นต้น</li> <li>- ข้อมูลรอยเชื่อม เช่น ความกว้าง รอยเชื่อม รูปแบบการเชื่อม และตำแหน่งรอยเชื่อม เป็นต้น</li> </ul>  | - กำหนดพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว ความเค้นปฐมภูมิ ความเค้นทุติยภูมิ ความเค้นอ้างอิง และเก็บข้อมูลชิ้นส่วน คือ ข้อมูลรอยร้าว ขนาดชิ้นส่วน และข้อมูลรอยเชื่อม |
| TCharacterize Crack |   | - ระบุลักษณะรอยร้าว   |

ตารางที่ 5.1 สมบัติและพฤติกรรมของคลาส (ต่อ)

| คลาส         | สมบัติ   | พฤติกรรม  |
|--------------|--|---|
| TIntegrity   |  | - ประเมินการคงสภาพระดับ 1<br>2 และ 3 (ทางเลือก B) |
| TCrackGrowth | - จำนวนรอบภาระ ความยาว และ<br>ความถี่รอยร้าว และ สถานะการ<br>ใช้งานแต่ละรอบภาระ            | - ประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ                    |
| TLBB         | - จำนวนรอบภาระ ความยาว และ<br>ความถี่รอยร้าวขณะชิ้นส่วนร้าว<br>และสถานะการร้าวแต่ละรอบภาระ | - ประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก                     |

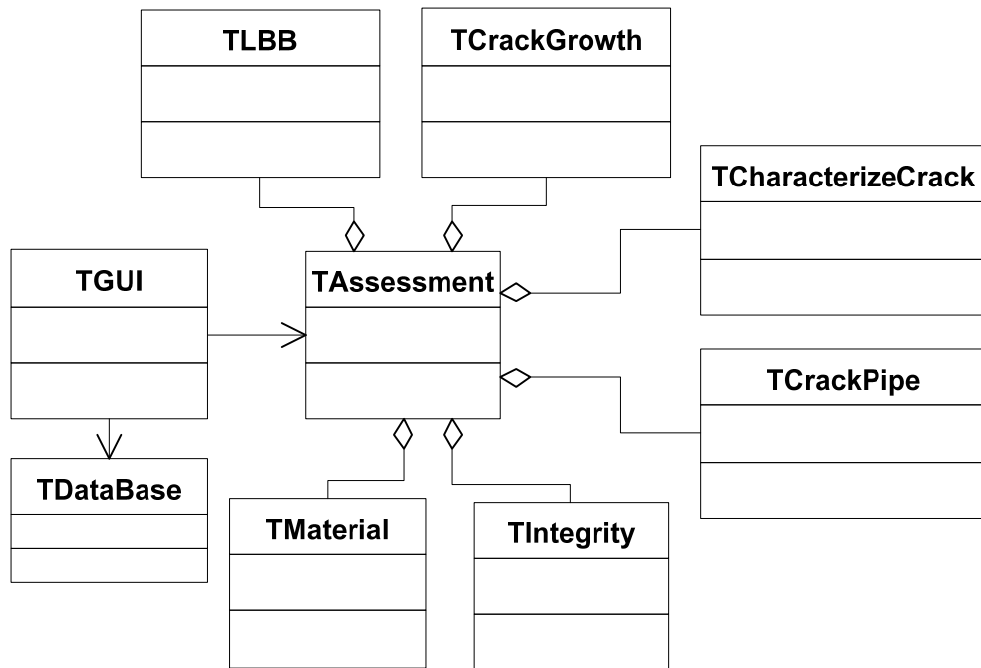
### 5.2.3 การออกแบบคลาสไดอะแกรม

เมื่อเข้าใจปัญหาเป็นอย่างดีและสร้างคลาสได้แล้ว ลำดับสุดท้าย คือการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคลาสในรูปของคลาสไดอะแกรม โดยการประยุกต์แบบแผน Player-Role สามารถสร้างคลาสไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งแบ่งการทำงานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มอินเตอร์เฟซ กลุ่มปฏิบัติการ และกลุ่มสั่งการ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

กลุ่มอินเตอร์เฟซ ทำหน้าที่รับค่าที่จำเป็นสำหรับการประเมิน สร้างวัตถุ เรียกใช้งานวัตถุ ทำลายวัตถุที่สร้างขึ้น และแสดงผลการประเมิน คือ คลาส TGUI ทั้งนี้ได้เพิ่มคลาส TDatabase เพื่อเก็บข้อมูลตัวอย่างวัสดุ

กลุ่มปฏิบัติการ ทำหน้าที่เฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น จัดการข้อมูลวัสดุ จัดการข้อมูลชิ้นส่วน และประเมินการคงสภาพ เป็นต้น ประกอบด้วยคลาส TMaterial, TCrackPipe, TCharacterizeCrack, TIntegrity, TCrackGrowth และ TLBB

กลุ่มสั่งการ ทำหน้าที่สร้างวัตถุจากคลาสในกลุ่มปฏิบัติการ จากนั้นจะเรียกใช้วัตถุเหล่านั้นตามขั้นตอนการประเมินที่กำหนดไว้ คือ คลาส TAssessment



รูปที่ 5.1 คลาสไดอะแกรมที่ออกแบบ

### 5.3 การปรับปรุงคลาสไดอะแกรม

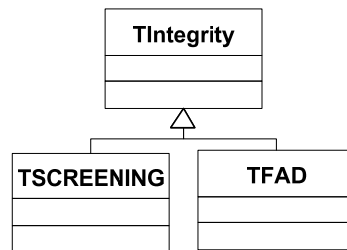
แม้ว่าโครงสร้างของโปรแกรมในดังรูปที่ 5.1 แบ่งการทำงานเป็นกลุ่มชัดเจน และสะดวกกับการพัฒนาโปรแกรม แต่ถ้ามีความเข้าใจปัญหา และขั้นตอนการประเมินเป็นอย่างดีจะเห็นว่า บางคลาสมีสมบัติ หรือพฤติกรรมมากเกินไป ทำให้โปรแกรมเมอร์อาจต้องเขียนโค้ด (Code) ซ้ำ โดยไม่จำเป็น และอาจลืมชื่อของสมบัติ หรือพฤติกรรมเมื่อต้องการเรียกใช้งานจากคลาสดังกล่าว เช่น คลาส TIntegrity ซึ่งมีหน้าที่ประเมินการคงสภาพ 3 ระดับ ดังนั้นโปรแกรมเมอร์ต้องเขียนโค้ดอย่างน้อย 3 ชุด ซึ่งมีลักษณะทั่วไปบางอย่างเหมือนกัน เพื่อการประเมินการคงสภาพในแต่ละระดับ เป็นต้น

ปัญหาดังกล่าวแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มความเฉพาะให้กับคลาส กล่าวคือ ใช้สมบัติการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุสืบทอดลักษณะทั่วไปที่เหมือนกันจากคลาสแม่ให้กับคลาสลูก และเพิ่มเติมลักษณะเฉพาะบางอย่างให้กับคลาสลูก การกระทำดังกล่าวจะสนับสนุนการนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ และส่งผลให้โปรแกรมมีความยืดหยุ่นมากขึ้น คลาสที่สามารถเพิ่มความเฉพาะคือ คลาส TIntegrity และคลาส TCrackPipe โดยมีรายละเอียดดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้



### 5.3.1 การปรับปรุงคลาส TIntegrity

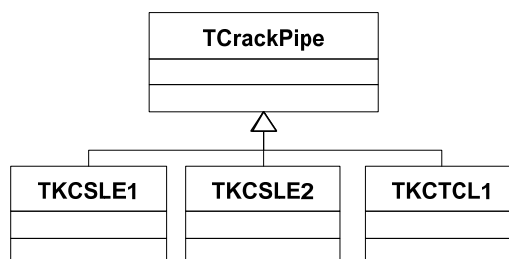
คลาส TIntegrity มีหน้าที่สำคัญคือ ประเมินการคงสภาพทั้ง 3 ระดับ โดยการประเมินสามารถแบ่งออกเป็นการประเมินที่ใช้แผนภาพความเสียหาย (ระดับ 2 และระดับ 3) และไม่ใช่แผนภาพความเสียหาย (ระดับ 1) รูปที่ 5.2 คลาส TIntegrity ถูกเพิ่มลักษณะเฉพาะโดยสืบทอดเป็นคลาส TSCREENING และคลาส TFAD สำหรับการประเมินที่ไม่ใช่ และใช้แผนภาพความเสียหาย ตามลำดับ กล่าวคือ คลาส TSCREENING มีหน้าที่ประเมินการคงสภาพระดับ 1 และคลาส TFAD มีหน้าที่ประเมินการคงสภาพระดับ 2 และระดับ 3 (ทางเลือก B)



รูปที่ 5.2 การปรับปรุงคลาส TIntegrity

### 5.3.2 การปรับปรุงคลาส TCrackPipe

คลาส TCrackPipe มีหน้าที่สำคัญคือเก็บข้อมูลชิ้นส่วน คือ ขนาดชิ้นส่วน ข้อมูลรอยร้าว ทั้งก่อนและหลังการระบุลักษณะรอยร้าว คำนวณความเค้นสำหรับภาระต่างๆ คำนวณความเค้นอ้างอิง และคำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวสำหรับลักษณะรอยร้าวที่สนใจ ด้วยเหตุนี้คลาส TCrackPipe จึงมีจำนวนสมบัติ และพฤติกรรมมากที่สุดเมื่อเทียบกับคลาสอื่น เช่น คลาส TLBB ซึ่งมีพฤติกรรมประเมินการรื้อก่อนการแตกหักเพียงอย่างเดียว เป็นต้น รูปที่ 5.3 คลาส TCrackPipe ถูกสืบทอดเป็นคลาส TKCSLE1 และคลาส TKCSLE2 สำหรับคำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวกรณีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อที่ผนังด้านใน และผนังด้านนอกท่อตามลำดับ และคลาส TKCTCL1 มีหน้าที่คำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวกรณีรอยร้าวทะลุผ่านความหนาขนานแกนท่อ

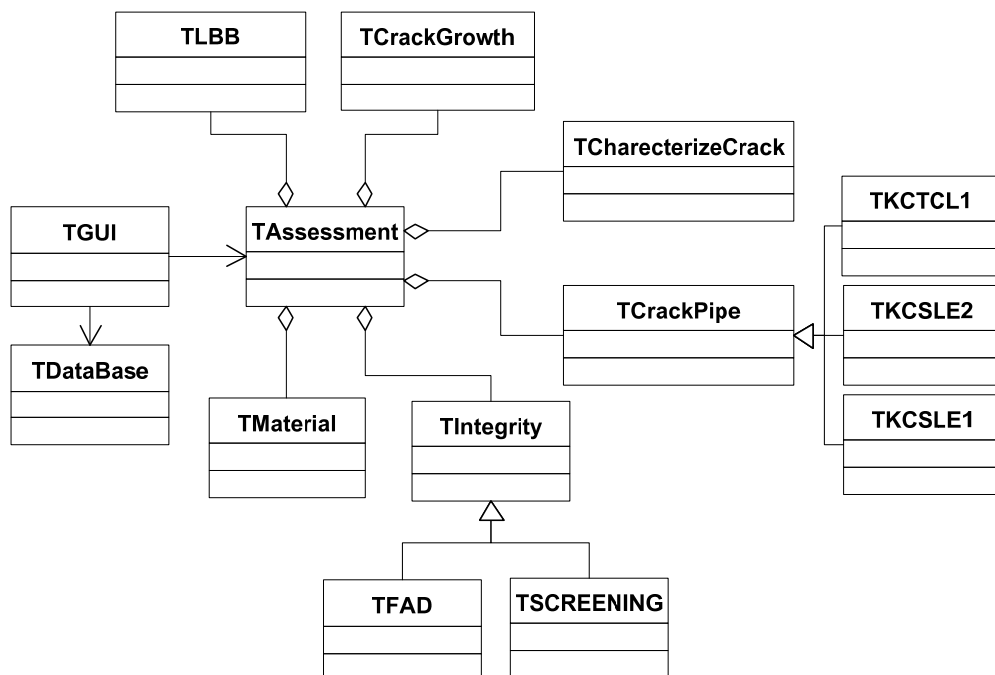


รูปที่ 5.3 การปรับปรุงคลาส TCrackPipe

คลาสไดอะแกรมในรูปที่ 5.1 หลังจากถูกปรับปรุงด้วยการทำให้คลาสมีหน้าที่เฉพาะ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

#### 5.4 การทำงานของโปรแกรม

การทำงานของโปรแกรมในรูปที่ 5.4 จะเริ่มจากผู้ประเมินเปิดโปรแกรม ระบุระดับการประเมิน และระบุข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการประเมิน ในขั้นตอนนี้คลาส TGUI จะถูกเรียกใช้งาน โดยคลาส TGUI จะส่งข้อมูล และคำสั่งทั้งหมดให้คลาส TAssessment เพื่อบริหารจัดการตาม ขั้นตอนการประเมินที่กำหนดไว้ กล่าวคือ คลาส TAssessment จะเรียกใช้งานคลาสกลุ่มปฏิบัติการเพื่อประเมินในรูปแบบต่างๆ จนได้ผลการประเมิน และส่งผลการประเมินกลับให้คลาส TGUI แสดงผลต่อไป ทั้งนี้หลังจากใช้งานคลาสต่างๆ เรียบร้อยแล้วคลาส TGUI จะทำลายวัตถุทุกตัวที่สร้างขึ้นระหว่างการประเมิน และจะสร้างใหม่เมื่อผู้ประเมินเริ่มประเมินใหม่อีกครั้ง ลักษณะการทำงานที่เป็นระบบเช่นนี้ จึงช่วยให้ไม่สิ้นเปลืองหน่วยความจำ รายละเอียดของการสื่อสารกันระหว่างคลาสสำหรับการประเมินการคงสภาพ การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ และการประเมินการรั่วก่อนการแตกหักจะอธิบายในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 5.4 คลาสไดอะแกรมหลังจากปรับปรุงด้วยแนวคิดเชิงวัตถุ

#### 5.4.1 การประเมินการคงสภาพ

รายละเอียดในการสื่อสารกันระหว่างคลาสเพื่อประเมินการคงสภาพของชิ้นส่วนแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การรับคำสั่งและข้อมูล ขั้นตอนนี้คลาส TGUI จะรับคำสั่ง หรือระดับการประเมิน และข้อมูลสำหรับการประเมิน จากนั้นจะส่งให้คลาส TAssessment บริหารจัดการตามขั้นตอนการประเมินที่มาตรฐานกำหนดไว้ ข้อมูลสำหรับการประเมินมีดังนี้

- ขอบเขตการประเมิน คือระบุว่าต้องการให้โปรแกรมประเมินระดับ 1 หรือ 2 หรือ 3 (ทางเลือก B) กรณีที่ประเมินสูงกว่าระดับ 1 ผู้ประเมินต้องระบุตัวประกอบความปลอดภัยให้โปรแกรมด้วย
- ข้อมูลวัสดุ ได้แก่ ชื่อวัสดุ ASME exemption curve ความแข็งแรงคราก ความแข็งแรงสูงสุด มอดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน และความต้านทานการแตกหัก
- ข้อมูลชิ้นส่วน ได้แก่ รัศมีภายในและภายนอก ความกว้างรอยเชื่อม แนวรอยเชื่อม และรูปแบบการเชื่อม
- ภาวะ ได้แก่ ภาวะเชิงความร้อนคือ อุณหภูมิ หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิ ตามแนวความหนาชิ้นส่วน ภาวะทางกลคือ ความดันภายใน หรือการกระจายตัวความเค้นตามแนวความหนาชิ้นส่วน
- ข้อมูลรอยร้าว ได้แก่ จำนวนรอยร้าว ชนิดรอยร้าว ตำแหน่งรอยร้าว แนวรอยร้าว ความยาวรอยร้าว ความลึกรอยร้าว มุมของรอยร้าวเทียบกับรัศมีและแกนท่อ และกรณีที่รอยร้าวมี 2 รอย ต้องระบุระยะระหว่างรอยร้าว

ขั้นตอนที่ 2 การจัดการข้อมูลวัสดุ คลาส TAssessment จะส่งข้อมูลวัสดุที่ให้คลาส TMaterial เพื่อเก็บเป็นสมบัติของคลาส TMaterial และเรียกใช้พฤติกรรมของคลาส TMaterial เพื่อคำนวณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการประเมินคือ อุณหภูมิอ้างอิง ความเค้นที่ยอมรับได้ และความต้านทานการแตกหักขอบเขตล่าง ผลจากการคำนวณจะถูกเก็บเป็นสมบัติของคลาส TMaterial คลาสอื่นสามารถเข้าถึงข้อมูลดังกล่าวได้โดยผ่านพฤติกรรมของคลาส TMaterial โดยคลาส TMaterial จะส่งข้อมูลให้คลาส TAssessment จากนั้นคลาส TAssessment จะส่งข้อมูลให้คลาส TGUI เพื่อแสดงผล หรือส่งให้คลาสอื่นใช้ในขั้นตอนการประเมินต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ความเค้น คลาส TAssessment จะส่งข้อมูลภาวะให้คลาส TCrackPipe เพื่อเก็บเป็นสมบัติของคลาส TCrackPipe และให้คลาส TCrackPipe หาผลเฉลยความเค้น ผลเฉลยของความเค้นอ้างอิง ความเค้นตกค้าง ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ และความเค้นเนื่องจากความดันภายใน ผลเฉลยที่ได้จะถูกเก็บเป็นสมบัติของคลาส TCrackPipe คลาสอื่นสามารถเข้าถึงข้อมูลดังกล่าวได้โดยผ่านพฤติกรรมของคลาส TCrackPipe โดยคลาส

TCrackPipe จะส่งข้อมูลให้คลาส TAssessment จากนั้นคลาส TAssessment จะส่งข้อมูลให้คลาส TGUI เพื่อแสดงผล หรือส่งให้คลาสอื่นใช้ในขั้นตอนการประเมินต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การระบุลักษณะรอยร้าว คลาส TAssessment จะส่งข้อมูลรอยร้าวให้คลาส TCrackPipe เก็บเป็นสมบัติของคลาส TCrackPipe และเรียกใช้พฤติกรรมของคลาส TCharacterizeCrack ให้ระบุลักษณะรอยร้าว ตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.3 จากนั้นคลาส TCharacterizeCrack จะส่งข้อมูลรอยร้าวที่ระบุแล้วให้คลาส TCrackPipe เก็บเป็นสมบัติต่อไป คลาสอื่นสามารถเข้าถึงข้อมูลดังกล่าวได้ผ่านพฤติกรรมของคลาส TCrackPipe โดยคลาส TCrackPipe จะส่งข้อมูลให้คลาส TAssessment จากนั้นคลาส TAssessment จะส่งข้อมูลให้คลาส TGUI เพื่อแสดงผล หรือส่งให้คลาสอื่นใช้ในขั้นตอนการประเมินต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 การหาผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว การสื่อสารแต่ละคลาสจะเหมือนกับกรณีการวิเคราะห์ความเค้น (ขั้นตอนที่ 3) ต่างกันเพียงพฤติกรรมที่ถูกเรียกใช้กรณีนี้จะเป็นพฤติกรรมสำหรับหาผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว โดยคลาส TAssessment จะเรียกใช้พฤติกรรมจากคลาส TKCSLE1 หรือคลาส TKCSLE2 หรือคลาส TKCTCL1 ขึ้นอยู่กับรูปร่างของรอยร้าว กล่าวคือ จะเรียกใช้คลาส TKCSLE1 และคลาส TKCSLE2 เมื่อเป็นรอยร้าวผิวครึ่งวงรีขนานแกนท่อที่ผนังด้านใน และผนังด้านนอก ตามลำดับ และจะเรียกใช้คลาส TKCTCL1 เมื่อเป็นรอยร้าวทะลุความหนาขนานแกนท่อ โปรแกรมจะคำนวณหาผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเมื่อประเมินระดับ 2 หรือระดับ 3 (ทางเลือก B)

ขั้นตอนที่ 6 การประเมินการคงสภาพ คลาส TAssessment บริหารจัดการตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น จากนั้นคลาส TAssessment จะเรียกใช้คลาส TIntegrity เพื่อประเมินการคงสภาพตามขั้นตอนในหัวข้อ 5.4 ทั้งนี้หากผู้ประเมินเลือกประเมินระดับ 1 พฤติกรรมในคลาส TSCREENING จะถูกเรียกใช้งาน แต่หากเลือกการประเมินระดับ 2 หรือ ระดับ 3 (ทางเลือก B) พฤติกรรมในคลาส TFAD จะถูกเรียกใช้งาน เมื่อได้ผลการประเมินคลาส TIntegrity จะคืนผลการประเมินให้คลาส TAssessment เพื่อส่งให้คลาส TGUI แสดงผลต่อไป

ขั้นตอนที่ 7 การแสดงผล ขั้นตอนนี้คลาส TAssessment จะส่งข้อมูล และผลการประเมินให้คลาส TGUI นำไปแสดงผลบนอินเตอร์เฟซในรูปของรายงานสรุปผลการประเมินและแผนภาพประเมินสำหรับการประเมินระดับ 1 หรือแผนภาพความเสียหายสำหรับการประเมินระดับ 2 และ ระดับ 3 (ทางเลือก B)

#### 5.4.2 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ

การประเมินอายุใช้งานที่เหลือจะวิเคราะห์การเติบโตของรอยร้าว และการคงสภาพของรอยร้าวไปพร้อมกัน ดังนั้นในการประเมินคลาสต่างๆ จะสื่อสารกันลักษณะเดียวกับการประเมินการคงสภาพ แต่ในขั้นตอนที่ 1 ข้อมูลสำหรับการประเมินจะเพิ่มขึ้นดังนี้

- ข้อมูลภาระล้าคือ ความดันภายในต่ำสุด และสูงสุดที่ชิ้นส่วนต้องรับ จำนวนรอบภาระ และจำนวนรอบภาระที่ทำซ้ำ
- ค่าคงที่สำหรับแบบจำลองของ Walker

และจะเพิ่มขั้นตอนการประเมินอายุใช้งานที่เหลือเข้าไปซึ่งมีรายละเอียดการสื่อสารดังนี้

ขั้นตอนการประเมินอายุใช้งานที่เหลือ คลาส TAssessment รับข้อมูลภาระล้าและค่าคงที่ในแบบจำลองของ Walker จากคลาส TGUI จากนั้นคลาส TAssessment จะเรียกคลาส TCrackGrowth ให้คำนวณความยาว และความถี่รอยร้าวที่เติบโตขึ้นในแต่ละรอบภาระ ข้อมูลที่ได้จะถูกเก็บเป็นสมบัติของคลาส TCrackGrowth และส่งกลับไปให้คลาส TAssessment เพื่อประเมินการคงสภาพตามขั้นตอนในหัวข้อ 5.4.1 ว่าชิ้นส่วนปลอดภัยหรือไม่ ผลการประเมินหรือสถานะการใช้งานของชิ้นส่วนในแต่ละรอบภาระจะถูกส่งกลับไปเก็บเป็นสมบัติของคลาส TCrackGrowth หากคลาสอื่นต้องการใช้ข้อมูลดังกล่าวสามารถเข้าถึงข้อมูลนี้ได้โดยผ่านพฤติกรรมของคลาส TCrackGrowth โดยคลาส TCrackGrowth จะส่งข้อมูลให้คลาส TAssessment เพื่อให้คลาส TGUI แสดงผล หรือส่งให้คลาสอื่นใช้ในขั้นตอนการประเมินต่อไป

#### 5.4.3 การประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก

การประเมินการรื้อก่อนการแตกจะวิเคราะห์การคงสภาพ การเติบโตของรอยร้าว และการรื้อไปพร้อม ๆ กัน ขั้นตอนในการประเมินการรื้อมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนการประเมินการรื้อ การทำงานของโปรแกรมจะเริ่มจากคลาส TCrackGrowth ส่งความยาว ความถี่รอยร้าวให้คลาส TAssessment จากนั้นคลาส TAssessment จะส่งข้อมูลดังกล่าวให้คลาส TLBB เพื่อวิเคราะห์การรื้อของชิ้นส่วนในแต่ละรอบภาระ กรณีที่ชิ้นส่วนรื้อ คลาส TAssessment จะเรียกใช้คลาส TIntegrity ให้ประเมินการคงสภาพซ้ำอีกครั้ง โดยจะเปลี่ยนชนิดของรอยร้าวเป็นรอยร้าวทะเลความหนาเพื่อวิเคราะห์ว่าชิ้นส่วนรื้อก่อนการแตกหักหรือไม่ ผลจากการวิเคราะห์จะเก็บเป็นสมบัติของคลาส TLBB หากคลาสอื่นต้องการใช้ข้อมูลดังกล่าวสามารถเข้าถึงข้อมูลนี้ได้โดยผ่านพฤติกรรมของคลาส TLBB โดยคลาส TLBB จะส่งข้อมูลให้คลาส TAssessment เพื่อให้คลาส TGUI แสดงผล หรือส่งให้คลาสอื่นใช้ในขั้นตอนการประเมินต่อไป

#### 5.5 การทำงานในแต่ละคลาส

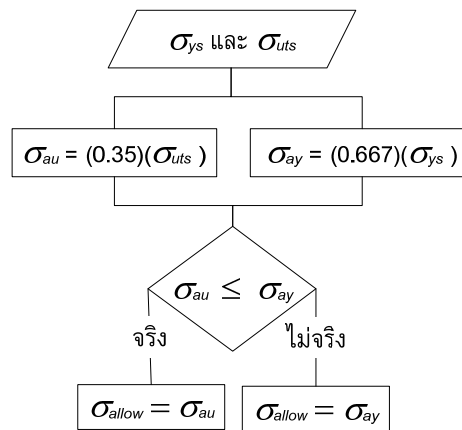
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำงานที่สำคัญ ๆ ของคลาสในโปรแกรม ซึ่งผู้ประเมินควรทราบเพื่อให้เข้าใจการทำงานของโปรแกรมมากขึ้น และนำผลการทำงานของโปรแกรมไปใช้ได้อย่างเข้าใจ ซึ่งประกอบด้วยการทำงานของคลาส TMaterial คลาส TCharacterizeCrack คลาส TCrackPipe คลาส TCrackGrowth และคลาส TLBB ดังนี้

### 5.5.1 คลาส TMaterial

ดังที่กล่าวในตอนต้นคลาส TMaterial ทำหน้าที่เก็บข้อมูลวัสดุ และคำนวณสมบัติวัสดุ คือ ความเค้นที่ยอมรับได้ อุณหภูมิอ้างอิง (จาก ASME Exemption curve) และความต้านทานการแตกหัก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.5.1.1 ความเค้นที่ยอมรับได้

ความเค้นที่ยอมรับได้  $\sigma_{allow}$  หมายถึง ความเค้นสูงสุดที่ชิ้นส่วนรับได้โดยไม่เสียหาย ซึ่งหาได้จากการเปรียบเทียบความเค้นที่ยอมรับได้จากความแข็งแรงคราก  $\sigma_{ay}$  และความเค้นที่ยอมรับได้จากความแข็งแรงสูงสุด  $\sigma_{au}$  [31] ดังรูปที่ 5.5 ค่าไหนน้อยกว่าจะเลือกใช้ค่านั้นเป็น  $\sigma_{allow}$



รูปที่ 5.5 การคำนวณความเค้นที่ยอมรับได้

#### 5.5.1.2 อุณหภูมิอ้างอิง

อุณหภูมิอ้างอิงหาได้ 2 วิธี คือ 1) หาจากอุณหภูมิ  $RT_{NDT}$  [25] และ 2) ใช้ข้อมูลความแข็งแรงครากต่ำสุดและ ASME Exemption curve เพื่อนำไปอ่านค่าจากตารางที่ 9.2 ในมาตรฐาน

#### 5.5.1.3 ความต้านทานการแตกหัก

ความต้านทานการแตกหักเป็นสมบัติวัสดุที่มีผลต่อความเสียหายจากการแตกหักของวัสดุ ซึ่งจะถูกใช้สำหรับการประเมินการคงสภาพระดับ 2 หรือระดับ 3 (ทางเลือก B) โปรแกรมจะรับค่าความต้านทานการแตกหักซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ ความต้านทานการแตกหักค่าขอบเขตล่าง (Lower-bound fracture toughness)  $K_{IC}$  และความต้านทานการแตกหักค่ากลาง (Mean fracture toughness)  $K_{mean}$

สำหรับ  $K_{IC}$  โปรแกรมรองรับการป้อนข้อมูลได้ 2 รูปแบบคือ

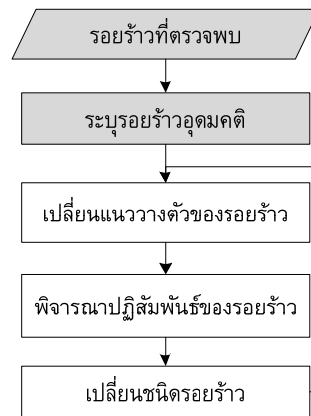
- ประมาณค่าจากอุณหภูมิอ้างอิง  $T_{ref}$  หรืออุณหภูมิ  $RT_{NDT}$  ด้วยสมการ ASME lower-bound curve (สมการ (ข.1))
- ประมาณค่าจากพลังงาน Charpy V-notch สำหรับช่วง transition regions ด้วยสมการของ WRC 265 [14] (สมการที่ (ข.2)) และสำหรับช่วง สำหรับ Upper Shelf ด้วยสมการของ Barsom [14] (สมการที่ (ข.3))

สำหรับ  $K_{mean}$  โปรแกรมรองรับการป้อนข้อมูลได้ 4 รูปแบบคือ

- ป้อนสมบัติความต้านทานการแตกหักของวัสดุ ซึ่งได้จากการทดลอง หรือ ผู้ผลิตโดยตรง เป็นต้น
- ป้อนอุณหภูมิอ้างอิงสำหรับวิธี master curve (reference temperature,  $T_0$ ) [25] ซึ่งจะถูกระบุค่าเป็น  $K_{mean}$  ด้วยสมการ (ข.4)
- ป้อนพารามิเตอร์  $J$  วิกฤติ ซึ่งจะถูกระบุค่าเป็น  $K_{mean}$  ด้วยสมการ (ข.5)
- ป้อนระยะเปิดที่ปลายรอยร้าว (Crack Tip Opening Displacement, CTOD) วิกฤติ ซึ่งจะถูกระบุค่าเป็น  $K_{mean}$  ด้วยสมการ (ข.6)

### 5.5.2 คลาส TCharacterizeCrack

รูปที่ 5.6 ขั้นตอนการระบุลักษณะรอยร้าวในคลาส TCharacterizeCrack ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน เริ่มจากเปลี่ยนแนววางตัวของรอยร้าวในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะคำนวณหาอัตราส่วนความเค้นหลัก (Biaxial ratio) (สมการ (ข.1)) ซึ่งคิดจากความเค้นปฐมภูมิเพียงอย่างเดียว (เนื่องจากมาตรฐานไม่ได้ระบุไว้อย่างชัดเจน) ถัดจากนั้นกรณีที่ชิ้นส่วนมีรอยร้าวมากกว่า 1 รอย โปรแกรมจะพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าวเพื่อปรับให้เหลือรอยร้าวเดียวตามคำแนะนำในตารางที่ ข.3 ขั้นตอนสุดท้ายคือ การเปลี่ยนชนิดรอยร้าว กรณีรอยร้าวที่สนใจเป็นรอยร้าวผิวหรือรอยร้าวฝังหากตรงตามเกณฑ์ในตารางที่ ข.4 โปรแกรมจะเปลี่ยนชนิดรอยร้าว จากนั้นนำรอยร้าวใหม่ที่ได้ไประบุลักษณะรอยร้าวซ้ำอีกครั้งโดยเริ่มจากการเปลี่ยนแนววางตัวของรอยร้าว สำหรับขั้นตอนการระบุรอยร้าวอุดมคติหลังจากตรวจพบรอยร้าวถือว่าเป็นหน้าที่ของผู้ประเมินในการระบุขนาดรอยร้าวให้กับโปรแกรมจึงถูกทำให้เป็นสีเทาไว้



รูปที่ 5.6 การทำงานของคลาส TCharacterizeCrack

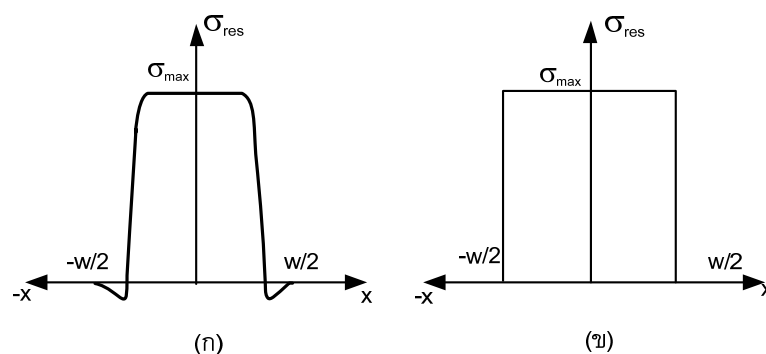
### 5.5.3 คลาส TCrackPipe

การคำนวณที่สำคัญในคลาส TCrackPipe มี 3 ส่วน คือ การคำนวณความเค้นตกค้าง ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ และพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.5.3.1 ความเค้นตกค้าง

สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาความเค้นตกค้างเป็นค่าคงที่ตลอดความกว้างรอยเชื่อม กล่าวคือ รอยร้าวอยู่บนรอยเชื่อมความเค้นตกค้างจะมีค่าเท่ากับค่ามากที่สุดเทียบกับทุกค่าบน การกระจายความเค้นตกค้าง

รูปที่ 5.7 แกนนอนคือระยะบนรอยเชื่อม  $x$  วัดเทียบกับกึ่งกลางรอยเชื่อม แกนตั้งคือ ความเค้นตกค้าง  $\sigma_{res}$  ในการเขียนโค้ดโปรแกรมจะคำนวณหาการกระจายของความเค้นตกค้าง ตลอดความกว้างรอยเชื่อม  $w$  (รูปที่ 5.7(ก)) จากนั้นจึงหาความเค้นตกค้างมากที่สุด  $\sigma_{max}$  ซึ่ง แบ่งเป็น 2 กรณีคือ 1) รอยเชื่อมผ่าน PWHT จะคำนวณ  $\sigma_{max}$  จากสมการ (ฉ.8) หรือ (ฉ.11) และ 2) รอยเชื่อมไม่ผ่าน PWHT จะคำนวณ  $\sigma_{max}$  จากสมการ (ฉ.2) หรือ (ฉ.3) จากนั้น กำหนดให้ความเค้นตกค้างตลอดระยะ  $w$  มีค่าคงที่เท่ากับ  $\sigma_{max}$  (รูปที่ 5.7(ข))



รูปที่ 5.7 การแทนที่โปรไฟล์การกระจายความเค้นตกค้างด้วยโปรไฟล์อย่างง่าย



### 5.5.3.2 ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ

ผลเฉลยความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิตั้งสมการ (ก.6) เป็นฟังก์ชันอินทิเกรต จึงต้องใช้วิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณแทนการหาผลเฉลยแม่นยำตรง สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้กฎของซิมป์สัน [32] เพราะคำนวณง่ายและเที่ยงตรง ตัวอย่างการหาผลเฉลยโดยประมาณสำหรับความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิตามเส้นรอบวงดังนี้

จากสมการ (ก.6)

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha E_y}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \left( \frac{r^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \int_{R_i}^{R_o} T r dr + \int_{R_i}^r T r dr + T r^2 \right) \quad (5.1)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน  $E_y$  คือ มอดูลัสความยืดหยุ่น  $\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง  $R_i$  และ  $R_o$  คือ รัศมีภายใน และภายนอกชิ้นส่วน  $T$  คือ อุณหภูมิซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะจากตำแหน่งศูนย์กลางชิ้นส่วน  $r$

จากสมการ (5.1) จะเห็นว่าผลเฉลยของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิตามเส้นรอบวงขึ้นอยู่กับระยะ  $r$  เพียงอย่างเดียว (สมบัติวัสดุมีค่าคงที่) จึงเขียนสมการได้ใหม่ตั้งสมการ (5.2)

$$\sigma_{\theta} = f_1(r) (f_2(r) F_1(r) + F_2(r) + f_3(r)) \quad (5.2)$$

เมื่อ  $f_1(r)$ ,  $f_2(r)$ ,  $F_1(r)$ ,  $F_2(r)$  และ  $f_3(r)$  มีค่าตั้งสมการ (5.3), (5.4), (5.5), (5.6) และ (5.7) ตามลำดับ

$$f_1(r) = \frac{\alpha E_y}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \quad (5.3)$$

$$f_2(r) = \frac{r^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (5.4)$$

$$F_1(r) = \int_{R_i}^{R_o} T r dr \quad (5.5)$$

$$F_2(r) = \int_{R_i}^r T r dr \quad (5.6)$$

$$f_3(r) = T r^2 \quad (5.7)$$

หลังจากเขียนสมการให้อยู่ในรูปของการบวก และการคูณของฟังก์ชันย่อยๆ ตั้งสมการ (5.2) แล้ว จะเห็นว่าความยุ่งยากในการหาผลเฉลยลดน้อยลง กล่าวคือ หากสามารถหาค่าของฟังก์ชันย่อยๆ ที่ระยะ  $r$  ต่างๆ ได้ จะสามารถหาผลเฉลยความเค้นของปัญหาได้ แต่การหาผลเฉลยของฟังก์ชันย่อยในสมการ (5.5) และ (5.6) ซึ่งอยู่ในรูปฟังก์ชันอินทิเกรตไม่สามารถเขียนโปรแกรม

เพื่อหาผลเฉลยโดยตรงจำเป็นต้องใช้วิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหา ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

จากสมการ (5.5) การหาผลเฉลยของฟังก์ชันคือ การหาพื้นที่ใต้กราฟ  $Tr$  ตั้งแต่ระยะ  $r$  เท่ากับ  $R_i$  ถึง  $R_o$  ซึ่งคำนวณโดยใช้กฎของซิมป์สันจะได้ตั้งสมการ (5.8) เมื่อกำหนดให้  $n$  แทนจำนวนช่วงย่อยในการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยแต่ละช่วงย่อยมีความกว้าง  $h$  เท่ากันทุกช่วงย่อยตั้งสมการ (5.9)

$$F_1 = \frac{h}{3} \left( f(x_0) + 4 \sum_{j=2,4,6}^n f(x_j) + 2 \sum_{j=1,3,5}^{n-1} f(x_j) + f(x_n) \right) \quad (5.8)$$

$$h = \frac{R_o - R_i}{n} \quad (5.9)$$

สำหรับการหาค่าโดยประมาณของสมการ (5.6) หาได้ด้วยวิธีเดียวกันโดยเปลี่ยนขนาดความกว้าง  $h$  ใหม่ตั้งสมการ (5.10)

$$h = \frac{r - R_i}{n} \quad (5.10)$$

### 5.5.3.3 พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว

การหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวสามารถหาได้หลายวิธีตั้งรายละเอียดในหัวข้อ 2.2 และภาคผนวก ค งานวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนักในการหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเพราะยอมรับการกระจายความเค้นทุกรูปแบบบนผิวหน้ารอยร้าวได้ เนื่องจากรอยร้าวที่สนใจเป็นรอยร้าวรูปครึ่งวงรี โปรแกรมจึงหาผลเฉลย 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งผิวรอยร้าว และตำแหน่งลึกที่สุด ผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวหาได้จากสมการ (2.5) ซึ่งต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาแทนการหาผลเฉลยแม่นยำ ซึ่งมีลำดับการคำนวณดังนี้

จากสมการ (2.5)

$$K_I = \int_0^a \sigma_{yy}(x) m_I(x, a) dx \quad (5.11)$$

เมื่อ  $\sigma_{yy}(x)$  คือ ฟังก์ชันความเค้นที่กระทำบนผิวรอยร้าว  $m_I(x, a)$  คือ ฟังก์ชันน้ำหนักของรอยร้าวหาได้จากสมการ (ค.23) และ (ค.28) สำหรับตำแหน่งลึกที่สุด และตำแหน่งผิวรอยร้าว  $a$  คือ ความลึกรอยร้าว

จากสมการ (5.11) จะเห็นว่าผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวที่ขึ้นอยู่กับระยะ  $x$  เพียงอย่างเดียวจึงเขียนสมการ (5.12) ใหม่ได้ดังสมการ

$$K_I = \int_0^a f(x) dx \quad (5.12)$$

สมการ (5.12) ผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวคือพื้นที่ใต้กราฟ  $f(x)$  ตั้งแต่ระยะ  $x$  เท่ากับ ศูนย์ถึง  $x$  เท่ากับความลึกรอยร้าว  $a$  ซึ่งคำนวณโดยใช้กฎของซิมป์สันจะได้ดังสมการ (5.13) เมื่อกำหนดให้  $n$  แทนจำนวนช่วงย่อยในการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยแต่ละช่วงย่อยมีความ กว้าง  $h$  เท่ากันทุกช่วงย่อย

$$K_I = \frac{h}{3} \left( f(x_0) + 4 \sum_{j=2,4,6}^n f(x_j) + 2 \sum_{j=1,3,5}^{n-1} f(x_j) + f(x_n) \right) \quad (5.13)$$

$$h = \frac{a}{n} \quad (5.14)$$

#### 5.5.4 คลาส TCrackGrowth

เนื่องจากแบบจำลองการทำนายอายุรอยร้าวล้าเป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับหนึ่ง (First-order linear ordinary differential equation) ภายใต้ภาระล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่อัตราการ เติบโตของรอยร้าวล้า  $da/dN$  จะขึ้นอยู่กับความยาวรอยร้าว  $a$  เพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถ แก้สมการด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการหาค่าสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ สำหรับงานวิจัย นี้เลือกใช้ระเบียบวิธีของออยเลอร์ [32] เนื่องจากมีใช้งานง่ายและให้ความเที่ยงตรง ซึ่งมีลำดับ ขั้นตอนการคำนวณดังนี้

จากรูปทั่วไปของสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ที่ขึ้นอยู่กับ  $a$  เพียงอย่างเดียว

$$\frac{da}{dN} = f(a) \quad (5.15)$$

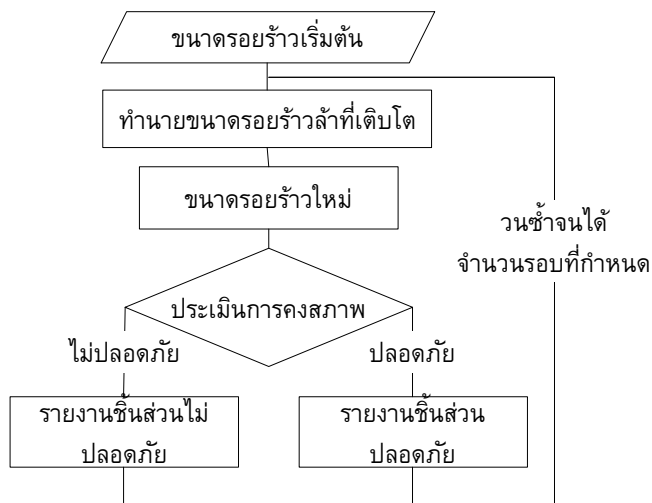
ด้วยระเบียบวิธีของออยเลอร์ ความยาวรอยร้าวสำหรับการทำซ้ำครั้งที่  $j$  หรือ  $a_{j+1}$  เมื่อ จำนวนรอบภาระ  $\Delta N$  คือ

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = f(a) \quad (5.16)$$

$$a_{j+1} = a_j + \Delta N \cdot f(a_j) \quad (5.17)$$

เมื่อ  $\Delta N$  คือ จำนวนรอบภาระ (มีค่าตั้งแต่ 1 ขึ้นไป)

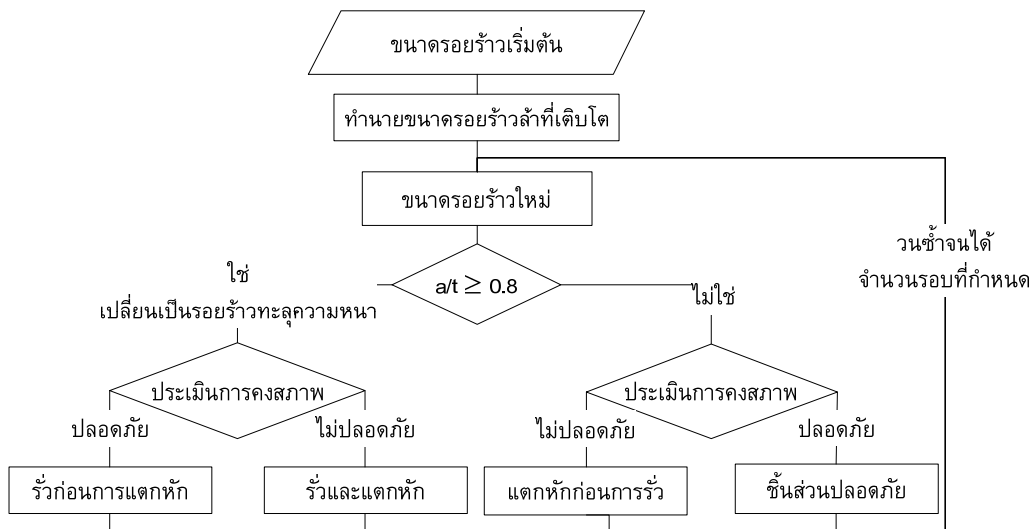
สำหรับการวิเคราะห์ว่าโครงสร้างสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัยหรือไม่เมื่อรอยร้าวโตขึ้นมีขั้นตอนการทำงานแต่ละรอบแสดงดังรูปที่ 5.8 การทำงานเริ่มจากผู้ประเมินกำหนดจำนวนรอบภาระทั้งหมด และขนาดรอยร้าวเริ่มต้นจากนั้นโปรแกรมจะทำนายอายุรอยร้าวลำตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขข้างต้น เมื่อได้ขนาดรอยร้าวใหม่ในแต่ละรอบภาระโปรแกรมจะนำขนาดรอยร้าวใหม่ไปประเมินการคงสภาพซึ่งทำให้ทราบว่าสถานะของชิ้นส่วนเป็นอย่างไรในแต่ละรอบภาระ โปรแกรมจะทำงานเช่นนี้จนครบรอบภาระทั้งหมดที่กำหนดไว้ ผลจากการทำงานของโปรแกรมจะทำให้ทราบว่าในแต่ละรอบภาระชิ้นส่วนมีขนาดรอยร้าวเป็นเท่าไร และสถานะการใช้งานเป็นอย่างไร เมื่อโปรแกรมทำงานครบตามจำนวนรอบภาระที่กำหนด ผู้ประเมินจะทราบว่าชิ้นส่วนเสียหายเมื่อถูกใช้งานไปแล้วกี่รอบ และขนาดรอยร้าวในแต่ละรอบภาระ



รูปที่ 5.8 ขั้นตอนการทำนายอายุที่เหลือของรอยร้าว

### 5.5.5 คลาส TLBB

การวิเคราะห์การร้าวก่อนการแตกหักโปรแกรมจะมีความทำงานเหมือนกับการทำนายอายุรอยร้าวลำ (หัวข้อ 5.5.4) แต่คลาส TLBB จะตรวจสอบว่าชิ้นส่วนร้าวหรือไม่ รูปที่ 5.9 หลังจากได้ขนาดรอยร้าวใหม่ในแต่ละรอบภาระ โปรแกรมจะเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความลึกของรอยร้าว  $a$  กับความหนาต่อ  $t$  หากมากกว่าหรือเท่ากับ 0.8 จะถือว่าชิ้นส่วนร้าว แต่หากน้อยกว่าจะถือว่าชิ้นส่วนไม่ร้าว จากนั้นจึงประเมินการคงสภาพในขั้นตอนถัดไป การทำงานแต่ละรอบจะได้สถานะใช้งานของชิ้นส่วนคือ ชิ้นส่วนร้าวและแตกหัก หรือร้าวก่อนการแตกหัก หรือแตกหักก่อนร้าว หรือชิ้นส่วนปลอดภัย และเมื่อโปรแกรมทำงานครบตามจำนวนรอบภาระทั้งหมดผู้ประเมินจะทราบว่าสถานะการร้าวของชิ้นงานเป็นอย่างไร และชิ้นส่วนเริ่มร้าวเมื่อถูกใช้งานไปแล้วกี่รอบ



รูปที่ 5.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์การรื้อก่อนการแตกหัก

## 5.6 อินเทอร์เฟซของโปรแกรม

เมื่อออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายคือ การออกแบบอินเทอร์เฟซด้วยโปรแกรม Delphi 7 [33] เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงานจะแสดงอินเทอร์เฟซ ดังรูปที่ 5.10 คือ เมนูหลัก (Menu Bar) แถบสถานะ (Status Bar) พื้นที่ทำงาน และภาพประกอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

แถบเมนู ประกอบด้วยคำสั่งพื้นฐานที่ใช้ในการจัดการไฟล์ และการออกจากโปรแกรม ได้แก่ คำสั่ง File และคำสั่ง Help โดยคำสั่ง File ประกอบด้วยคำสั่งย่อยคือ คำสั่ง Print และคำสั่ง Exit ซึ่งใช้พิมพ์รายงานสรุปการประเมิน และออกจากโปรแกรม ตามลำดับ คำสั่ง Help ประกอบด้วยคำสั่งย่อยคือ คำสั่ง Help และคำสั่ง About ซึ่งมีคำแนะนำการใช้งานโปรแกรม และข้อมูลเกี่ยวกับโปรแกรม ตามลำดับ

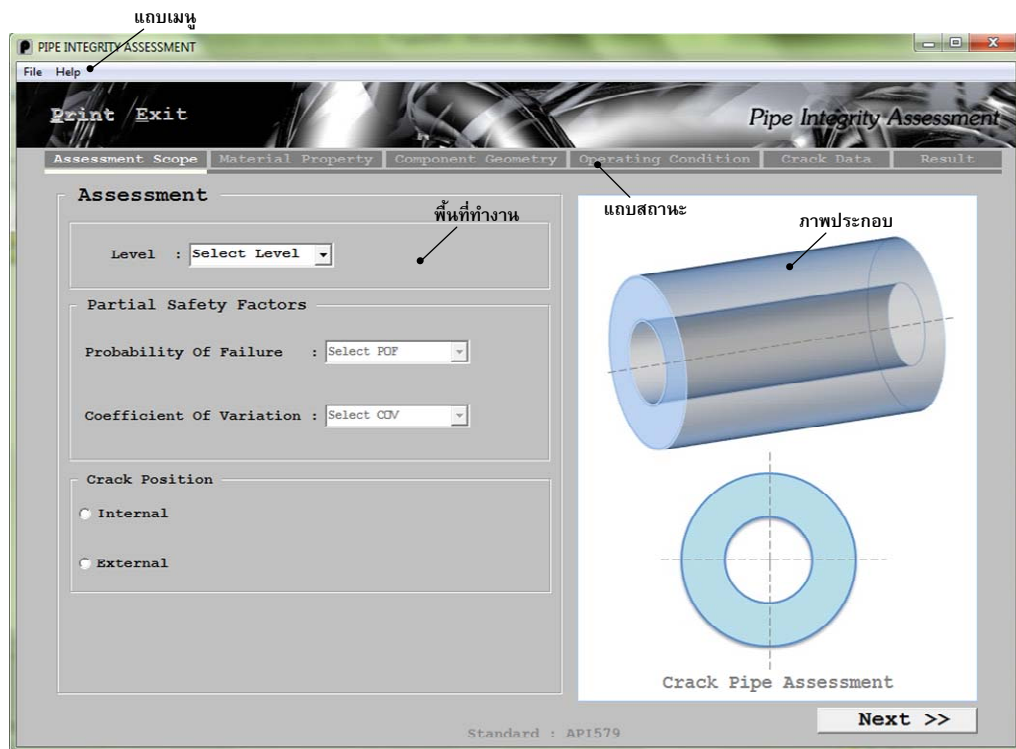
แถบสถานะ ใช้แสดงสถานะการประเมินแต่ละขั้นตอนซึ่งประกอบด้วย ขอบเขตการประเมิน สมบัติวัสดุ ขนาดชิ้นส่วน ภาระใช้งาน ข้อมูลรอยร้าว และผลการประเมิน ตามลำดับ ทั้งนี้หากเลือกประเมินการคงสภาพระดับ 2 หรือระดับ 3 (ทางเลือก B) จะมีแถบประเมินอายุการใช้งาน และการรื้อก่อนการแตกหัก เพิ่มขึ้นหลังจากแสดงผลการประเมินการคงสภาพเรียบร้อยแล้ว

พื้นที่ทำงาน เป็นบริเวณที่ให้ผู้ประเมินป้อนข้อมูล และเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมิน เช่น สมบัติวัสดุ ขนาดรอยร้าว และภาระใช้งาน เป็นต้น รายละเอียดในพื้นที่จะเปลี่ยนไปตามแถบสถานะ เช่น หากแถบสถานะคือ ขอบเขตประเมินดังรูปที่ 5.10 พื้นที่ทำงานจะประกอบด้วยตัวเลือกระดับการประเมิน และการเลือกตัวประกอบความปลอดภัย เป็นต้น

ภาพประกอบ เป็นบริเวณที่แสดงภาพประกอบการประเมินซึ่งช่วยให้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น โดยภาพประกอบการประเมินจะเปลี่ยนไปตามแถบ

สถานะ เช่น หากแถบสถานะคือ ขอบเขตประเมินดังรูปที่ 5.10 แล้วภาพประกอบจะเป็นรูปท่อ เป็นต้น

ในการใช้งานผู้ประเมินต้องป้อนข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตเฟสให้ถูกต้อง และครบถ้วน โปรแกรมจึงสามารถประมวลผล และแสดงผลการประเมินที่น่าเชื่อถือให้แก่ผู้ประเมินได้ อินเทอร์เน็ตสำหรับรับข้อมูลหรือแสดงผลการประเมินมีทั้งหมด 7 หน้าต่าง เรียงตามที่ปรากฏในแถบสถานะ ดังนี้ ขอบเขตประเมิน ระบุสมบัติวัสดุ ขนาดชิ้นส่วน ภาระใช้งาน ข้อมูลรอยร้าว ผลการประเมิน และการประเมินอายุแล้วและการรื้อก่อนการแตกหัก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

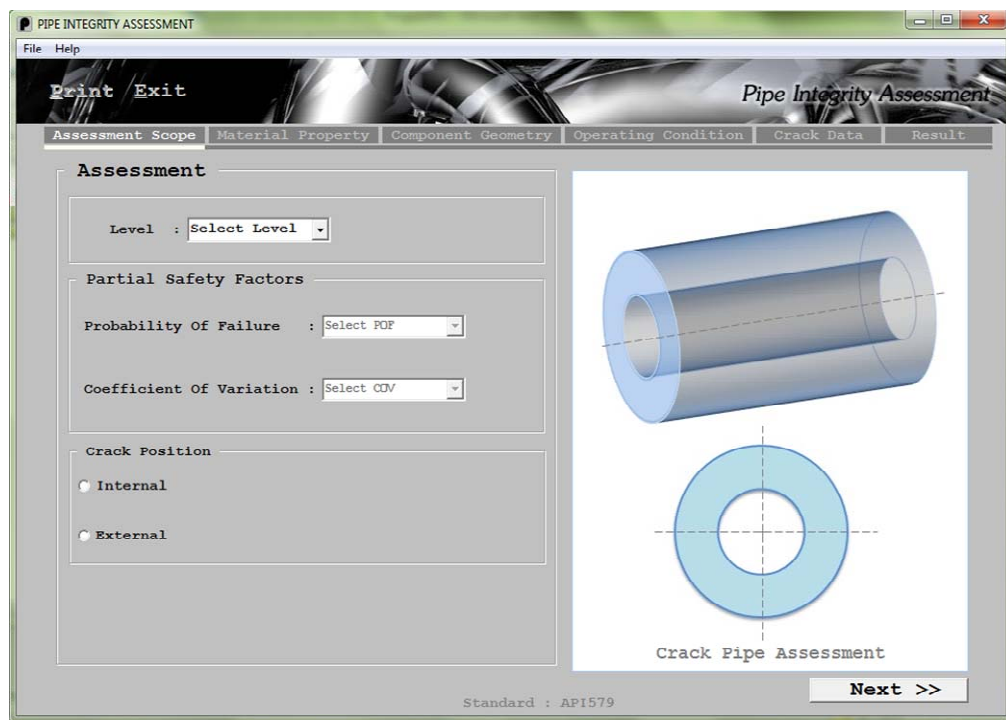


รูปที่ 5.10 ส่วนประกอบของอินเทอร์เน็ตเฟส

### 5.6.1 ขอบเขตประเมิน

หน้าต่างนี้ใช้ระบุขอบเขตการประเมิน (รูปที่ 5.11) ซึ่งประกอบด้วย ระดับการประเมิน การคงสภาพ ตัวประกอบความปลอดภัย และตำแหน่งรอยร้าว

ระดับการประเมินการคงสภาพ สามารถเลือกได้ 3 ระดับ คือ ระดับ 1 หรือระดับ 2 หรือระดับ 3 (ทางเลือก B) การประเมินระดับที่สูงขึ้นจะได้ผลการประเมินที่แม่นยำมากขึ้น แต่ผู้ประเมินจำเป็นต้องป้อนข้อมูลมากขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งความถูกต้องของข้อมูลป้อนเข้าควรเพิ่มขึ้นเมื่อผู้ประเมินเลือกระดับที่สูงขึ้น ตัวประกอบความปลอดภัยจะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นที่ชิ้นส่วนจะเสียหาย (Probability of failure) ซึ่งเลือกได้ 3 ค่า คือ  $2.3E-2$ ,  $1.0E-3$  และ  $1.0E-6$  และสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient Of Variation, *COV*) สามารถเลือกได้ 3 ค่า คือ 0.1, 0.2 และ 0.3 ตัวประกอบความปลอดภัยจะเพิ่มขึ้นเมื่อความน่าจะเป็นที่ชิ้นส่วนเสียหายลดลง หรือสัมประสิทธิ์ความแปรผันของข้อมูลมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้ผู้ประเมินจะระบุความน่าจะเป็นที่ชิ้นส่วนจะเสียหาย และสัมประสิทธิ์ความแปรผันได้เมื่อประเมินระดับ 2 หรือระดับ 3 (ทางเลือก B) ตำแหน่งรอยร้าว เลือกได้ 2 ตำแหน่ง คือผนังด้านใน และผนังด้านนอกของท่อ



รูปที่ 5.11 อินเทอร์เฟซขอบเขตประเมิน

### 5.6.2 ระบุสมบัติวัสดุ

หน้าต่างนี้ใช้ระบุสมบัติวัสดุ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) สมบัติแรงดึง (Tensile property) และ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-strain relation) โดยมีชื่อวัสดุ และ ASME Exemption curve เป็นข้อมูลพื้นฐานที่ผู้ประเมินต้องระบุเสมอ

สมบัติแรงดึง รูปที่ 5.12 ประกอบด้วย มอดูลัสความยืดหยุ่น (Young modulus) ความแข็งแรงคราก (Yield strength) ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength) อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (Thermal expansion coefficient) และ FAD cut-off สำหรับ FAD Cut-Off สามารถเลือกได้ 4 ค่า คือ 1.0, 1.25, 1.80 และอื่นๆ (Other) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุ (หัวข้อ 3.4.2) และระบุได้เมื่อประเมินการคงสภาพระดับ 2 หรือระดับ 3 (ทางเลือก B) เท่านั้น หน่วยในการระบุเป็นหน่วย SI

The screenshot shows the 'PIPE INTEGRITY ASSESSMENT' software window. The 'Material Property' tab is selected, showing input fields for material data. The 'Name' field is set to 'CMEDataBase' and the 'Exemption Curve' is set to 'Select ASME Exemption'. Below these are tabs for 'Tensile', 'Fracture Toughness', and 'Stress-Strain Relation'. The 'Tensile' tab is active, displaying the following fields:

- Allowable stress at pressure test (MPa) : [ ]
- Yield Strength (MPa) : [ ]
- Ultimate Strength (MPa) : [ ]
- Young Modulus (GPa) : [ ]
- Poisson's Ratio : [ ]
- Thermal Expansion (E-6, 1/°C) : [ ]
- FAD Cut-off, Lr (max) : Lr (max) [ ]

At the bottom, the standard is listed as 'Standard : API579' and there are 'Previous' and 'Next >>' navigation buttons.

รูปที่ 5.12 อินเทอร์เฟซสมบัติวัสดุ แถบย่อยสมบัติแรงดึง

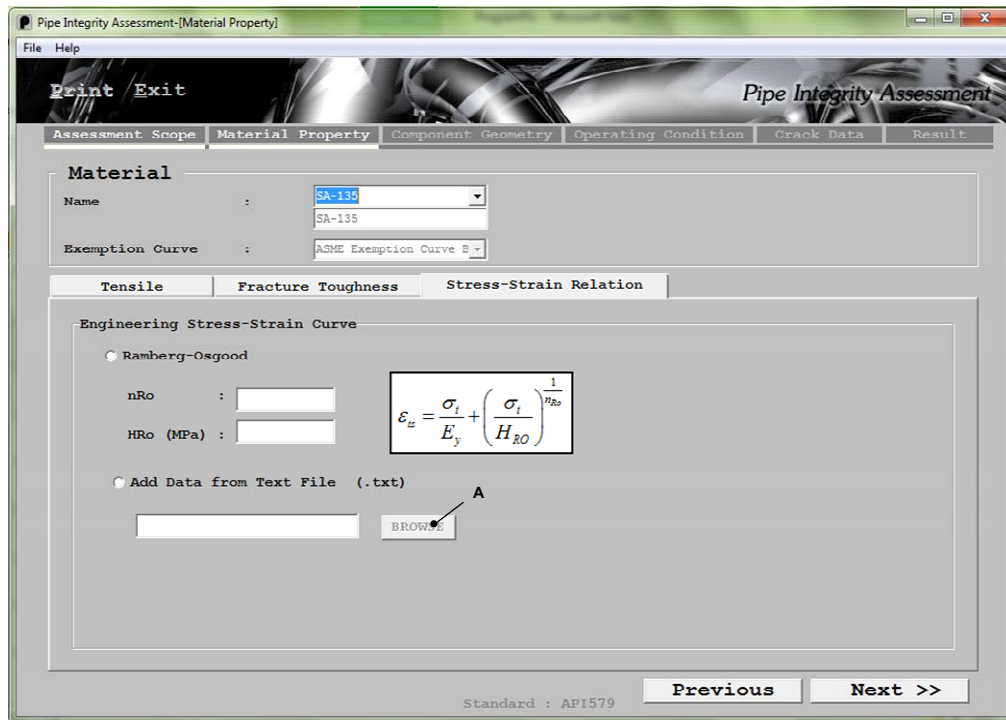


ความต้านทานการแตกหัก รูปที่ 5.13 กรณีที่ประเมินระดับ 2 หรือระดับ 3 (ทางเลือก B) ผู้ประเมินต้องระบุความต้านทานการแตกหัก ซึ่งเลือกระบุได้ 2 รูปแบบคือ 1) ความต้านทานการแตกหักค่ากลาง ซึ่งผู้ประเมินสามารถเลือกระบุได้ 4 รูปแบบ คือความต้านทานการแตกหักของชิ้นส่วน ระยะเปิดที่ปากรอยร้าววิกฤติ พารามิเตอร์  $J$  วิกฤติ และอุณหภูมิอ้างอิงสำหรับวิธี master curve และ 2) ความต้านทานการแตกหักขอบเขตล่าง ซึ่งผู้ประเมินสามารถเลือกระบุได้ 3 รูปแบบ คือการประมาณค่าจาก ASME Exemption Curve การประมาณค่าจากอุณหภูมิ  $RT_{NDT}$  และการประมาณค่าจากพลังงาน Charpy V-notch กรณีผู้ประเมินเลือกใช้ค่าความต้านทานการแตกหักขอบเขตล่างผู้ประเมินต้องเลือกค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับปรับค่าขอบเขตล่างเป็นค่ากลาง (Standard deviation from mean) สามารถเลือกได้ 4 ค่าคือ 0, 1, 2 และ 3 โดยความต้านทานการแตกหักค่ากลางที่ประมาณมาจากความต้านทานการแตกหักขอบเขตล่างจะมีค่ามากขึ้นเมื่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยลง หน่วยในการระบุเป็นหน่วย SI

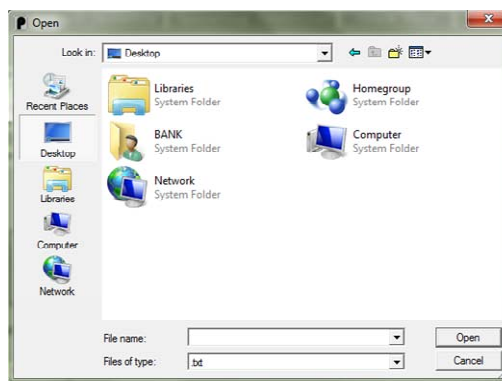
The screenshot shows the 'PIPE INTEGRITY ASSESSMENT' software window. The 'Material' section is active, with 'Name' set to 'CMRDataBase' and 'Exemption Curve' set to 'Select ASME Exemption'. The 'Fracture Toughness' tab is selected, showing two main sections: 'Mean Fracture Toughness' and 'Lower Bound Fracture Toughness'. Each section has radio buttons for different methods and corresponding input fields. The 'Standard Deviations from Mean' is set to 'SD from 0'. The 'Standard' is listed as 'API579'. Navigation buttons 'Previous' and 'Next >>' are visible at the bottom.

รูปที่ 5.13 อินเทอร์เฟซสมบัติวัสดุ แถบย่อยความต้านทานการแตกหัก

ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม รูปที่ 5.14 กรณีที่ประเมินสภาพระดับ 3 (ทางเลือก B) ผู้ประเมินต้องระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม ซึ่งเลือกรับได้ 2 วิธี คือระบุสมการของสมการ Ramberg-Osgood หรือเลือกไฟล์ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดด้วยการกดปุ่ม Browse (ตำแหน่ง A) เพื่อเลือกไฟล์ข้อมูล .txt จากภายนอก (รูปที่ 5.14(ข)) ให้โปรแกรมอ่านเข้ามา



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.14 อินเทอร์เฟซสมบัติวัสดุ แถบย่อยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

เพื่อให้การใช้งานโปรแกรมสะดวกขึ้น โปรแกรมจึงเตรียมข้อมูลไว้จำนวนหนึ่งให้ผู้ประเมินเลือกใช้งานได้โดยสะดวก รูปที่ 5.15 ผู้ประเมินสามารถเลือกข้อมูลวัสดุได้โดยการกดเลือกที่ตำแหน่ง A จากนั้นจะมีรายละเอียดข้อมูลวัสดุปรากฏที่ตำแหน่ง AA ให้ผู้ประเมินเลือกได้โดยสะดวก ทั้งนี้หลังจากเลือกข้อมูลแล้วโปรแกรมจะอัปเดตข้อมูลวัสดุให้โดยอัตโนมัติ กรณีที่ผู้ประเมินต้องการระบุข้อมูลวัสดุเองให้เลือก CUSTOMIZE

The screenshot shows the 'Material' section of the software. The 'Name' field is set to 'SA-135' and a dropdown menu is open showing options: 'CUSTOMIZE', 'SA-135', 'SA-178', 'SA-312', and 'SA-53'. The 'Exemption Curve' is set to 'A'. Below, a 'DATABASE AA' table lists material specifications.

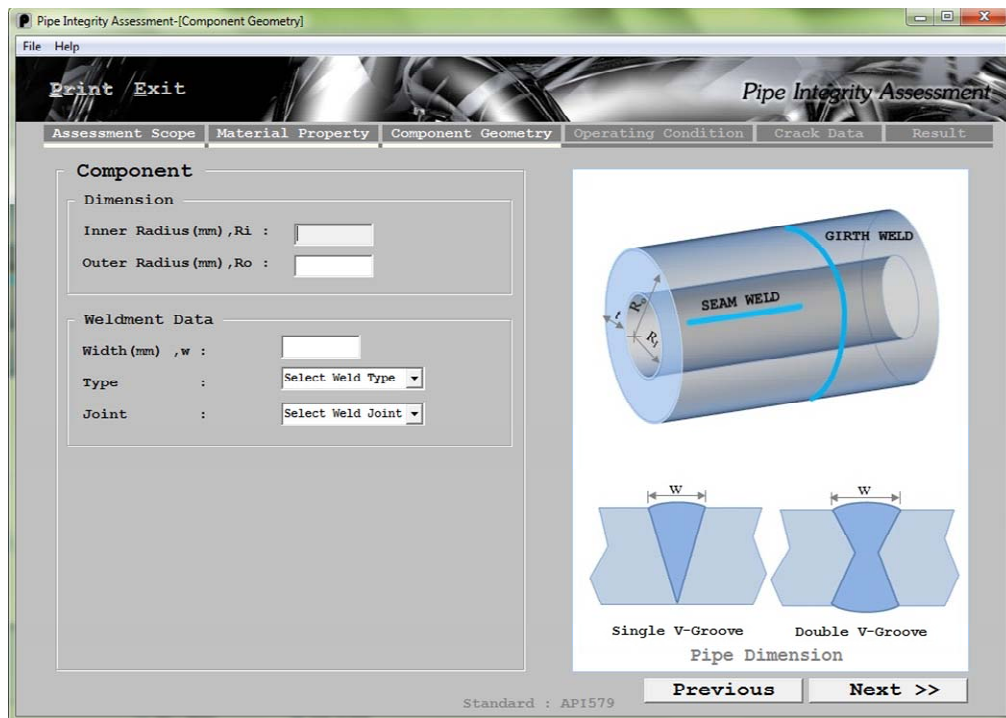
| Spec. No. | Young modulus (GPa) | T |
|-----------|---------------------|---|
| SA-135    | 210                 | 3 |
| SA-178    | 210                 | 3 |
| SA-312    | 200                 | 5 |
| SA-53     | 210                 | 3 |

Additional fields in the 'Material' section include: Allowable stress at pressure test (MPa), Yield Strength (MPa) (205), Ultimate Strength (MPa) (330), Young Modulus (GPa) (210), Poisson's Ratio (0.3), Thermal Expansion (E-6, 1/oC), and FAD Cut-off, Lr (max) (Lr (max)).

รูปที่ 5.15 อินเทอร์เฟซฐานข้อมูล

### 5.6.3 ขนาดชิ้นส่วน

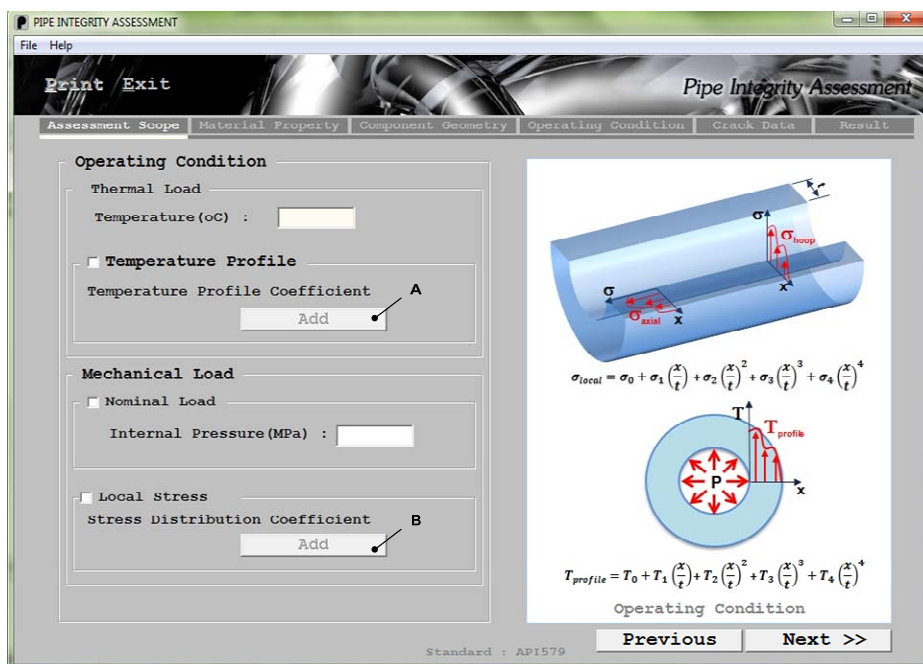
หน้าต่างนี้ใช้ระบุขนาดชิ้นส่วน และข้อมูลรอยเชื่อมบนชิ้นส่วน รูปที่ 5.16 ข้อมูลที่ต้องระบุคือ รัศมีภายใน และภายนอก ความกว้างรอยเชื่อม แนวนรอยเชื่อมมี 2 ทิศทาง คือขนาน แกนท่อ และตั้งฉากแกนท่อ และรูปแบบการเชื่อม สามารถเลือกได้ 2 แบบ คือ Single V-groove weld และ Double V-groove weld หน่วยในการระบุเป็นหน่วย SI



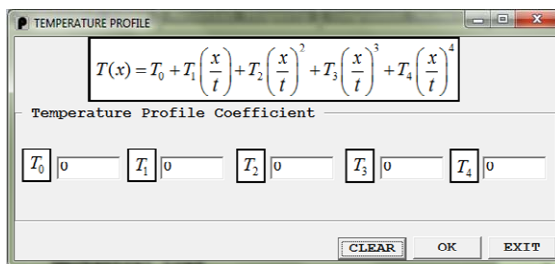
รูปที่ 5.16 อินเทอร์เฟซการระบุขนาดชิ้นส่วน

5.6.4 ภาระใช้งาน

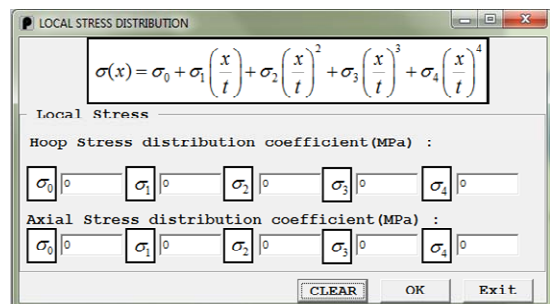
หน้าต่างนี้ใช้ระบุภาระการใช้งาน รูปที่ 5.17(ก) ภาระการใช้งานแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) ภาระเชิงความร้อน (Thermal load) และอุณหภูมิประเมิน ซึ่งระบุในรูปการกระจายตัวของ อุณหภูมิตามแนวความหนาในรูปฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสี่ โดยการกดปุ่ม Add (ตำแหน่ง A) และระบุสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (รูปที่ 5.17(ข)) 2) ภาระทางกล (Mechanical load) ระบุได้ 2 รูปแบบ คือภาระโดยตรง และความเค้นเฉพาะบริเวณในรูปการกระจายความเค้นตามแนวความ หนาในรูปฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสี่ โดยการกดปุ่ม Add (ตำแหน่ง B) และระบุสัมประสิทธิ์ของ ภาระ (รูปที่ 5.17(ค)) สำหรับภาระโดยตรงในที่นี้คือ ความดันภายใน ข้อมูลระบุเป็นหน่วย SI



(ก)



(ข)

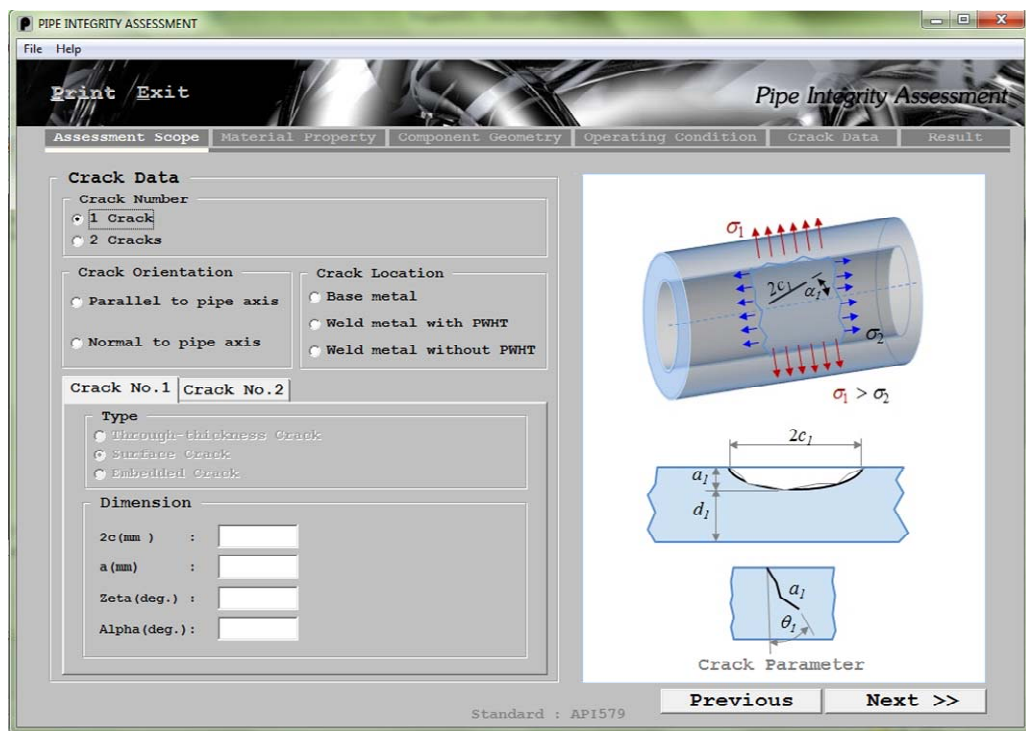


(ค)

รูปที่ 5.17 อินเทอร์เฟซการระบุภาระใช้งาน

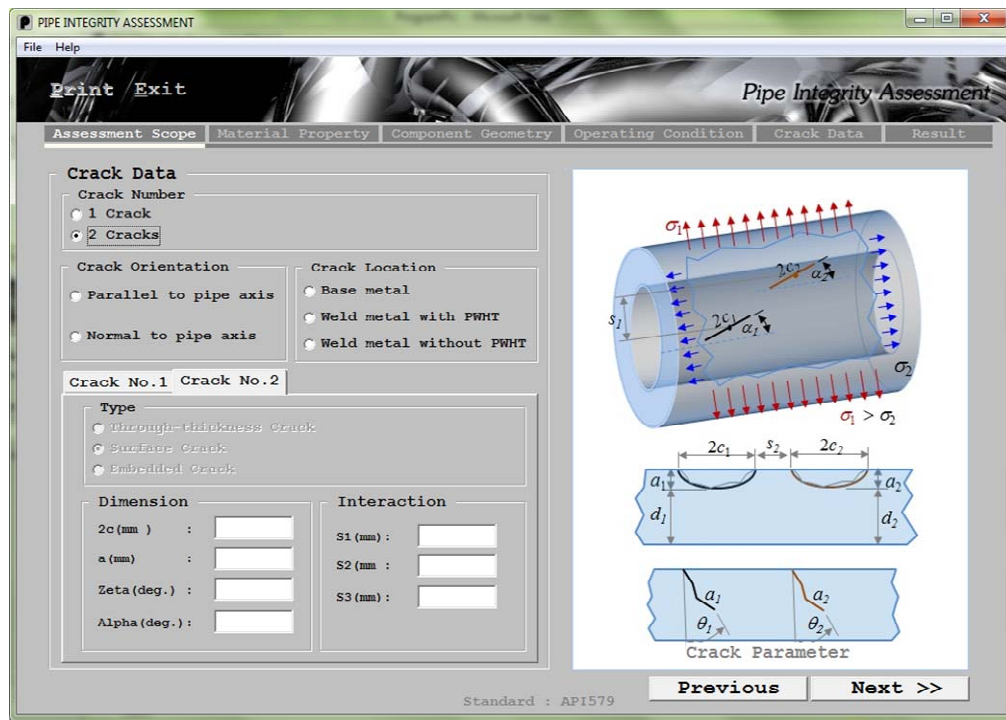
### 5.6.5 ข้อมูลรอยร้าว

หน้าต่างนี้มีใช้ระบุขนาดและชนิดของรอยร้าว ผู้ประเมินสามารถเลือกวิเคราะห์จำนวนรอยร้าวได้มากที่สุด 2 รอยร้าว รูปที่ 5.18 กรณีที่ระบุข้อมูลรอยร้าวเพียงรอยร้าวเดียวผู้ประเมินต้องระบุ ตำแหน่งของรอยร้าวเทียบกับรอยเชื่อมมีให้เลือก 3 ตำแหน่ง คือบริเวณนอกรอยเชื่อม บริเวณรอยเชื่อมที่ผ่าน PWHT และบริเวณรอยเชื่อมที่ไม่ผ่าน PWHT แนววางตัวของรอยร้าวเทียบกับท่อ มีให้เลือก 2 แนว คือขนานกับแกนท้อ และตั้งฉากกับแกนท้อ ชนิดรอยร้าวมีให้เลือก 3 ชนิด คือ รอยร้าวผิว รอยร้าวฝัง และรอยร้าวทะลุความหนา จากนั้นระบุความยาวรอยร้าว ความลึกรอยร้าว มุมรอยร้าวเมื่อเทียบกับแกนรัศมีท่อ และมุมรอยร้าวเมื่อเทียบกับแกนท้อ หน่วยในการระบุเป็นหน่วย SI



รูปที่ 5.18 อินเทอร์เฟซข้อมูลรอยร้าว 1 รอย

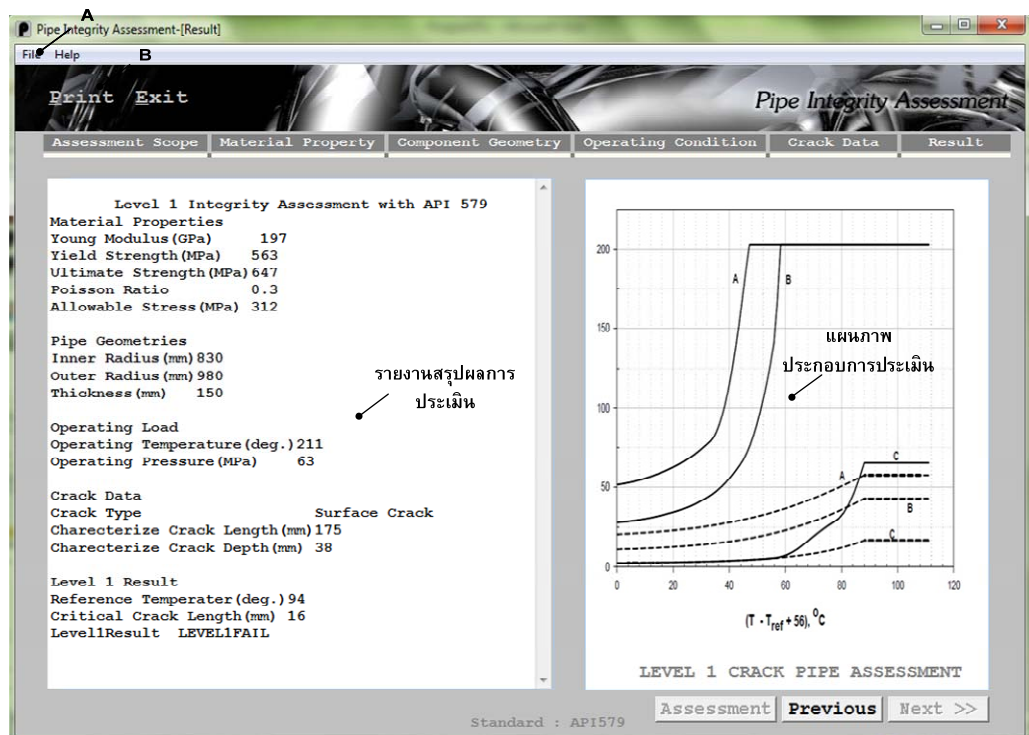
รูปที่ 5.19 กรณีเลือก 2 รอยร้าว ผู้ประเมินต้องระบุข้อมูลรอยร้าวเหมือนกับกรณีแรก จำนวน 2 ชุด คือสำหรับรอยร้าวที่ 1 และ 2 นอกจากนี้ผู้ประเมินต้องระบุปฏิสัมพันธ์ระหว่าง รอยร้าวคือ ระยะระหว่างระนาบรอยร้าว และระยะระหว่างปลายรอยร้าวเมื่อวัดในแนวขนานกับ ระนาบรอยร้าว และระยะระหว่างตำแหน่งลึกสุดรอยร้าว หน่วยในการระบุเป็นหน่วย SI



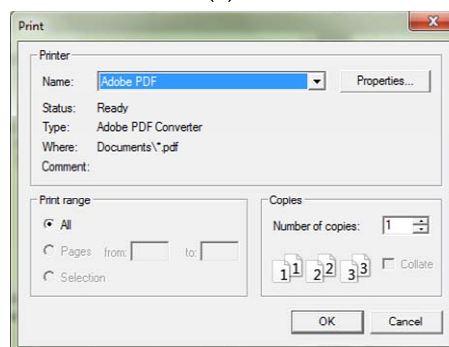
รูปที่ 5.19 อินเทอร์เฟซข้อมูลรอยร้าว 2 รอย

### 5.6.6 ผลการประเมิน

หน้าต่างนี้ใช้แสดงผลการประเมินการคงสภาพ รูปที่ 5.20(ก) ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 1 ประกอบด้วยรายงานสรุปการประเมิน (ซ้ายมือ) และภาพประกอบการประเมิน (ขวามือ) ทั้งนี้ผู้ประเมินสามารถพิมพ์รายงานสรุปการประเมินได้โดยใช้คำสั่ง Print ผ่านคำสั่ง File (ตำแหน่ง A) บนแถบเมนู หรือเลือกจากตำแหน่ง B จากนั้นเลือกรายละเอียดการพิมพ์จากหน้าต่าง Print (รูปที่ 5.20(ข))



(ก)

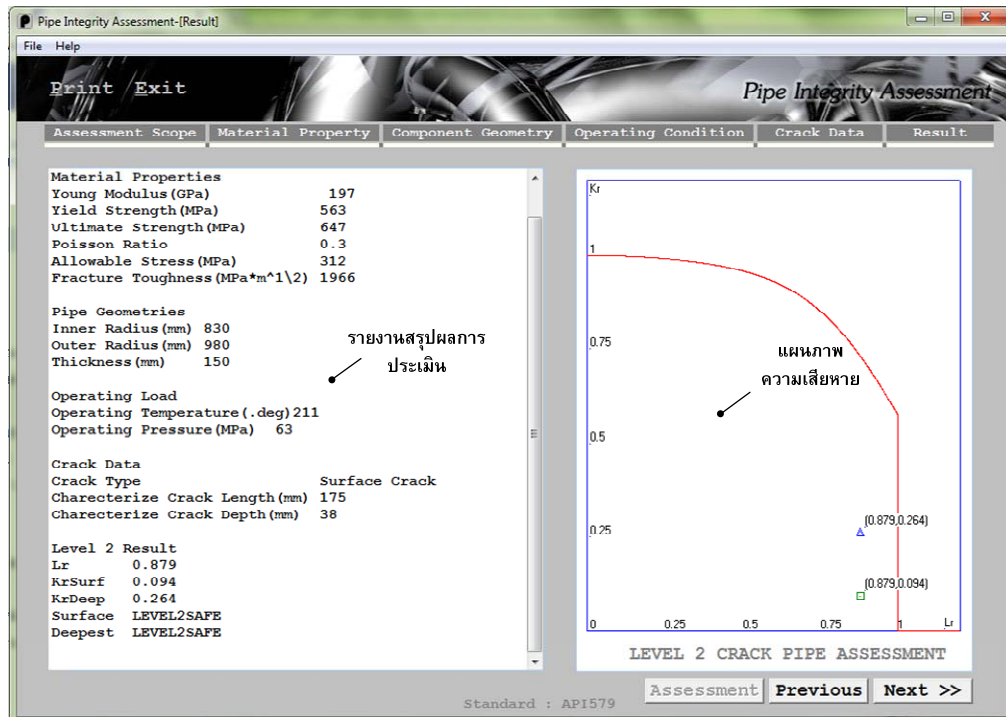


(ข)

รูปที่ 5.20 อินเทอร์เฟซผลการประเมินระดับ 1



รูปที่ 5.21 แสดงผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 ซึ่งประกอบด้วยรายงานสรุปการประเมิน (ซ้ายมือ) และแผนภาพความเสียหาย (ขวามือ) สำหรับการประเมินระดับ 3 (ทางเลือก B) จะแสดงผลคล้ายระดับ 2 แต่แผนภาพความเสียหายจะเปลี่ยนไป



รูปที่ 5.21 อินเทอร์เฟซผลการประเมินระดับ 2

### 5.6.7 การประเมินอายุใช้งานที่เหลือและการรั่วก่อนการแตกหัก

รูปที่ 5.22 กรณีที่ผู้ประเมินเลือกระดับการประเมินการคงสภาพสูงกว่าระดับ 1 แถบ ประเมินอายุใช้งานที่เหลือและการรั่วก่อนการแตกหักจะปรากฏขึ้นเพื่อให้ผู้ประเมินสามารถประเมินอายุการใช้งานที่เหลือเนื่องจากภาวะล้าที่มีแอมพลิจูดคงที่ และประเมินการรั่วก่อนการแตกหัก โดยมีข้อมูลที่ต้องระบุเพิ่มเติมคือ ความดันภายในสูงสุด และต่ำสุดที่ชิ้นส่วนต้องรับ ความยาวเริ่มต้น และความลึกรอยร้าวเริ่มต้น จำนวนรอบภาระ และจำนวนรอบภาระที่กำหนด โดยผลคูณระหว่างจำนวนรอบภาระ และจำนวนรอบภาระที่กำหนด จะหมายถึงจำนวนรอบที่ต้องการพิจารณา เช่น ต้องการทราบว่าขนาดรอยร้าวเปลี่ยนแปลงไปเท่าไรเมื่อชิ้นส่วนรับภาระ 10,000 รอบ ผู้ประเมินอาจกำหนดจำนวนรอบภาระเท่ากับ 10 และจำนวนรอบภาระที่กำหนดเท่ากับ 1,000 เป็นต้น ซึ่งจะหมายถึงต้องการพิจารณาภาระทั้งหมด 10,000 รอบ โดยจะทำการเติบโตของรอยร้าวทุกๆ 10 รอบ

The screenshot shows the 'Pipe Integrity Assessment' software window. The title bar reads 'Pipe Integrity Assessment-[Fatigue Crack Growth and LBB]'. The menu bar includes 'File' and 'Help'. Below the menu bar, there are several tabs: 'Assessment Scope', 'Material Property', 'Component Geometry', 'Operating Condition', 'Crack Data', and 'Fatigue--LBB'. The main window is titled 'Fatigue Crack Growth' and contains several input fields:

- Crack Growth Parameter** and **Crack Growth Model** (dropdown menus)
- Pressure** section:
  - Pmax (MPa) :
  - Pmin (MPa) :
- Surface Crack** section:
  - Depth, a (mm) :
  - Length, 2c (mm) :
- Time Step** section:
  - Cycle :
  - Number of repeated :

At the bottom of the window, there is a 'Standard : API579' label and two buttons: 'Previous' and 'Assessment'.

รูปที่ 5.22 อินเทอร์เฟซแถบประเมินอายุใช้งานที่เหลือและการรั่วก่อนการแตกหัก

รูปที่ 5.23 (ซ้ายมือ) แสดงค่าคงที่สำหรับสมการของ Walker ที่ผู้ประเมินต้องระบุ และแสดงตัวอย่างการแสดงผลการประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ และการรั่วก่อนการแตกหัก ซึ่งประกอบด้วย 5 คอลัมน์ คือ จำนวนรอบภาระ ความลึกรอยร้าว ครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว สถานะการใช้งาน และสถานะการรั่ว สำหรับสถานะการใช้งานมี 2 สถานะ คือ SAFE และ FAIL ซึ่งหมายถึงชิ้นส่วนสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย และไม่ปลอดภัย ตามลำดับ สำหรับสถานะการรั่ว แบ่งออกเป็น 4 สถานะ คือ NOTLEAK, BREAKNOTLEAK, LEAKAND-BREAK, LEAKNOTBREAK ซึ่งหมายถึง ชิ้นส่วนไม่รั่วและไม่เสียหาย ชิ้นส่วนไม่รั่วแต่เสียหาย ชิ้นส่วนรั่วและเสียหาย และชิ้นส่วนรั่วแต่ไม่เสียหาย ตามลำดับ

The screenshot displays two windows from the 'Pipe Integrity Assessment' software. The left window is titled 'Fatigue Crack Growth' and contains the following parameters and equation:

Walker Model Coefficient

C (xE-8) :

n :

m :

Delta Kth (MPa.m<sup>1/2</sup>) :

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \frac{\Delta K}{(1-R)^m} \right]^n \quad \text{for } \Delta K > \Delta K_{th}$$

The right window shows a table of results for a crack growth assessment:

| N   | a (mm) | c (mm)  | RESULT  | RESULT  |
|-----|--------|---------|---------|---------|
| 0   | 5.0800 | 40.6400 | INITIAL | INITIAL |
| 100 | 5.0800 | 40.6400 | SAFE    | NOTLEAK |
| 200 | 5.0800 | 40.6400 | SAFE    | NOTLEAK |
| 300 | 5.0800 | 40.6400 | SAFE    | NOTLEAK |
| 400 | 5.0801 | 40.6400 | SAFE    | NOTLEAK |
| 500 | 5.0801 | 40.6400 | SAFE    | NOTLEAK |

An arrow points to the 'SAFE' result in the table with the label 'ตัวอย่างผลการประเมิน' (Example of assessment results).

รูปที่ 5.23 ตัวอย่างการแสดงผลแถบประเมินอายุใช้งานที่เหลือและการรั่วก่อนการแตกหัก

## บทที่ 6

### การตรวจสอบและการประยุกต์ใช้งานโปรแกรม

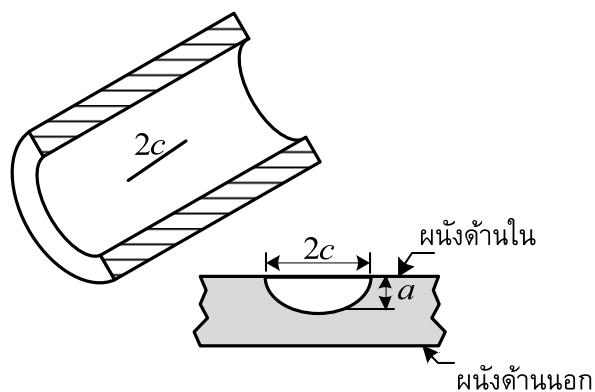
บทนี้จะกล่าวถึงการตรวจสอบความถูกต้อง โดยเปรียบเทียบผลการประเมินของโปรแกรมกับผลการประเมินโดยตรง และการประยุกต์ใช้งานโปรแกรมกับปัญหาในทางปฏิบัติ

#### 6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมจะใช้ปัญหาตัวอย่างจาก API RP 579 [34] ที่สอดคล้องกับขีดความสามารถของโปรแกรม โดยเปรียบเทียบผลการประเมินด้วยโปรแกรมที่ออกแบบกับผลการประเมินโดยตรงซึ่งใช้โปรแกรม Mathcad ช่วยคำนวณ การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมด้วยโจทย์ปัญหา 4 ข้อดังนี้ ปัญหาการประเมินการคงสภาพระดับ 1 ระดับ 2 ระดับ 3 (ทางเลือก B) และการประเมินอายุใช้งานที่เหลือกับการประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก ตามลำดับ

##### 6.1.1 โจทย์ข้อที่ 1

ท่อรับความดันภายใน 0.9653 MPa และทำงานที่อุณหภูมิ 37.78 °C ท่อทำด้วยวัสดุ SA-516 Grade 70, Carbon Steel, P1, Group 2 ท่อมีรัศมีภายใน 1,219 mm และหนา 29.21 mm การตรวจสอบพบรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อที่ผนังด้านใน (ดูรูปที่ 6.1 ประกอบ) โดยรอยร้าวอยู่บริเวณรอยเชื่อม และขนานกับรอยเชื่อมตามยาว ความยาวของรอยร้าว  $2c$  และความลึกของรอยร้าว  $a$  เท่ากับ 27.94 mm และ 6.35 mm ตามลำดับ ต้องการทราบว่าท่อจะเสียหายหรือไม่ สำหรับการประเมินการคงสภาพระดับ 1



รูปที่ 6.1 รอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อ

โปรแกรมจะทำงานตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.4.1 เช่นเดียวกับการประเมินโดยตรง ดังนี้  
ขั้นตอนที่ 1 ระบุสภาวะใช้งานของโครงสร้าง

$$P = 0.9653 \text{ MPa}$$

$$T = 37.78 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ขั้นตอนที่ 2 เลือกแผนภาพประเมิน

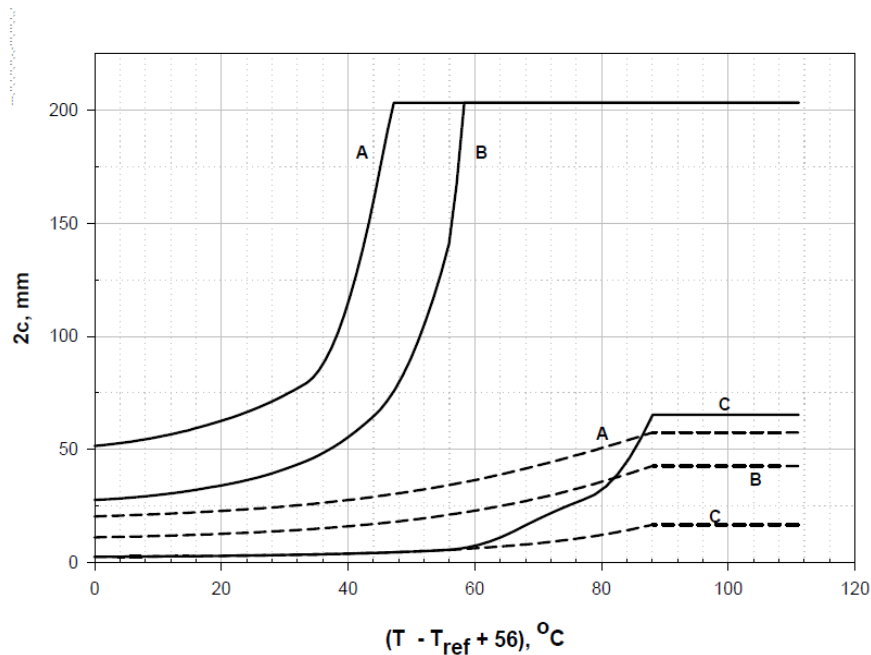
เนื่องจากปัญหาคือ ท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีที่ผนังด้านในขนานแกนและขนานกับรอยเชื่อม ดังนั้นแผนภาพประเมินที่ใช้ คือ รูปที่ 6.2 (รูปที่ 9.13M ในมาตรฐาน) ซึ่งแกนนอน คือ อุณหภูมิประเมิน ( $T - T_{ref} - 56$ )  $^{\circ}\text{C}$  แกนตั้ง คือความยาวรอยร้าวสูงสุดที่ยอมรับได้  $2c$

ขั้นตอนที่ 3 เลือกกราฟในแผนภาพประเมินที่ระบุในขั้นตอนที่ 2

เนื่องจากรอยร้าววางตัวบนรอยเชื่อม และรอยเชื่อมผ่าน PWHT มาแล้ว จึงใช้กราฟกลุ่ม B และเนื่องจากความลึกรอยร้าวน้อยกว่าหนึ่งในสี่ของความหนาท่อ จึงใช้กราฟเส้นที่บในการประเมิน

ขั้นตอนที่ 4 ระบุอุณหภูมิอ้างอิง  $T_{ref}$

จากตารางที่ 3.2 ในมาตรฐานวัสดุ SA-516 Grade 70, Carbon Steel, P1, Group 2 อยู่ในกลุ่ม ASME Exemption curve B หา  $T_{ref}$  ด้วยการประมาณค่าจากตาราง 9.2 ในมาตรฐาน  $T_{ref}$  ของวัสดุซึ่งมีค่าความแข็งแรงครากเท่ากับ 262 MPa จะมีค่า 5.70  $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 6.2 แผนภาพประเมินสำหรับท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีที่ผนังด้านในขนานแกนท่อ และรอยเชื่อม [14]

ขั้นตอนที่ 5 หาความยาวรอยร้าวที่ยอมรับ

อ่านค่าจากแผนภาพประเมิน (รูปที่ 6.2) และกราฟที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้าจะได้ความยาวรอยร้าวที่ยอมรับมีค่าเท่ากับ 203 mm

ขั้นตอนที่ 6 ประเมินการคงสภาพ

เนื่องจากความยาวรอยร้าวที่ตรวจพบซึ่งเท่ากับ 27.94 mm น้อยกว่าความยาวรอยร้าวที่ยอมรับได้ซึ่งเท่ากับ 203 mm ดังนั้นชิ้นส่วนสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย

ตารางที่ 6.1 แสดงผลลัพธ์จากการทำงานของโปรแกรมซึ่งตรงกับการคำนวณโดยตรง

ตารางที่ 6.1 ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 1

| พารามิเตอร์                       | โปรแกรม (mm) | คำนวณโดยตรง (mm) |
|-----------------------------------|--------------|------------------|
| ความยาวรอยร้าวที่ตรวจวัดได้, $2c$ | 27.94        | 27.94            |
| ความยาวรอยร้าวสูงสุด, $2c_{crit}$ | 203          | 203              |
| ผลการประเมิน                      | ปลอดภัย      | ปลอดภัย          |

### 6.1.2 โจทย์ข้อที่ 2

ท่อรับความดันภายใน 1.379 MPa และทำงานที่อุณหภูมิ 4.4 °C ท่อทำด้วยวัสดุ SA-516 Grade 70, Carbon Steel, P1, Group 2 ท่อมีรัศมีภายใน 3,048 mm และหนา 25.4 mm การตรวจสอบพบรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อที่ผนังด้านใน (ดูรูปที่ 6.1 ประกอบ) โดยรอยร้าวอยู่บริเวณรอยเชื่อม และขนานกับรอยเชื่อมตามยาว ความยาวของรอยร้าว  $2c$  และความลึกของรอยร้าว  $a$  เท่ากับ 81.28 mm และ 5.080 mm ตามลำดับ ต้องการทราบว่าท่อจะเสียหายหรือไม่ สำหรับการประเมินการคงสภาพระดับ 2

โปรแกรมจะทำงานตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.4.2 เช่นเดียวกับการประเมินโดยตรง ดังนี้  
ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์สภาวะใช้งาน

$$P = 1.379 \text{ MPa}$$

$$T = 4.44 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์ความเค้น

ความเค้นเมเนเบรนปฐมภูมิ  $P_m$  และความเค้นดัดปฐมภูมิ  $P_b$  เนื่องจากความดันภายในหาได้จากสมการ (ก.9) และ (ก.10) ตามลำดับ

แทนค่า  $R_i$ ,  $R_o$ ,  $t$  เท่ากับ 1,524 mm, 1,549 mm และ 25.4 mm ตามลำดับ และ  $p$  เท่ากับ 1.379 MPa ในสมการ (ก.9) และ (ก.10) จะได้  $P_m$  และ  $P_b$  มีค่าเท่ากับ 82.740 MPa และ 0.689 MPa ตามลำดับ

ความเค้นเมเนเบรนทุติยภูมิ  $Q_m$  และความเค้นดัดทุติยภูมิ  $Q_b$  เนื่องจากความเค้นตกค้างหาได้จากข้อมูลรอยเชื่อมคือ รอยเชื่อมเป็นรอยเชื่อมขนาบแทนท่อแบบ Double-V Groove มีความกว้างเท่ากับ 20 mm รอยเชื่อมไม่ผ่าน PWHT เมื่อคำนวณตามขั้นตอนในภาคผนวก ฉ จะได้ความเค้นตกค้างสูงสุดมีค่าเท่ากับ 331 MPa ดังนั้น  $Q_m$  และ  $Q_b$  มีค่าเท่ากับ 331 MPa และศูนย์ ตามลำดับ

สำหรับปัญหานี้เนื่องจากความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิมีค่าน้อยมากจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา

ขั้นตอนที่ 3 ระบุสมบัติวัสดุ

ความต้านทานการแตกหักขอบเขตล่าง  $K_{IC}$  ของวัสดุหาได้จากสมการ (ข.1) เมื่อ  $T_{ref}$  มีค่า 5.70 °C ดังนั้น  $K_{IC}$  มีค่าเท่ากับ 58.629 MPa $\sqrt{m}$  และเมื่อปรับค่าเป็นความต้านทานการแตกหักค่ากลาง  $K_{mean}$  ด้วยสมการ (ข.7) โดยกำหนดให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1 จะได้  $K_{mean}$  มีค่าเท่ากับ 95.523 MPa $\sqrt{m}$

ขั้นตอนที่ 4 ระบุลักษณะรอยร้าว

รอยร้าวเป็นรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีภายในขนาบแทนท่อความยาวของรอยร้าว  $2c$  และความลึกของรอยร้าว  $a$  หลังจากระบุลักษณะรอยร้าวตามขั้นตอนในภาคผนวก ข แล้วมีค่าเท่ากับ 81.28 mm และ 5.080 mm ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 5 ปรับแก้ตัวแปรป้อนเข้า

สำหรับโจทย์ข้อนี้กำหนดให้ความน่าจะเป็นที่ชิ้นส่วนจะเสียหายเท่ากับ  $10^{-3}$  และสัมประสิทธิ์ความแปรผัน เท่ากับ 0.1 เนื่องจากรอยร้าวจัดเป็นรอยร้าวตื้น เมื่ออ่านค่าจากตารางที่ 9.3 ในมาตรฐานจะได้  $PSF_s$ ,  $PSF_k$  และ  $PSF_a$  เท่ากับ 1.50, 1.0 และ 1.0 ตามลำดับ

ปรับแก้ภาวะด้วย  $PSF_s$  ด้วยสมการ (3.1) และ (3.2) จะได้  $P_m$ ,  $P_b$ ,  $Q_m$  และ  $Q_b$  หลังจากปรับแก้แล้วมีค่าเท่ากับ 124.110 MPa $\sqrt{m}$ , 1.034 MPa $\sqrt{m}$ , 497 MPa $\sqrt{m}$  และ ศูนย์ ตามลำดับ

ปรับแก้ความต้านทานการแตกหักค่ากลางด้วย  $PSF_k$  ด้วยสมการ (3.3) จะได้ความต้านทานการแตกหัก  $K_{mat}$  มีค่าเท่ากับ 95.523 MPa $\sqrt{m}$

ปรับแก้ขนาดรอยร้าวด้วย  $PSF_a$  ด้วยสมการ (3.4) จะได้ความลึกรอยร้าวใหม่หลังปรับแก้มีค่าเท่ากับ 5.08 mm

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาความเค้นอ้างอิงปฐมภูมิ  $\sigma_{ref}^P$  ด้วยสมการ (จ.1) จะได้  $\sigma_{ref}^P$  มีค่าเท่ากับ 85.180 MPa

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวปฐมภูมิ  $K_I^P$  ด้วยระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนักร (ภาคผนวก ค) ด้วยสมการ (ค.20) และ (ค.25) จะได้พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวที่ตำแหน่งลึกสุด  $K_{I,Deep}^P$  และตำแหน่งผิวของรอยร้าว  $K_{I,Surf}^P$  มีค่าเท่ากับ  $12.453 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  และ  $3.065 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาอัตราส่วนภาระปฐมภูมิ  $L_r^P$  ด้วยสมการ (3.5) เมื่อความแข็งแรงคราก  $\sigma_{ys}$  มีค่าเท่ากับ  $262 \text{ MPa}$  จะได้  $L_r^P$  มีค่าเท่ากับ  $0.488$

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณหาความเค้นอ้างอิงทุติยภูมิ  $\sigma_{ref}^{SR}$  ด้วยสมการ (จ.1) จะได้  $\sigma_{ref}^{SR}$  มีค่าเท่ากับ  $509.354 \text{ MPa}$

ขั้นตอนที่ 10 คำนวณหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวทุติยภูมิ  $K_I^{SR}$  ด้วยระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนักร (ภาคผนวก ค) ด้วยสมการ (ค.22) และ (ค.27) จะได้พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวที่ตำแหน่งลึกสุด  $K_{I,Deep}^{SR}$  และตำแหน่งผิวของรอยร้าว  $K_{I,Surf}^{SR}$  มีค่าเท่ากับ  $48.696 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  และ  $11.967 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 11 คำนวณหา plasticity interaction factor จากสมการ (3.11) จะได้ plasticity interaction factor ตำแหน่งลึกสุด  $\Phi_{Deep}$  และตำแหน่งผิวรอยร้าว  $\Phi_{Surf}$  มีค่าเท่ากับ  $1.181$

ขั้นตอนที่ 12 คำนวณหาอัตราส่วนความต้านทานการแตกหักด้วยสมการ (3.12) จะได้อัตราส่วนความต้านทานการแตกหักที่ตำแหน่งลึกสุด  $K_{r,Deep}$  และตำแหน่งผิวรอยร้าว  $K_{r,Surf}$  มีค่าเท่ากับ  $0.732$  และ  $0.180$  ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 13 ประเมินการคงสภาพ รูปที่ 6.3 เมื่อนำจุดประเมิน  $(L_r^P, K_{r,Deep})$  และ  $(L_r^P, K_{r,Surf})$  ไปพล็อตบนแผนภาพความเสียหายพบว่าจุดประเมินอยู่ใต้เส้นโค้งความเสียหาย จึงสรุปได้ว่าชิ้นส่วนสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย

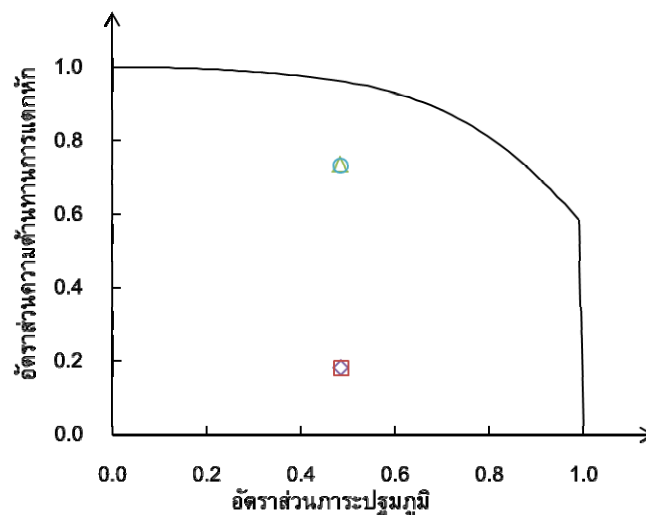
ตารางที่ 6.2 แสดงผลลัพธ์จากการทำงานของโปรแกรมซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณโดยตรง จะเห็นว่าอัตราส่วนความต้านทานการแตกหักตำแหน่งลึกสุดที่โปรแกรมคำนวณได้คลาดเคลื่อนไปจากการคำนวณโดยตรงไป  $0.3\%$  ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเป็นความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลข (Numerical error) เนื่องจากการหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวด้วยการประมาณค่าโดยใช้การอินทิเกรตเชิงตัวเลข



ตารางที่ 6.2 ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 สำหรับโจทย์ข้อที่ 2

| พารามิเตอร์   | โปรแกรม | คำนวณโดยตรง |
|---|---------|-------------|
| อัตราส่วนการประมุขุมิ, $L_r^P$                              | 0.486   | 0.486       |
| อัตราส่วนความต้านทานการแตกหัก ตำแหน่งผิว, $K_{r,Surf}^P$    | 0.180   | 0.180       |
| อัตราส่วนความต้านทานการแตกหัก ตำแหน่งลึกสุด, $K_{r,Deep}^P$ | 0.734   | 0.732       |
| ผลการประเมิน  | ปลอดภัย | ปลอดภัย     |

รูปที่ 6.3 เมื่อนำจุดประเมินไปพล็อตบนแผนภาพความเสียหายจะเห็นว่าโครงสร้างปลอดภัยและจุดประเมินที่ได้จากโปรแกรมตรงกับการคำนวณโดยตรง



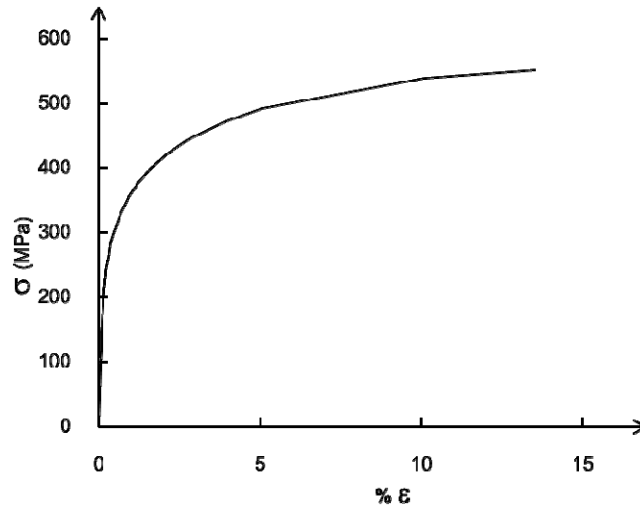
รูปที่ 6.3 แผนภาพความเสียหายของโจทย์ข้อที่ 2

( $\Delta$  และ  $\square$  จุดประเมินที่ผิวรอยร้าวจากการคำนวณโดยตรงและโปรแกรม ตามลำดับ  
 $\Delta$  และ  $\circ$  จุดประเมินที่ลึกสุดรอยร้าวจากการคำนวณโดยตรงและโปรแกรม ตามลำดับ)

### 6.1.3 โจทย์ข้อที่ 3

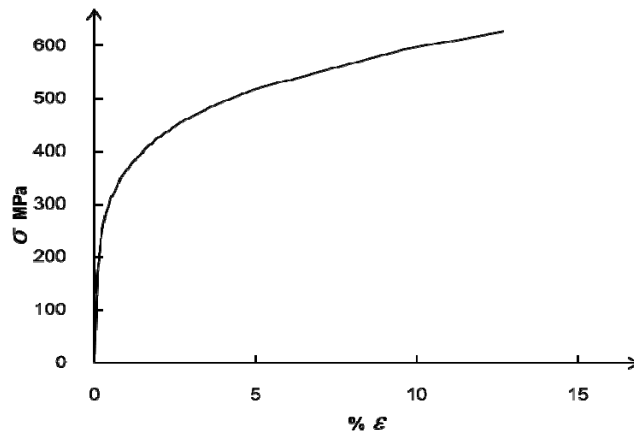
จากโจทย์ข้อที่ 2 ใช้การประเมินการคงสภาพระดับ 3 (ทางเลือก B) กับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม ดังรูปที่ 6.4 ต้องการทราบว่าท่อจะเสียหายหรือไม่ สำหรับการประเมินการคงสภาพระดับ 3 (ทางเลือก B)

โปรแกรมจะทำงานตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.4.3 เช่นเดียวกับการคำนวณโดยตรง ดังนี้  
 ขั้นตอนที่ 1 ระบุสมบัติวัสดุ มอดูลัสของความยืดหยุ่น  $E_y$  ความแข็งแรงคราก  $\sigma_{ys}$  สำหรับวัสดุในโจทย์ปัญหาข้อนี้มีค่าเท่ากับ 200 GPa และ 262 MPa ตามลำดับ และมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม [14]

ขั้นตอนที่ 2 หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงด้วยสมการ (3.15) และ (3.16) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงดังรูปที่ 6.5

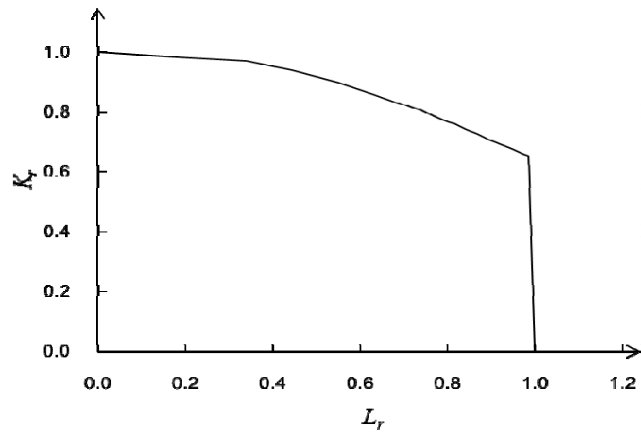


รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง

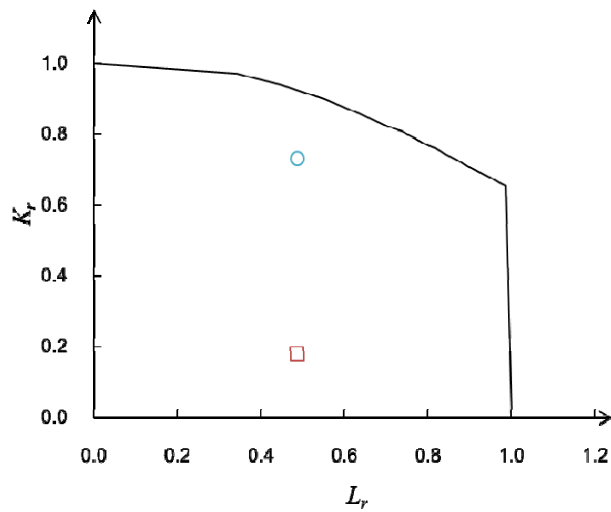
ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาเส้นโค้งความเสียหายที่ขึ้นกับสมบัติวัสดุด้วยสมการ (3.19) จะได้เส้นโค้งความเสียหายที่ขึ้นกับสมบัติวัสดุดังรูปที่ 6.6

ขั้นตอนที่ 4 การประเมินการคงสภาพ รูปที่ 6.7 เมื่อนำจุดประเมิน ( $L_r^P, K_{r,Deep}$ ) และ ( $L_r^P, K_{r,Surf}$ ) ไปพล็อตบนแผนภาพความเสียหายพบว่าจุดประเมินอยู่ใต้เส้นโค้งความเสียหาย จึงสรุปได้ว่าชิ้นส่วนสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย

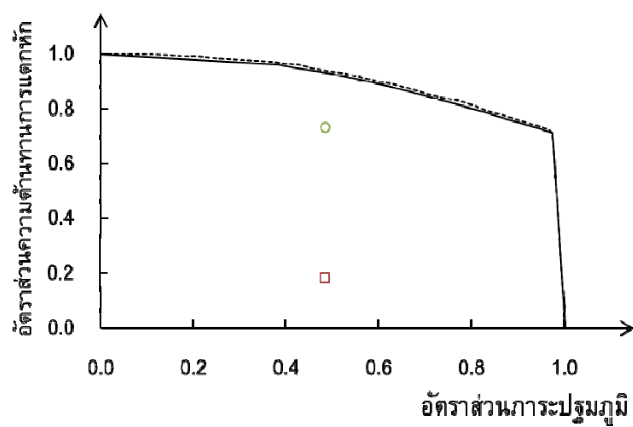
รูปที่ 6.8 แสดงเส้นโค้งความเสียหายจากการทำงานของโปรแกรม (เส้นประ) จะเห็นว่าสอดคล้องกับการคำนวณโดยตรง (เส้นทึบ) โดยผลการประเมินคือ ชิ้นส่วนสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 6.6 เส้นโค้งความเสียหายที่ขึ้นกับสมบัติวัสดุ



รูปที่ 6.7 แผนภาพความเสียหายสำหรับโจทย์ข้อที่ 3  
(o และ □ คือ จุดประเมินสำหรับตำแหน่งลึกสุด และตำแหน่งผิวรอยร้าว ตามลำดับ)



รูปที่ 6.8 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเสียหายจากการคำนวณโดยตรงและการใช้โปรแกรม  
(เส้นทึบคือ คำนวณโดยตรง เส้นประคือ คำนวณด้วยโปรแกรม)

#### 6.1.4 โจทย์ข้อที่ 4

จากโจทย์ข้อที่ 2 อธิบายทราบอายุที่เหลือและการร้าว เมื่อชิ้นส่วนรับภาระต่ำสุด และสูงสุด คงที่เท่ากับศูนย์ และ 2.068 MPa ตามลำดับ

โปรแกรมจะทำงานตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.5 และ 3.6 ไปพร้อมกันเช่นเดียวกับการคำนวณโดยตรง ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ประเมินการคงสภาพระดับ 2 หรือ 3 จากโจทย์ปัญหาข้อ 2 และ 3 จะเห็นว่าผลการประเมินการคงสภาพคือ ชิ้นส่วนสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ และการประเมินการร้าวก่อนการแตกหัก

ขั้นตอนที่ 2 เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ในที่นี้เลือกแบบจำลองของ Walker สมการ (3.12)

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่าคงที่ของแบบจำลองคือ  $C$ ,  $m$  และ  $n$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.65 \times 10^{-8}$ , 3 และศูนย์ ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น และอัตราส่วนภาระ  $R$  จากภาระสูงสุด  $P_{\max}$  และ ภาระต่ำสุด  $P_{\min}$  จากสมการ (3.22) และ (3.23) ตามลำดับ เมื่อ  $P_{\max}$  และ  $P_{\min}$  ค่าเท่ากับ 2.068 MPa และศูนย์ ตามลำดับ ดังนั้น  $R$  มีค่าเท่ากับศูนย์ และ  $\Delta K$  ขณะความยาว และความลึกรอยร้าวเริ่มต้นที่ตำแหน่งลึกสุด และตำแหน่งผิวรอยร้าวมีค่าเท่ากับ  $18.680 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  และ  $4.598 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาความยาวรอยร้าวใหม่ เมื่อแทนค่าต่างๆ ในสมการ (3.12) โดยใช้ระเบียบวิธีของออยเลอร์ [32] จะสามารถหาความลึก และความยาวรอยร้าวใหม่ในแต่ละรอบภาระโดยกำหนดให้จำนวนรอบภาระเท่ากับ 200 รอบ ตารางที่ 6.3 แสดงผลการประเมินโดยนำเสนอทุกๆ 2,000 รอบ จนกระทั่งชิ้นส่วนเสียหาย

ขั้นตอนที่ 6 ประเมินการร้าวก่อนการแตกหัก โดยนำความยาว และความลึกรอยร้าวใหม่ที่ได้พิจารณาว่าชิ้นส่วนร้าวหรือไม่ หากอัตราส่วนระหว่างความลึกรอยร้าวต่อความหนาต่อมีค่ามากกว่า 0.8 จะสรุปว่าชิ้นส่วนร้าว

ขั้นตอนที่ 7 นำความยาว และความลึกรอยร้าวใหม่ที่ได้ไปประเมินการคงสภาพระดับ 2 จะทราบสถานะการใช้งานในแต่ละรอบภาระว่าชิ้นส่วนสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัยหรือไม่

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาอายุการใช้งานของชิ้นส่วน จากตารางที่ 6.3 จะเห็นว่าชิ้นส่วนสามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัยจนกระทั่งรับภาระไป 16,800 รอบ ชิ้นส่วนจึงเสียหาย โดยที่ชิ้นส่วนไม่ร้าว จึงสรุปว่าชิ้นส่วนมีอายุการใช้งานทั้งหมด 16,800 รอบ และชิ้นส่วนจะแตกหักก่อนเกิดการร้าว

ตารางที่ 6.3 ผลการประเมินอายุใช้งานที่เหลือและการร้าวก่อนการแตกหัก

| จำนวนรอบ | ความลึก ครึ่งหนึ่งของ |                     | สถานะการใช้งาน | สถานะการร้าว |
|----------|-----------------------|---------------------|----------------|--------------|
|          | รอยร้าว (mm)          | ความยาวรอยร้าว (mm) |                |              |
| 0        | 5.0800                | 40.6400             | ปลอดภัย        | ไม่ร้าว      |
| 2000     | 5.3037                | 40.6434             | ปลอดภัย        | ไม่ร้าว      |
| 4000     | 5.5480                | 40.6474             | ปลอดภัย        | ไม่ร้าว      |
| 6000     | 5.8158                | 40.6522             | ปลอดภัย        | ไม่ร้าว      |
| 8000     | 6.1101                | 40.6578             | ปลอดภัย        | ไม่ร้าว      |
| 10000    | 6.4345                | 40.6646             | ปลอดภัย        | ไม่ร้าว      |
| 12000    | 6.7932                | 40.6728             | ปลอดภัย        | ไม่ร้าว      |
| 14000    | 7.1905                | 40.6829             | ปลอดภัย        | ไม่ร้าว      |
| 16000    | 7.6314                | 40.6954             | ปลอดภัย        | ไม่ร้าว      |
| 16800    | 7.8211                | 40.7013             | เสียหาย        | ไม่ร้าว      |

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบความยาวรอยร้าว ความลึกรอยร้าว และแสดงสถานะของชิ้นส่วนที่จำนวนรอบต่างๆ โดยนำเสนอบางๆ 2,000 รอบจนกระทั่งชิ้นส่วนเสียหาย จะเห็นว่าชิ้นส่วนสามารถใช้งานได้ 16,800 รอบ และชิ้นส่วนเสียหายในแต่ไม่ร้าว จึงสรุปได้ว่าชิ้นส่วนจะเกิดการแตกหักก่อนการร้าว ซึ่งการทำงานของโปรแกรมสอดคล้องกับการคำนวณโดยตรง และความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 0.1% ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้วิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขในการเขียนโปรแกรม

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบความยาวและความลึกรอยร้าวที่จำนวนรอบต่างๆ

| จำนวนรอบ | ความลึกรอยร้าว (mm) |             | ความยาวรอยร้าว (mm) |             | สถานะการใช้งาน | สถานะการร้าว |
|----------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|----------------|--------------|
|          | โปรแกรม             | คำนวณโดยตรง | โปรแกรม             | คำนวณโดยตรง |                |              |
| 0        | 5.080               | 5.080       | 40.640              | 40.640      | -              | -            |
| 2000     | 5.304               | 5.304       | 40.643              | 40.643      | ปลอดภัย        | ไม่ร้าว      |

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบความยาวและความลึกรอยร้าวที่จำนวนรอบต่างๆ (ต่อ)

| จำนวน<br>รอบ | ความลึกรอยร้าว<br>(mm) |                 | ความยาวรอยร้าว<br>(mm) |                 | สถานะ<br>การใช้งาน | สถานะ<br>การรื้อ |
|--------------|------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|--------------------|------------------|
|              | โปรแกรม                | คำนวณ<br>โดยตรง | โปรแกรม                | คำนวณ<br>โดยตรง |                    |                  |
| 4000         | 5.548                  | 5.549           | 40.647                 | 40.647          | ปลอดภัย            | ไม่รู้           |
| 6000         | 5.816                  | 5.817           | 40.652                 | 40.652          | ปลอดภัย            | ไม่รู้           |
| 8000         | 6.110                  | 6.112           | 40.658                 | 40.658          | ปลอดภัย            | ไม่รู้           |
| 10000        | 6.435                  | 6.438           | 40.665                 | 40.665          | ปลอดภัย            | ไม่รู้           |
| 12000        | 6.793                  | 6.797           | 40.673                 | 40.673          | ปลอดภัย            | ไม่รู้           |
| 16000        | 7.631                  | 7.639           | 40.695                 | 40.696          | ปลอดภัย            | ไม่รู้           |
| 16800        | 7.821                  | 7.829           | 40.701                 | 40.702          | เสียหาย            | ไม่รู้           |

## 6.2 การประยุกต์โปรแกรมกับปัญหาที่ซับซ้อน

หลังจากตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมกับปัญหาตัวอย่างที่มาตรฐานเตรียมไว้แล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การนำโปรแกรมไปประยุกต์ใช้กับปัญหาจริงซึ่งมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ปัญหาที่มี 3 ข้อ คือ 1) ท่อที่เสียหายจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน [8] 2) Spinning cylinder experiment [35] และ 3) Sixth crism “Prometey” PTS Experiment [35]

### 6.2.1 โจทย์ข้อที่ 5

ปัญหาความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนร่วมกับความเค้นสำหรับท่อที่ถูกฝัง โดยท่อมีรอยร้าวเป็นรูปครึ่งวงรีที่ผนังด้านนอกตั้งฉากกับรอยเชื่อม ท่อที่พิจารณาแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังตารางที่ 6.5 ท่อรับภาระความดันภายใน และอุณหภูมิคงที่ โดยความยาว และความลึกรอยร้าวทั้ง 3 กรณีเป็นขนาดรอยร้าวหลังจากท่อเสียหายแล้ว กรณีแรกรอยร้าวอยู่บนรอยเชื่อม กรณีที่สอง และสามรอยร้าวอยู่นอกรอยเชื่อม สมบัติวัสดุของทั้ง 3 กรณีแสดงดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.5 พารามิเตอร์สำหรับโจทย์ปัญหาข้อที่ 5 [8]

| กรณี | รัศมีภายใน<br>(mm) | ความหนา<br>(mm) | อุณหภูมิ<br>(°C) | ความดัน<br>(MPa) | ความยาว<br>รอยร้าว<br>(mm) | ความลึก<br>รอยร้าว<br>(mm) |
|------|--------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1    | 356                | 6.35            | 40               | 7.26             | 720                        | 3.80                       |
| 2    | 610                | 7.14            | 40               | 6.00             | 31,000                     | 3.80                       |
| 3    | 610                | 7.30            | 40               | 6.00             | 38,000                     | 3.80                       |

ตารางที่ 6.6 สมบัติวัสดุของโจทท์ปัญหาข้อที่ 5 [8]

| กรณี | ความแข็งแรงคราก<br>(MPa) | ความแข็งแรงสูงสุด<br>(MPa) | ความต้านทานการแตกหัก<br>(MPa $\sqrt{m}$ ) |
|------|--------------------------|----------------------------|---|
| 1    | 593                      | 721                        | 40  |
| 2    | 458                      | 614                        | 125                                       |
| 3    | 460                      | 558                        | 125                                       |

มอดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 207 MPa  
อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.3  
ASME Exemption curve A

เนื่องจากความยาวรอยร้าวของทั้ง 3 กรณีมากกว่า 200 mm จึงไม่สามารถประเมินการคงสภาพระดับ 1 และไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุจึงไม่สามารถประเมินการคงสภาพด้วยระดับ 3 (ทางเลือก B) ได้ จึงประเมินการคงสภาพระดับ 2 ได้เพียงอย่างเดียว โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นที่ชิ้นส่วนจะเสียหายเท่ากับ  $2.3E-2$  และสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับ 0.1 และเนื่องจากไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุจึงกำหนดให้ FAD cut-off เท่ากับ 1.00 สำหรับความต้านทานการแตกหักใช้ความต้านทานการแตกหักที่โจทท์กำหนดมาให้โดยตรง (ตารางที่ 6.6) สำหรับความเค้นตกค้างกรณีแรกจะพิจารณาผลของความเค้นตกค้างเนื่องจากรอยร้าวอยู่บนรอยเชื่อมโดยรอยเชื่อมไม่ผ่าน PWTH กรณีที่สอง และสามจะไม่พิจารณาผลของความเค้นตกค้างเนื่องจากรอยร้าวอยู่บนรอยเชื่อม

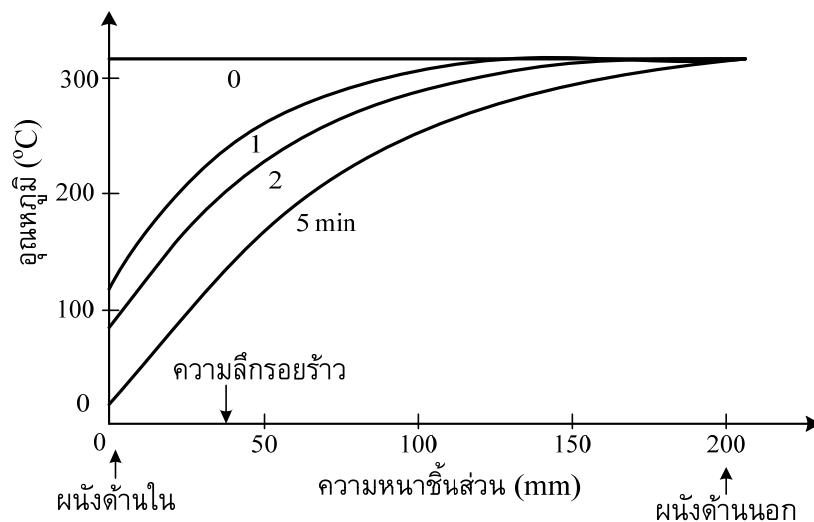
ตารางที่ 6.7 แสดงผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 ของทั้ง 3 กรณี ซึ่งตรงกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง กล่าวคือ ชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวทั้งสามกรณีจะเสียหาย จากตารางจะเห็นว่ากรณีที่สอง และสามพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว และความเค้นอ้างอิงทุติยภูมิมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากทั้งสองกรณีรอยร้าวอยู่บนรอยเชื่อมโปรแกรมจึงประมาณค่าความเค้นตกค้างเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้จะเห็นว่าที่ตำแหน่งลึกสุดพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งผิวของรอยร้าว แสดงว่าตำแหน่งดังกล่าวมีโอกาสเสียหายมากกว่า และทุกกรณีอัตราส่วนภาระปฐมภูมิ  $L_r$  จะมากกว่าอัตราส่วนความต้านทานการแตกหัก  $K_r$  แสดงว่าชิ้นส่วนมีโอกาสเสียหายจากการครากทั้งหน้าตัดมากกว่าการแตกหัก เมื่อนำจุดประเมิน  $(L_r, K_r)$  ไปพล็อตบนแผนภาพความเสียหาย จุดประเมินที่ได้จะอยู่นอกเส้นโค้งความเสียหายทุกกรณี แสดงว่าชิ้นส่วนไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ทั้ง 3 กรณี ดังนั้นโปรแกรมจึงแสดงผลการประเมินว่าชิ้นส่วนเสียหาย

ตารางที่ 6.7 ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 สำหรับโจทยข้อที่ 5

| กรณี | ตำแหน่ง | พารามิเตอร์<br>ปลายรอยร้าว<br>(MPa $\sqrt{m}$ ) |           | ความเค้นอ้างอิง<br>(MPa) |           | จุดประเมิน |       | ผลการ<br>ประเมิน |
|------|---------|---|-----------|--------------------------|-----------|------------|-------|------------------|
|      |         | ปฐมภูมิ   | ทุติยภูมิ | ปฐมภูมิ                  | ทุติยภูมิ | $L_r$      | $K_r$ |                  |
| 1    | ผิว     | 9   | 4         | 1,085                    | 530       | 1.83       | 0.243 | เสียหาย          |
|      | ลึกสุด  | 147   | 70        |                          |           |            | 4.194 | เสียหาย          |
| 2    | ผิว     | 10  | 0         | 1,350                    | 0         | 2.27       | 0.083 | เสียหาย          |
|      | ลึกสุด  | 159   | 0         |                          |           |            | 1.275 | เสียหาย          |
| 3    | ผิว     | 10  | 0         | 1,290                    | 0         | 2.79       | 0.080 | เสียหาย          |
|      | ลึกสุด  | 152   | 0         |                          |           |            | 1.212 | เสียหาย          |

### 6.2.3 โจทย์ข้อที่ 6

Spinning cylinder experiment เป็นปัญหาอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด Spinning cylinder ทำจากวัสดุคือ A 508 Class 3 steel ซึ่งมีสมบัติวัสดุแสดงดังตารางที่ 6.8 มีรัศมีภายใน และภายนอกเท่ากับ 1200 mm และ 1400 mm ตามลำดับ Spinning cylinder หมุนด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ 530 rpm และถูกทำให้ร้อนจากผนังด้านในจนมีอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 300 °C จากนั้นลดอุณหภูมิลงอย่างทันทีทันใด ทำให้อุณหภูมิที่ในผนังของชิ้นส่วนเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังรูปที่ 6.9 Spinning cylinder มีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีที่ผนังด้านใน ขนาดความยาว และความลึกรอยร้าวเท่ากับ 70 mm และ 40 mm ตามลำดับ



รูปที่ 6.9 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆ บนผนังถึงเก็บความดันสำหรับโจทยข้อที่ 6 [35]



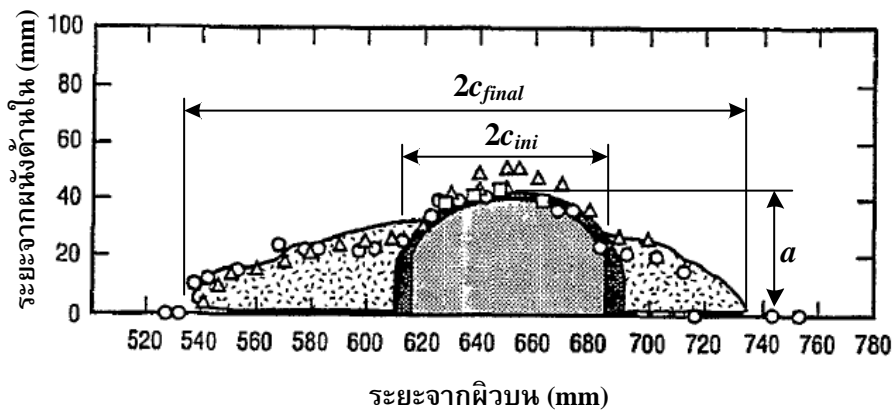
ตารางที่ 6.8 สมบัติวัสดุสำหรับโจทย์ข้อที่ 6

| เวลา<br>(นาที) | อุณหภูมิ<br>(°C) | ความแข็งแรง<br>แรงคราก<br>(MPa) | ความแข็งแรง<br>แรงสูงสุด<br>(MPa) | มอดูลัส<br>ความยืดหยุ่น<br>(GPa) | พลังงาน<br>Charpy-V notch<br>(J) |
|----------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0              | 305              | 521                             | 660                               | 212                              | 90                               |
| 1              | 100              | 540                             | 681                               | 199                              | 52                               |
|                | 261              | 524                             | 661                               | 190                              | 90                               |
| 2              | 61               | 544                             | 685                               | 204                              | 36                               |
|                | 226              | 527                             | 663                               | 191                              | 90                               |
| 5              | 19               | 548                             | 690                               | 209                              | 25                               |
|                | 152              | 535                             | 667                               | 192                              | 90                               |

อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.28

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเท่ากับ  $11.46 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

หลังจากหยุดการทดสอบพบว่าชิ้นส่วนยังคงปลอดภัย โดยชิ้นส่วนเสียหายที่ผนังด้านในสังเกตเห็นได้จากบริเวณผิวรอยร้าวขนาดรอยร้าวจะโตขึ้นจากรอยร้าวเดิม  $2c_{ini}$  จนมีความยาวรอยร้าวสุดท้าย  $2c_{final}$  เท่ากับ 190 mm ในขณะที่ตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าว  $a$  มีขนาดเท่าเดิมคือ 40 mm ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 การเติบโตของรอยร้าวจริงของถังเก็บความดันสำหรับโจทย์ข้อที่ 6

( $\Delta$ ,  $o$  และ  $\square$  แสดงการวัดขนาดรอยร้าวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก) [35]

จะเห็นว่าปัญหาข้างต้นเป็นปัญหาที่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นต้องแบ่งการประเมินออกเป็น 4 ตำแหน่งเวลา คือ ณ เวลาเท่ากับ 0, 1, 2 และ 5 นาที ตามลำดับ โดยการประเมินจะใช้การประเมินการคงสภาพระดับ 2 เพราะเป็นการประเมินปัญหาที่ซับซ้อน และมีข้อมูลที่จำเป็น

สำหรับการประเมินระดับ 2 อย่างครบถ้วน สำหรับการประเมิน ณ เวลาเท่ากับศูนย์จะได้ผล การประเมินทั้งตำแหน่งผิว และตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าว สำหรับเวลาอื่นๆ จะพิจารณาที่ ตำแหน่งผิว และตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าวตำแหน่งละครั้ง โดยใช้สมบัติวัสดุที่ต่างกัน เช่น ณ เวลา 1 นาที หากพิจารณาที่ตำแหน่งผิวรอยร้าว และตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าวจะใช้สมบัติวัสดุ ที่อุณหภูมิ 100 °C และ 261 °C ตามลำดับ สำหรับภาระที่ต้องพิจารณามี 2 ชนิดคือ

1) ภาระเชิงกล หาได้จากสมการ (ก.7) ซึ่งหลังจากแทนค่าต่างๆ แล้วจะได้ฟังก์ชันการ กระจายความเค้นตามความหนาในรูปฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสี่ตั้งสมการ (6.1) จากนั้นนำ สัมประสิทธิ์จากสมการ (6.1) แทนในโปรแกรมเพื่อคำนวณหาความเค้นตัด ความเค้นเมมเบรน ความเค้นอ้างอิง และพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวสำหรับภาระปฐมภูมิ ต่อไป

$$\sigma_o = 0.048\left(\frac{x}{t}\right)^4 - 0.346\left(\frac{x}{t}\right)^3 + 1.392\left(\frac{x}{t}\right)^2 - 9.759\left(\frac{x}{t}\right) + 45 \quad (6.1)$$

เมื่อ  $\sigma_o$  คือความเค้นตามเส้นรอบวง หน่วยเป็น MPa  $x$  คือ ระยะทางที่วัดจากผนังด้านใน ท่อ  $t$  คือ ความหนาท่อ หน่วยเป็น mm

2) ภาระเชิงความร้อน ผู้ประเมินต้องหาฟังก์ชันการกระจายของอุณหภูมิตามความหนา ในรูปโพลิโนเมียลกำลังสี่ตั้งสมการ (6.2), (6.3) และ (6.4) ณ เวลา 1, 2 และ 5 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำสัมประสิทธิ์จากสมการดังกล่าวแทนในโปรแกรม เพื่อคำนวณหาความเค้นตัด ความเค้น เมมเบรน ความเค้นอ้างอิง และพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวสำหรับภาระทุติยภูมิที่เวลาต่างๆ

$$T_{1\min} = -1077\left(\frac{x}{t}\right)^4 + 2972\left(\frac{x}{t}\right)^3 - 2994\left(\frac{x}{t}\right)^2 + 1305\left(\frac{x}{t}\right) + 98 \quad (6.2)$$

$$T_{2\min} = -633\left(\frac{x}{t}\right)^4 + 1914\left(\frac{x}{t}\right)^3 - 2231\left(\frac{x}{t}\right)^2 + 1188\left(\frac{x}{t}\right) + 63 \quad (6.3)$$

$$T_{5\min} = -5.434\left(\frac{x}{t}\right)^4 + 265\left(\frac{x}{t}\right)^3 - 790\left(\frac{x}{t}\right)^2 + 818\left(\frac{x}{t}\right) + 18 \quad (6.4)$$

เมื่อ  $T_{1\min}$ ,  $T_{2\min}$  และ  $T_{5\min}$  คือ อุณหภูมิบนความหนาท่อ ณ เวลาเท่ากับ 1, 2 และ 5 นาที ตามลำดับ หน่วยเป็น °C  $x$  คือ ระยะทางที่วัดจากผนังด้านในท่อ  $t$  คือ ความหนาท่อ หน่วยเป็น mm

ทั้งนี้ผลเฉลยความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิที่โปรแกรมเตรียมไว้ตั้งสมการ (ก.6) ใช้กับ ปัญหาความร้อนที่มอดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าคงที่ จึงใช้มอดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิประเมิน ซึ่งเป็นอุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิที่ใช้หาค่าความต้านทานการแตกหัก

สำหรับความต้านทานการแตกหัก เนื่องจากไม่มีความต้านทานการแตกหักจริงของวัสดุ แต่ทราบพลังงาน Charpy-V notch ที่อุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 6.8) ดังนั้นจะใช้สมการของ Barsom [14] (สมการ (ซ.3)) และสมการของ WRC 265 (สมการ (ซ.2)) ประมาณความต้านทานการแตกหักสำหรับช่วง upper shelf และช่วง transition region ตามลำดับ สำหรับปัญหานี้จะใช้สมการของ Barsom เมื่อพลังงาน Charpy-V notch มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 90 J และถือว่าเป็นความต้านทานการแตกหักค่ากลาง

ทั้งนี้กำหนดให้ความน่าจะเป็นที่ชิ้นส่วนจะเสียหายเท่ากับ  $2.3E-2$  และสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับ 0.1 และกำหนดให้ FAD cut-off เท่ากับ 1.00 เนื่องจากไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ

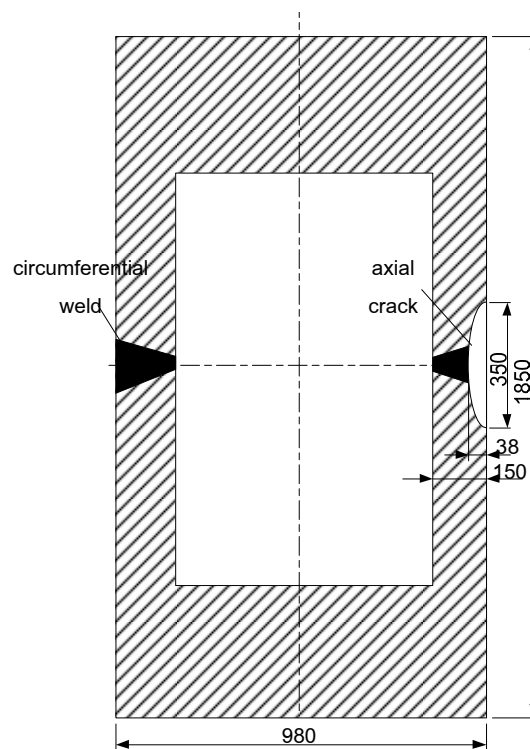
ตารางที่ 6.9 ผลการประเมินระดับ 2 แสดงให้เห็นว่าชิ้นส่วนเริ่มเสียหายจากการแตกหัก (ภายใต้เกณฑ์การกำเนิดรอยร้าว) ณ เวลา 2 นาที โดยการแตกหักเกิดขึ้นที่ตำแหน่งผิวรอยร้าว และจะเห็นว่าทุกกรณีมีอัตราส่วนภาระประมุข  $L_r$  น้อยกว่า 1 มาก จึงสรุปได้ว่าชิ้นส่วนไม่มีโอกาสเสียหายจากการครากทั้งหน้าตัด และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนความต้านทานการแตกหัก  $K_r$  จะพบว่านอกจาก ณ เวลาเริ่มต้นตำแหน่งผิวรอยร้าวมี  $K_r$  สูงกว่าตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าว จึงสรุปได้ว่าที่ตำแหน่งผิวรอยร้าว (ผนังด้านนอกท่อ) มีโอกาสเสียหายจากการแตกหักมากกว่า ตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าว (ผนังด้านนอกท่อ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง (รูปที่ 6.10) เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวรอยร้าวต่ำกว่าตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าว ส่งผลให้ตำแหน่งผิวรอยร้าวมีโอกาสแตกหักแบบเปราะสูงกว่าตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าว เพราะความต้านทานการแตกหักของวัสดุโดยทั่วไปจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

ตารางที่ 6.9 ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 สำหรับโจทย์ข้อที่ 6

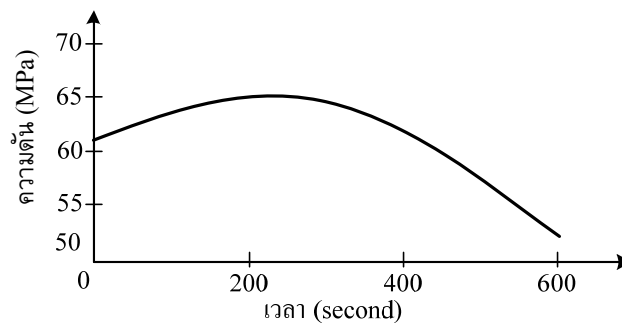
| เวลา (นาที) | ตำแหน่งที่สนใจ | อุณหภูมิ (°C) | ความต้านทานการแตกหัก ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) | จุดประเมิน |       | ผลการประเมินระดับ 2 |
|-------------|----------------|---------------|--|------------|-------|---------------------|
|             |                |               |  | $L_r$      | $K_r$ |                     |
| 0           | ผิว            | 305           | 168  | 0.102      | 0.052 | ปลอดภัย             |
|             | ลึกสุด         |               |  |            | 0.062 | ปลอดภัย             |
| 1           | ผิว            | 100           | 102  | 0.098      | 0.939 | ปลอดภัย             |
|             | ลึกสุด         | 261           | 169  | 0.101      | 0.295 | ปลอดภัย             |
| 2           | ผิว            | 61            | 81   | 0.094      | 1.829 | เสียหาย             |
|             | ลึกสุด         | 226           | 169  | 0.101      | 0.400 | ปลอดภัย             |
| 5           | ผิว            | 19            | 64   | 0.093      | 2.606 | เสียหาย             |
|             | ลึกสุด         | 152           | 170  | 0.099      | 0.555 | ปลอดภัย             |

### 6.2.3 โจทย์ข้อที่ 7

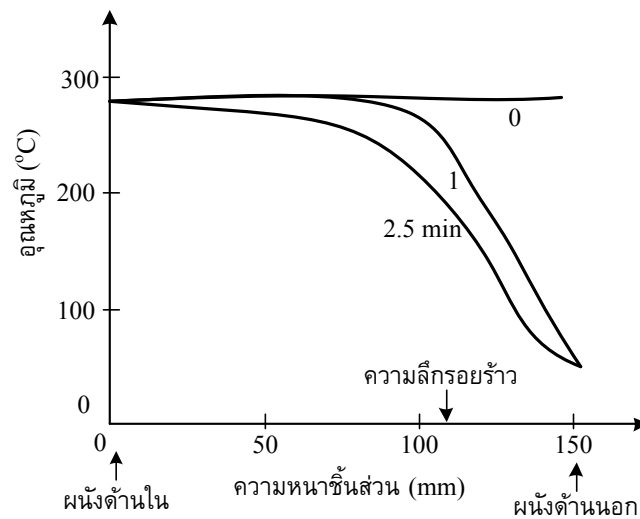
Sixth crism “Prometey” PTS Experiment เป็นปัญหาถึงเก็บความดัน (รูปที่ 6.11) รับภาระความดันภายในที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังรูปที่ 6.12 อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 280 °C จากนั้นถูกทำให้อุณหภูมิผนังด้านนอกลดลงอย่างทันทีทันใด อุณหภูมิของผนังชั้นส่วนจึงเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังรูปที่ 6.13 ถึงเก็บความดันมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อที่ผนังด้านนอก โดยรอยร้าวอยู่บริเวณรอยเชื่อม และตั้งฉากกับรอยเชื่อมตามแนวเส้นรอบวง ความยาว และความลึกของรอยร้าว เท่ากับ 350 mm และ 38 mm ตามลำดับ ถึงเก็บความดันมีรัศมีภายนอก 490 mm และหนา 150 mm และมีสมบัติวัสดุแสดงดังตารางที่ 6.10



รูปที่ 6.11 ถึงเก็บความดันที่มีรอยร้าวรูปครึ่งวงรีที่ผนังด้านนอก [35]



รูปที่ 6.12 ความดันที่เวลาต่างๆ ภายในถึงเก็บความดัน [35]

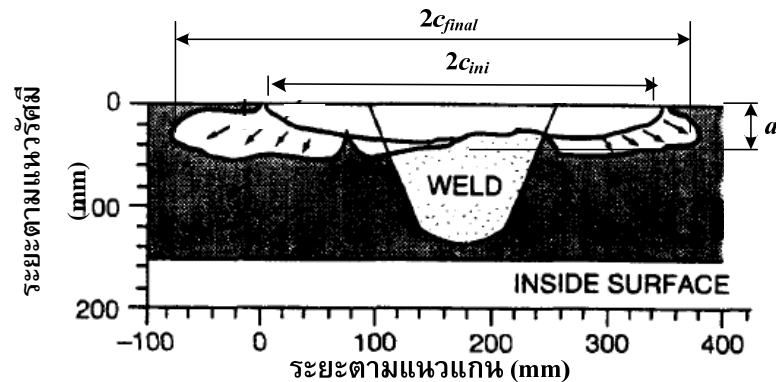


รูปที่ 6.13 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆ บนผนังถังเก็บความดันสำหรับโจทยข้อที่ 7 [35]

ตารางที่ 6.10 สมบัติวัสดุสำหรับโจทยข้อที่ 7 [35]

| สมบัติวัสดุ   |              | อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) |       |       |
|---|--------------|---------------------------------|-------|-------|
|   |              | 20                              | 150   | 200   |
| ความแข็งแรงคราก (MPa)   | นอกรอยเชื่อม | 1,037                           | 946   | 874   |
|   | บนรอยเชื่อม  | 624                             | 578   | 542   |
| ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)   | นอกรอยเชื่อม | 1,132                           | 1,063 | 1,011 |
|   | บนรอยเชื่อม  | 705                             | 661   | 627   |
| ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (GPa)  | นอกรอยเชื่อม | 206                             | 185   | 189   |
|   | บนรอยเชื่อม  | 204                             | 209   | 178   |
| อัตราส่วนปัวซอง   |              | 0.3                             | 0.3   | 0.3   |
| สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ( $\times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ ) |              | 11.70                           | 12.15 | 12.70 |
| พลังงานชาร์ปีสำหรับช่วง upper shelf มีค่าเท่ากับ 120 J                          |              |                                 |       |       |

เมื่อทดสอบเสร็จชิ้นส่วนยังคงปลอดภัย (ไม่แตกหักอย่างไร้เสถียรภาพ) โดยที่รอยร้าวมีความลึกสุดท้าย  $a$  และความยาวรอยร้าวสุดท้าย  $2c_{final}$  เท่ากับ 55 mm และ 400 mm ดังรูปที่ 6.14 ตามลำดับ



รูปที่ 6.14 การเติบโตของรอยร้าวจริงของถังเก็บความดันสำหรับโจทย์ข้อที่ 7 [35]

จะเห็นว่าปัญหาข้างต้นเป็นปัญหาที่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นต้องแบ่งการประเมินออกเป็น 3 ตำแหน่งเวลาคือ ณ เวลาเท่ากับ 0, 1 และ 2.5 นาที ตามลำดับ โดยจะการประเมินการคงสภาพระดับ 2 เพราะเป็นการประเมินปัญหาที่ซับซ้อน และมีข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการประเมินระดับ 2 อย่างครบถ้วน กรณีที่ประเมินระดับ 2 แล้วชิ้นส่วนเสียหายจะประเมินซ้ำอีกครั้งด้วยการประเมินระดับ 3 เพราะทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดทางวิศวกรรมของปัญหา [35] สำหรับการประเมิน ณ เวลาเท่ากับศูนย์จะได้ผลการประเมินทั้งตำแหน่งผิวและตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าว สำหรับเวลาอื่นๆ จะพิจารณาที่ตำแหน่งผิว และตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าวตำแหน่งละครั้ง โดยใช้สมบัตินิวตัสที่แตกต่างกันเช่นเดียวกับโจทย์ปัญหาข้อที่ 6 สำหรับภาระที่ต้องพิจารณามี 3 ชนิดคือ

1) ภาระเชิงกลเนื่องจากความดันภายใน ณ เวลาต่างๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 61 MPa 63 MPa และ 65 MPa ณ เวลาเท่ากับ 0, 1 และ 2.5 ตามลำดับ โดยนำความดันภายในแทนในโปรแกรม เพื่อคำนวณความเค้นดัด ความเค้นเมมเบรน ความเค้นอ้างอิง และพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวสำหรับภาระปฐมภูมิที่เวลาต่างๆ

2) ภาระเชิงความร้อน ผู้ประเมินต้องแทนการกระจายของอุณหภูมิตามความหนาด้วยโพลีโนเมียลกำลังสี่ดังสมการ (6.5) และ (6.6) ณ เวลา 1 และ 2.5 นาที ตามลำดับ จากนั้นแทนสัมประสิทธิ์ของสมการดังกล่าวในโปรแกรม เพื่อคำนวณความเค้นดัด ความเค้นเมมเบรน ความเค้นอ้างอิง และพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวสำหรับภาระทุติยภูมิที่เวลาต่างๆ

$$T_{1\min} = 1896 \left( \frac{x}{t} \right)^4 - 4369 \left( \frac{x}{t} \right)^3 + 2777 \left( \frac{x}{t} \right)^2 - 542 \left( \frac{x}{t} \right) + 297 \quad (6.5)$$

$$T_{2.5\min} = 1465 \left( \frac{x}{t} \right)^4 - 2938 \left( \frac{x}{t} \right)^3 + 1527 \left( \frac{x}{t} \right)^2 - 282 \left( \frac{x}{t} \right) + 286 \quad (6.6)$$

เมื่อ  $T_{1min}$  และ  $T_{2.5min}$  คือ อุณหภูมิบนความหนาต่อ ณ เวลาเท่ากับ 1 และ 2.5 นาทีตามลำดับ หน่วยเป็น  $^{\circ}C$   $x$  คือ ระยะทางที่วัดจากผนังด้านในต่อ  $t$  คือ ความหนาต่อ หน่วยเป็น mm

ทั้งนี้ผลเฉลยความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิที่โปรแกรมเตรียมไว้ตั้งสมการ (ก.6) ใช้กับ ปัญหาความร้อนที่มอดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าคงที่ จึงให้มอดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิประเมิน เช่นเดียวกับโจทย์ปัญหาข้อ 6 โดยกรณีที่พิจารณาที่ตำแหน่งผิวรอยร้าวจะใช้ข้อมูลของวัสดุ นอกรอยเชื่อม และกรณีที่พิจารณาที่ตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าวจะใช้ข้อมูลวัสดุบนรอยเชื่อม

3) ความเค้นตกค้างบนรอยเชื่อม โปรแกรมจะประมาณค่าความเค้นตกค้างจากสมการ (ฉ.8) เนื่องจากรอยเชื่อมเป็นแบบ Single-V groove ตามเส้นรอบวงที่ผ่าน PWITH มาแล้ว

สำหรับความต้านทานการแตกหักกรณีที่อุณหภูมิประเมินสูงกว่าอุณหภูมิ upper shelf ( $150^{\circ}C$  และ  $90^{\circ}C$  สำหรับบริเวณนอกรอยเชื่อม และบนรอยเชื่อม ตามลำดับ) จะประมาณค่าจากพลังงานชาร์ปีโดยใช้สมการของ Barsom (สมการ (ข.3)) และที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะประมาณค่าจากอุณหภูมิอ้างอิงของ master curve (สมการ (ข.4)) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $131^{\circ}C$  และ  $64^{\circ}C$  สำหรับนอกรอยเชื่อม และบนรอยเชื่อม ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นความต้านทานการแตกหัก ค่ากลางทั้งนี้กำหนดให้ความน่าจะเป็นที่ชิ้นส่วนจะเสียหายเท่ากับ  $2.3E-2$  และสัมประสิทธิ์ความแปรผันเท่ากับ 0.1 เพราะต้องการให้ตัวประกอบความปลอดภัยส่งผลต่อพารามิเตอร์ต่างๆ น้อยที่สุด และกำหนดให้ FAD cut-off เท่ากับอัตราส่วนระหว่าง Flow stress และความแข็งแรงคราก เนื่องจากทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ (เลือกอื่นๆ ในโปรแกรม)

ตารางที่ 6.11 ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 ซึ่งจะได้ว่าชิ้นส่วนเริ่มเสียหายจากการแตกหัก (ภายใต้ได้เกณฑ์การกำเนิดรอยร้าว) ณ เวลา 1 นาที โดยการแตกหักเกิดขึ้นที่ ตำแหน่งผิวรอยร้าว และเมื่อประเมินซ้ำอีกครั้งด้วยการประเมินระดับ 3 (ทางเลือก B) ก็ได้ผล เช่นเดิม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความต้านทานการแตกหัก  $K_r$  จะพบว่านอกจาก ณ เวลาเริ่มต้น ตำแหน่งผิวรอยร้าวมี  $K_r$  สูงกว่าตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าว จึงสรุปได้ว่าที่ตำแหน่งผิวรอยร้าว (ผนังด้านนอกต่อ) มีโอกาสเสียหายจากการแตกหักมากกว่าที่ตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าว (ผนังด้านในต่อ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง (รูปที่ 6.11) เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ ตำแหน่งผิวรอยร้าวต่ำกว่าตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าวส่งผลให้ตำแหน่งผิวรอยร้าวมีโอกาสแตกหักแบบเปราะสูงกว่าตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าวเพราะความต้านทานการแตกหักของวัสดุ โดยทั่วไปจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

ตารางที่ 6.11 ผลการประเมินการคงสภาพระดับ 2 สำหรับโจทย์ข้อที่ 7

| เวลา<br>(นาที) | ตำแหน่ง<br>ที่สนใจ | อุณหภูมิ<br>(°C) | ความ<br>ต้านทาน<br>การแตกหัก<br>(MPa√m) | จุดประเมิน |       | ผลการประเมิน |                             |
|----------------|--------------------|------------------|---|------------|-------|--------------|-----------------------------|
|                |                    |                  |   | $L_r$      | $K_r$ | ระดับ 2      | ระดับ 3<br>(ทาง<br>เลือก B) |
| 0              | ผิว                | 284              | 251                                     | 0.248      | 0.223 | ปลอดภัย      | -                           |
|                | ลึกสุด             | 284              | 203                                     | 0.389      | 0.235 | ปลอดภัย      | -                           |
| 1              | ผิว                | 60               | 48                                      | 0.217      | 1.669 | เสียหาย      | เสียหาย                     |
|                | ลึกสุด             | 211              | 203                                     | 0.411      | 0.751 | ปลอดภัย      | -                           |
| 2.5            | ผิว                | 60               | 48                                      | 0.224      | 1.698 | เสียหาย      | เสียหาย                     |
|                | ลึกสุด             | 160              | 205                                     | 0.405      | 0.762 | ปลอดภัย      | -                           |



## บทที่ 7

### สรุปผล

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ผลการออกแบบโปรแกรม ผลการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม ขีดความสามารถของโปรแกรม และแผนงานวิจัยต่อเนื่อง

#### 7.1 ผลการออกแบบโปรแกรม

โปรแกรมถูกออกแบบโปรแกรมด้วยแนวคิดเชิงวัตถุ และเขียนด้วยภาษา Delphi ซึ่งรองรับแนวคิดเชิงวัตถุ การเขียนโปรแกรมด้วยแนวคิดเชิงวัตถุประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนแรก คือการหาเนื้อหาของปัญหา สำหรับงานวิจัยนี้ปัญหาคือ เมื่อตรวจพบรอยร้าวบนท่อ หรือชิ้นส่วนทรงกระบอกสิ่งผู้รับผิดชอบต้องทำคือ การประเมินว่าชิ้นส่วนดังกล่าวสามารถใช้งานต่อไปได้หรือไม่ ซึ่งเรียกว่า การประเมินการคงสภาพ หากผลการประเมินคือ ชิ้นส่วนไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ผู้รับผิดชอบควรเปลี่ยนชิ้นส่วนดังกล่าว หรือลดภาระใช้งานลง แต่หากผลประเมินคือ ชิ้นส่วนสามารถใช้งานต่อไปได้ กิจกรรมที่ผู้รับผิดชอบต้องทำต่อไปคือ ประเมินว่าชิ้นส่วนดังกล่าวมีอายุใช้งานเหลืออีกนานแค่ไหน ซึ่งเรียกว่า การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ และกรณีที่ชิ้นส่วนรับภาระแรงดันภายในผู้รับผิดชอบอาจประเมินชิ้นส่วนว่าจะส่งสัญญาณการรั่วก่อนจะเสียหายหรือไม่ ซึ่งเรียกว่า การประเมินการรั่วก่อนการแตกหัก

ขั้นตอนที่สอง คือการหาคลาสจากเนื้อหาของปัญหา จากเนื้อหาของปัญหาสามารถสร้างคลาสต่างๆ ได้ ดังนี้ คือ

- คลาส TGUI มีหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน
- คลาส TDataBase มีหน้าที่เก็บตัวอย่างข้อมูลวัสดุ
- คลาส TAssessment มีหน้าที่เรียกใช้งานคลาสอื่นๆ ให้ทำงานตามขั้นตอนการประเมินใน API RP 579
- คลาส TMaterial มีหน้าที่เก็บข้อมูลวัสดุ หรือคำนวณสมบัติวัสดุ
- คลาส TCrackPipe มีหน้าที่เก็บขนาดท่อ ข้อมูลรอยร้าว ข้อมูลรอยเชื่อม และข้อมูลภาระ และความเค้นเนื่องจากภาระต่างๆ คลาส TCrackPipe มีคลาสลูก 3 คลาสคือ คลาส TKCSLE1 และคลาสนี้มีหน้าที่คำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวกรณีรอยร้าวรูปครึ่งวงรีขนานแกนท่อที่ผนังด้านใน และด้านนอก ตามลำดับ และคลาสนี้มีหน้าที่คำนวณพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวกรณีรอยร้าวทะลุความหนา
- คลาส TCharacterizeCrack มีหน้าที่ระบุลักษณะรอยร้าว

- คลาส TIntegrity มีหน้าที่ประเมินการคงสภาพ คลาส TIntegrity มีคลาสลูก 2 คลาส คือคลาส TSCREENING มีหน้าที่ประเมินการคงสภาพระดับ 1 และ คลาส TFAD ทำหน้าที่ประเมินการคงสภาพระดับ 2 และระดับ 3 (ทางเลือก B)
- คลาส TCrackGrowth มีหน้าที่ประเมินอายุใช้งานที่เหลือของรอยร้าว และเก็บขนาดรอยร้าวใหม่ และสถานการณ์ใช้งานในแต่ละรอบภาระ
- คลาส LBB มีหน้าที่ประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก และเก็บขนาดรอยร้าว และจำนวนรอบภาระที่ชิ้นส่วนเริ่มรื้อ

ขั้นตอนสุดท้าย การเขียนคลาสไดอะแกรม ซึ่งประยุกต์ใช้แบบแผน Player-Role ในการเขียน เนื่องจากเป็นแบบแผนที่เหมาะสมกับปัญหาที่สนใจ กล่าวคือ แบบแผน Player-Role เหมาะกับปัญหาที่มีขั้นตอนการทำงานให้เลือกได้หลายวิธี และแต่ละวิธีอาจมีขั้นตอนย่อยที่แตกต่างกัน โดยคลาสไดอะแกรมที่ออกแบบตามแบบนี้จะแบ่งการทำงานกันอย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้คลาสไดอะแกรมที่ได้ (รูปที่ 5.6) จึงแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนอินเตอร์เฟสทำหน้าที่ติดต่อระหว่างผู้ใช้งานกับโปรแกรม คือคลาส TGUI และคลาส TDataBase ส่วนสั่งการทำงานที่เรียกใช้คลาสส่วนปฏิบัติการให้ทำงานตามขั้นตอนการประเมินที่ระบุไว้ในมาตรฐาน และส่วนปฏิบัติการคือ คลาส TMaterial คลาส TCrackPipe คลาส TCharacterizeCrack คลาส TIntegrity คลาส TCrackGrowth และคลาส LBB ซึ่งมีหน้าที่เฉพาะสำหรับประเมินชิ้นส่วนตามขั้นตอนในมาตรฐาน ลักษณะการทำงานเช่นนี้ทำให้โปรแกรมมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่มเติมอัลกอริทึมใหม่ๆ ได้ง่าย และไม่สิ้นเปลืองหน่วยความจำ

สำหรับอินเตอร์เฟสเขียนด้วยโปรแกรม Delphi 7 ซึ่งออกแบบให้ง่ายต่อการใช้งาน กล่าวคือ อินเตอร์เฟสที่เขียนขึ้นมีคำแนะนำในการใช้งาน รองรับการป้อนข้อมูลได้หลายรูปแบบ มีคำเตือนกรณีกรอกข้อมูลไม่ครบ หรือไม่ถูกต้อง มีตัวอย่างข้อมูลให้เลือกใช้ มีรูปประกอบระหว่างการประเมิน และผู้ประเมินสามารถพิมพ์รายงานสรุปการประเมินได้ เป็นต้น

## 7.2 ผลการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม และการประยุกต์ใช้งานโปรแกรมกับปัญหาที่ซับซ้อน สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมใช้ปัญหาตัวอย่างซึ่งสอดคล้องกับขีดความสามารถของโปรแกรมจากมาตรฐาน โดยประเมินด้วยโปรแกรมที่ออกแบบเทียบกับการประเมินโดยตรง ซึ่งใช้โปรแกรม Mathcad ช่วยในการคำนวณ โดยตรวจสอบปัญหาการประเมินการคงสภาพระดับ 1 ระดับ 2 และระดับ 3 (ทางเลือก B) การประเมินอายุใช้งานที่เหลือ และการประเมินการรื้อก่อนการแตกหัก ตามลำดับ ผลการตรวจสอบพบว่าโปรแกรมทำงานได้ถูกต้องตรงกับการคำนวณโดยตรง

สำหรับการประยุกต์ใช้งานโปรแกรมกับปัญหาที่ซับซ้อน แบ่งออกเป็นปัญหาที่มีรอยร้าว รับภาระความดันภายในคงที่ ปัญหาถึงเก็บความดันถูกหมุนด้วยความเร็วคงที่ และอุณหภูมิ ภายในเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และปัญหาถึงเก็บความดันรับความดันภายในเปลี่ยนแปลง ตามเวลา และอุณหภูมิภายนอกเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ตามลำดับ ผลการตรวจสอบ พบว่าโปรแกรมให้ผลการประเมินที่สอดคล้องกับกายภาพจริง

### 7.3 ขีดความสามารถของโปรแกรม

ข้อจำกัดของโปรแกรมที่ออกแบบมี ดังนี้

- 1) ใช้ได้กับชิ้นส่วนรูปทรงกระบอก เช่น ท่อ และภาชนะความดันทรงกระบอก เป็นต้น
- 2) ใช้ได้กับรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีวางตัวขนานแกนที่ผนังด้านใน และด้านนอกของ ชิ้นส่วน
- 3) รองรับการวิเคราะห์ชิ้นส่วนภายใต้ความเค้นปฐมภูมิเนื่องจากความดันภายใน หรือ ความเค้นปฐมภูมิในรูปฟังก์ชันการกระจายความเค้นตามความหนาในรูปฟังก์ชัน โพลีโนเมียลกำลังสี่
- 4) รองรับการวิเคราะห์ชิ้นส่วนภายใต้ความเค้นทุติยภูมิคือ ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ และความเค้นตกค้าง โดยการกระจายความเค้นตกค้างตามแนวความหนา สมมติให้เป็นฟังก์ชันคงที่
- 5) สามารถประเมินการคงสภาพระดับ 1 ระดับ 2 และระดับ 3 (ทางเลือก B) ตาม API RP 579
- 6) สามารถประเมินอายุใช้งานที่เหลือของชิ้นส่วนที่รับภาระลำแอมพลิจูดคงที่ โดยใช้ แบบจำลองของ Walker
- 7) สามารถประเมินว่าชิ้นส่วนจะร้าวก่อนแตกหักหรือไม่ โดยชิ้นส่วนร้าวเมื่ออัตราส่วน ระหว่างความลึกรอยร้าว และความหนาชิ้นส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.8
- 8) สามารถระบุลักษณะรอยร้าวกรณีรอยร้าวมีมากที่สุด 2 รอย โดยอัตราส่วนความเค้น หลักหาจากความเค้นปฐมภูมิ
- 9) พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวกรณีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรี และรอยร้าวทะลุความหนา หาด้วยระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนัก และวิธี Influence function ตามลำดับ
- 10) การป้อนข้อมูลเข้าสามารถทำได้ในหน่วย SI

#### 7.4 แนะนำงานวิจัยต่อเนื่อง

จากความรู้ความเข้าใจระหว่างดำเนินงานวิจัยมีประเด็นที่น่าสนใจสามารถทำเป็นงานวิจัยต่อเนื่องได้ ดังนี้

การปรับปรุงโครงสร้างของโปรแกรม โดยอาจประยุกต์ใช้แบบแผนอื่นๆ หรือปรับปรุงการเขียนโปรแกรมให้เป็นโปรแกรมเชิงวัตถุมากยิ่งขึ้น เช่น อาจลองออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมใหม่จากนั้นดูผลการทำงานของโปรแกรมที่ออกแบบโครงสร้างขึ้นมาใหม่ว่าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ ผลจากการลองผิดลองถูกเช่นนี้จะทำให้ได้แบบแผนในการออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมที่เหมาะสมกับปัญหาที่สนใจจริงๆ เป็นต้น

การนำมาตรฐาน หรืออัลกอริทึมใหม่ๆ มาประยุกต์ใช้เพิ่มเติมในการเขียนโปรแกรมเพื่อให้ผลการประเมินแม่นยำยิ่งขึ้น เช่น การระบุลักษณะรอยร้าวอาจสืบค้นเกณฑ์ใหม่ๆ จากมาตรฐานอื่น หรือบทความทางวิชาการเพื่อให้ได้ผลการระบุลักษณะรอยร้าวที่ให้ผลการประเมินได้ใกล้เคียงกับปัญหามากขึ้น และการหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวอาจสืบค้นผลงานทางวิชาการใหม่ๆ เพื่อหาผลเฉลยปลายรอยร้าวกรณีที่ชิ้นส่วนมีรอยร้าวมากกว่า 1 รอย เป็นต้น

การปรับปรุงอินเตอร์เฟซให้ใช้งานได้ง่ายยิ่งขึ้น เช่น ออกแบบอินเตอร์เฟซให้รองรับข้อมูลป้อนเข้าในหน่วยต่างๆ ได้อย่างอิสระ การออกแบบรายงานสรุปผลการประเมินให้มีทั้งข้อความและรูปภาพ (แผนภาพความเสียหาย) ในไฟล์เดียวกัน และปรับปรุงโค้ดในคลาส TGUI ให้มีลักษณะเป็นโปรแกรมเชิงวัตถุมากขึ้น โดยพยายามลดเงื่อนไขในการตัดสินใจระหว่างการแสดงผลในคลาสให้เหลือน้อยที่สุด เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

- [1] National Transportation Safety Board. Pipeline Accident Brief. (Report No. NTSB/PAB-10/01). Washington, D.C., 2008.
- [2] HInt Dossiers. Gas Pipeline Explosion at Ghislenghien, Belgium. Hazards intelligence (14 February 2005).
- [3] National Transportation Safety Board. Pacific Gas and Electric Company Natural Gas Transmission Pipeline Rupture and Fire.(Report No. NTSB/PAR-11/01). Washington, D. C., 2011.
- [4] Wikipedia. List of pipeline accidents [Online]. 2013. Available from : [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_pipeline\\_accidents](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pipeline_accidents) [2013, Apr 29]
- [5] Transportation Safety Board of Canada. Crude oil Pipe-Line Leak. (Pipeline Investigation Report No. P09H0084). Canada, 2010.
- [6] Barbosa, C., de Souza, S. M. C., Centeno, R. O., Abud I. C., and Ferraz, O. B. Failure analysis of pipes used in a hydrodesulfuration system of a petrochemical plant. Engineering Failure Analysis 13 (2006) : 1076-1091.
- [7] Hasan, F., Iqbal, J. and Ahmed F. Stress corrosion failure of high pressure gas pipeline. Engineering failure analysis 14 (2007) : 801–809.
- [8] Manfredi C., Otegui J. L. Failures by SCC in buried pipelines. Engineering Failure Analysis 9 (2002) : 495–509.
- [9] Transportation Safety Board of Canada, pipeline investigation, Natural Gas Pipeline Rupture. ( Pipeline Investigation Report No.P11H0011). Canada, 2012.
- [10] Richard P. Gangloff. Environmental Cracking-Corrosion Fatigue. Virginia, 2012.
- [11] Milne I., Ainsworth R. A. and Chell.Predicting G. G.. The R6 procedure: recent developments and comparison with alternative approaches. International Journal of Pressure Vessels and Piping 77 (2000) : 895-903.
- [12] British Standards Institution. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures BS 7910:2005. London, 2005.
- [13] Ruiz Ocejo J., Gonzalez-Posada M. A., Gutierrez-Solana F. and Gorrochategui I. Review of existing procedure. (Report No. Report/SINTAP/UC/04). Cantabria : University of Cantabria, 1996.

- [14] American petroleum institute and the American society of mechanical engineers. Fitness-For-Service: API recommended practice 579. Washington, D.C : API Publishing Services, 2007.
- [15] Ainsworth R. A., Bannister A. C. and Zerbst U. An overview of the European flaw assessment procedure SINTAP and its validation. International Journal of Pressure Vessels and Piping 77 (2000) : 869-876.
- [16] BMT Fleet Technology Ltd. Structural integrity management software [Online]. Available from : <http://www.bmt-software-solutions.com/downloads/BMTFlawCheck.pdf> [2013, Apr 29]
- [17] TWI Ltd. Engineering fitness-for-service assessment software [Online]. Available from: <http://www.twisoftware.com> [2013, Apr 29]
- [18] Technical Toolbox Ltd, Fitness-for-Service-Toolbox [Online]. Available from: <http://dev.toolbox.com/products/brochures/Fitness4ServiceToolbox.pdf> [2013, Apr 29]
- [19] Fraunhofer IWM. Fracture assessment software IWM VERB 8.0 [Online]. Available from : <http://www.en.iwm.fraunhofer.de/profile/networking/projects-with-their-own-web-sites-/verb/> [2013, Apr 29]
- [20] Taljat H., Raikot H., Mikkolas T. P. J. and Zhang Z. L. Structural safety analysis with engineering integrity assessment tools. Computers & Structures Vol. 64, No. 1-4 (1997) : 759-770.
- [21] Zarko Gajic. Learning object oriented programming with delphi [Online]. Available from: [http://delphi.about.com/od/course/a/oop\\_intro.htm](http://delphi.about.com/od/course/a/oop_intro.htm) [2013, Apr 29]
- [22] เนติพันธ์ พุทธิรักษ์. การออกแบบโปรแกรมเชิงวัตถุสำหรับการประเมินการคงสภาพท่อที่มีรอยร้าว ด้วยระเบียบวิธี R6. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [23] จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ. กลศาสตร์การแตกหัก. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มิสเตอร์ก็อปปี๊ พิมพ์ครั้งที่ 1, 2553.
- [24] จตุพร แก้วอ่อน และจีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ. โปรแกรมประเมินการคงสภาพของท่อที่มีรอยร้าวด้วยมาตรฐาน API 579. ใน รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, หน้า 41. 24-27 ตุลาคม 2555 ณ โรงแรมดุสิต ไฮส์แลนด์ รีสอร์ท จังหวัดเชียงราย, 2555.

- [25] Stan Rosinski. Application Of Master Curve Fracture Toughness Methodology For Ferritic Steels. (Report No. TR-108390). Charlotte : Electric Power Research Institute, 1998.
- [26] Ainsworth R. A., Schwalbe K. H. Comprehensive structural integrity volume 7 practical failure assessment methods. Oxford : Elsevier Pergamon, 2003.
- [27] Wikipedia. Object-oriented programming [Online]. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Object-oriented\\_programming](http://en.wikipedia.org/wiki/Object-oriented_programming) [2013, Apr 29]
- [28] Jan Rune Holmevik. Compiling SIMULA: A Historical Study of Technological Genesis. IEEE Annals of the history of computer, Vol. 16, No. 4 (1994) : 25-37.
- [29] Stithedland E. Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System. (Report No. 296). Lincoln Lalboatory Massachusetts Institute of Technology, 1963.
- [30] Alan C. Kay. The Early History Of Smalltalk. ACM SIGPLAN Notices, Volume 28, No.3 (March 1993) : 69-95.
- [31] American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Committee. 2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code : An International Code / ASME Boiler and pressure vessel committee. New York : American Society of Mechanical Engineers, 2007.
- [32] ปราโมทย์ เตชะอำไพ และนิพนธ์ วรรณโสภาคย์. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [33] สัจจะ จรัสรุ่งรวีวร และจักรพงษ์ สุขระเสริฐ. เริ่มต้นอย่างมืออาชีพด้วย Delphi 7 ฉบับสมบูรณ์. นนทบุรี : ไอดีซี พรีเมียร์, 2547.
- [34] American Petroleum Institute and The American Society Of Mechanical Engineers. Fitness-For-Service Example problem manual. Washington, D. C. : API Publishing Services. 2007.
- [35] The OECD European Nuclear Agency Energy. FALSIRE : Phase II : CSNI Project for Fracture Analyses of Large-Scale International Reference Experiments. (Report No. NEA/CSNI/R(96)1). The OECD Nuclear Agency Energy, 1958.
- [36] ASTM E 1820, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

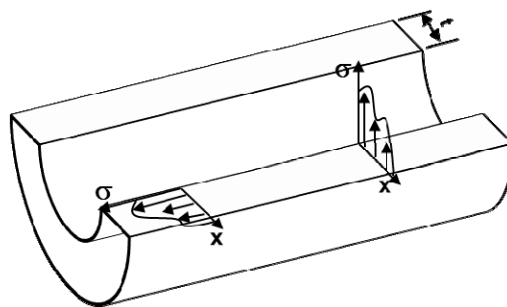
ภาคผนวก



ภาคผนวก  
การกระจายความเค้น

ก.1 การกระจายความเค้นในรูปฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสี่

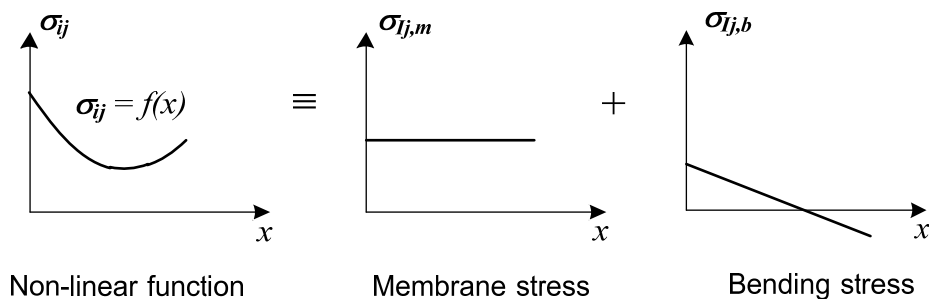
รูปที่ ก.1 การกระจายความเค้นบนผนังชิ้นส่วนโดยส่วนใหญ่เป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนมาตรฐานจึงแนะนำให้เปลี่ยนฟังก์ชันดังกล่าวให้อยู่ในรูปฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสี่ตามความหนาของชิ้นส่วน ดังสมการ (ก.1)



รูปที่ ก.1 การกระจายความเค้นบนผนังท่อ

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{x}{t}\right) + \sigma_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{x}{t}\right)^4 \quad (\text{ก.1})$$

รูปที่ ก.2 เพื่อให้ง่ายสำหรับการคำนวณยิ่งขึ้นมาตรฐานแนะนำให้เปลี่ยนการกระจายความเค้นในรูปฟังก์ชันที่ซับซ้อน (ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น)  $\sigma_{ij}$  ให้อยู่ในรูปผลบวกของความเค้นคงที่หรือความเค้นเมมเบรน  $\sigma_{ij,m}$  และความเค้นสมมาตรที่แปรผันแบบเชิงเส้น หรือความเค้นดัด  $\sigma_{ij,b}$  ด้วยสมการ (ก.2) และ (ก.3) ตามลำดับ



รูปที่ ก.2 การเปลี่ยนฟังก์ชันความเค้นให้อยู่ในรูปผลบวกของฟังก์ชันอย่างง่าย

$$\sigma_{ij,m} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_{ij} dx \quad (\text{ก.2})$$

$$\sigma_{ij,b} = \frac{6}{t^2} \int_0^t \sigma_{ij} \left( \frac{t}{2} - x \right) dx \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ  $\sigma_{ij}$  คือ องค์ประกอบของความเค้น  $x$  คือ ระยะจากผิวด้านใน  $t$  คือ ความหนา

กรณีฟังก์ชันการกระจายของความเค้นตามแนวความหนาของชิ้นส่วนอยู่ในรูปฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสี่ ความเค้นเมมเบรน และความเค้นตัดคำนวณจากสมการ (ก.4) และ (ก.5) ตามลำดับ

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

$$\sigma_b = -\frac{\sigma_1}{2} - \frac{\sigma_2}{3} - \frac{9\sigma_3}{4} - \frac{6\sigma_4}{15} \quad (\text{ก.5})$$

เมื่อ  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  และ  $\sigma_4$  คือ สัมประสิทธิ์ของความเค้นจากสมการ (ก.1)

## ก.2 ตัวอย่างผลเฉลยความเค้นตามเส้นรอบวง

### 1) ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E_y}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \left( \frac{r^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \int_{R_i}^{R_o} T r dr + \int_{R_i}^r T r dr + T r^2 \right) \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ  $\sigma_\theta$  คือ ความเค้นตามเส้นรอบวง (hoop stress) เนื่องจากอุณหภูมิ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน  $E_y$  คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น  $\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง  $R_i$  และ  $R_o$  คือ รัศมีภายใน และภายนอกชิ้นส่วน  $T$  คือ อุณหภูมิซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะ  $r$  วัดจากศูนย์กลางทรงกระบอก

### 2) ความเค้นเนื่องจากการหมุน

$$\sigma_\theta = \rho \frac{\omega^2}{8} \left( (3+\nu) \left( R_i^2 + R_o^2 + \frac{R_i^2 R_o^2}{r^2} \right) - (1+3\nu) r^2 \right) \quad (\text{ก.7})$$

เมื่อ  $\sigma_\theta$  คือความเค้นตามเส้นรอบวงเนื่องจากการหมุน  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุ  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุน  $\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง  $R_i$ ,  $R_o$  คือ รัศมีภายใน และภายนอกท่อ ตามลำดับ  $r$  คือ ระยะวัดจากกึ่งกลางท่อ

### 3) ความเค้นเนื่องจากความดันภายใน

$$\sigma_{\theta} = \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \left( 1 + \frac{R_o^2}{R_i^2} \right) \quad (\text{ก.8})$$

กรณีความเค้นเนื่องจากความดันภายในมาตรฐานเตรียมผลเฉลยสำหรับหาความเค้นเมมเบรน และความเค้นดัดไว้ดังสมการ (ก.9) และ (ก.10) ตามลำดับ

$$\sigma_m = \frac{pR_i}{t} \quad (\text{ก.9})$$

$$\sigma_b = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[ \frac{t}{R_i} - \frac{3}{2} \left( \frac{t}{R_i} \right)^2 + \frac{9}{5} \left( \frac{t}{R_i} \right)^3 \right] \quad (\text{ก.10})$$

เมื่อ  $\sigma_{\theta}$  คือความเค้นตามเส้นรอบวงเนื่องจากความดันภายใน  $\sigma_m$  และ  $\sigma_b$  คือความเค้นเมมเบรน และความเค้นดัด ตามลำดับ  $R_i$ ,  $R_o$  และ  $t$  คือ รัศมีภายใน รัศมีภายนอก และความหนาชิ้นส่วน ตามลำดับ  $p$  คือ ความดันภายในต่อ

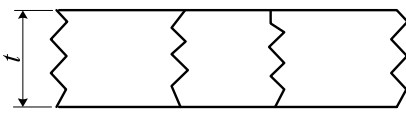
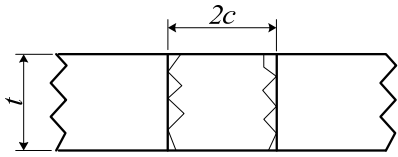
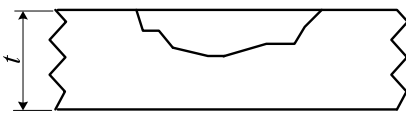
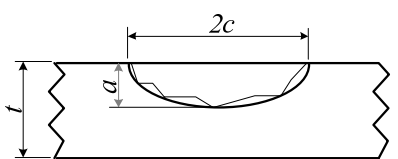
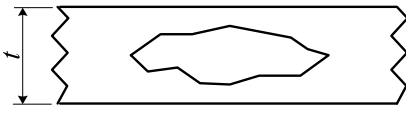
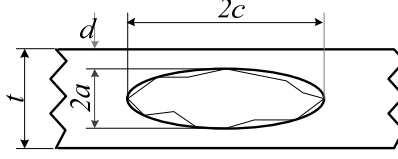
## ภาคผนวก ข

### การระบุลักษณะรอยร้าว

รอยร้าวที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นรอยร้าวที่ระบุรูปร่างชัดเจนไม่ได้ ทำให้ระบุขนาดรอยร้าวยาก และตามมาด้วยความยากในการหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวในการประเมินการคงสภาพของโครงสร้าง จึงจำเป็นต้องจัดการกับรอยร้าวเพื่อให้การประเมินทำได้ง่ายขึ้น คำแนะนำสำหรับจัดการกับรอยร้าวเรียกว่า การระบุลักษณะรอยร้าว [14], [23] ซึ่งประกอบด้วย การระบุรอยร้าวอุดมคติ การเปลี่ยนการวางตัวของรอยร้าว การพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าว และการเปลี่ยนชนิดรอยร้าว

1) การระบุรอยร้าวอุดมคติ หมายถึง การล้อมรอบขอบหน้ารอยร้าวจริงด้วยเส้นตรงหรือเส้นโค้งเรียบ เพื่อให้ได้รอยร้าวที่มีรูปร่างเป็นรูปเรขาคณิตพื้นฐานซึ่งเรียกว่า รอยร้าวอุดมคติ รอยร้าวอุดมคติที่ได้ต้องมีเค้าโครงของรอยร้าวเดิม และให้ผลการประเมินที่มีความปลอดภัยมากขึ้น ตารางที่ ข.1 แสดงตัวอย่างการระบุรอยร้าวที่พบจริงให้เป็นรอยร้าวอุดมคติ

ตารางที่ ข.1 การระบุรอยร้าวอุดมคติ [23]

| ชนิดรอยร้าว            | รอยร้าวที่พบ  | รอยร้าวอุดมคติ   |
|------------------------|---|--|
| รอยร้าวทะลุ<br>ความหนา |  |  |
| รอยร้าวผิว             |  |  |
| รอยร้าวฝัง             |  |  |

2) การเปลี่ยนแนววางตัวรอยร้าว หมายถึง การเปลี่ยนทิศทางการวางตัวรอยร้าวจริงให้อยู่ในทิศทางใหม่ที่ประเมินได้ง่ายขึ้น โดยทั่วไปคือทิศทางที่มีผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวมาตรฐานแนะนำการเปลี่ยนแนววางตัวรอยร้าวไว้ 2 วิธี คือ วิธีแรก จัดให้ระนาบรอยร้าวตั้งฉากกับทิศความเค้นหลักสูงสุด (Maximum principal stress) และกำหนดให้ความยาว และความลึกรอยร้าวบนแนววางตัวใหม่เท่ากับความยาว และความลึกรอยร้าวเดิม วิธีที่สอง จัดให้ระนาบรอยร้าวใหม่ตั้งฉากกับทิศความเค้นหลัก และกำหนดให้ความยาว และความลึกรอยร้าวบนระนาบใหม่มีขนาดเท่ากับความยาวรอยร้าวสมมูล (Equivalent crack length,  $c_{eq}$ ) และความลึกรอยร้าวสมมูล (Equivalent crack depth,  $a_{eq}$ ) ตามลำดับ

การคำนวณ  $c_{eq}$  และ  $a_{eq}$  มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณความยาวรอยร้าวสมมูล  $c_{eq}$  ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1.1 คำนวณหาอัตราส่วนความเค้นหลัก (Biaxiality ratio,  $B$ ) จากสมการที่ (ข.1)

$$B = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (\text{ข.1})$$

โดย  $0 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$  ดังนั้น  $0 \leq B \leq 1$

1.2 คำนวณความยาวรอยร้าวสมมูล  $c_{eq}$

กรณี  $\alpha \leq 45$  องศา ฉายรอยร้าวไปบนระนาบหลักที่  $\sigma_1$  กระทำ และ

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

กรณี  $\alpha \leq 45$  องศา ฉายรอยร้าวไปบนระนาบหลักที่  $\sigma_2$  กระทำ และ

$$\frac{c_{eq}}{c} = \frac{\cos^2 \alpha}{B^2} + \frac{(1-B) \sin \alpha \cos \alpha}{2B^2} + \sin \alpha \quad (\text{ข.3})$$

2. คำนวณความลึกสมมูล  $a_{eq}$  ตามขั้นตอนต่อไปนี้

2.1 คำนวณความลึกบนระนาบที่ใช้หา  $a_0$

$$a_0 = a_m \cos \theta \quad (\text{ข.4})$$

2.2 คำนวณตัวประกอบปรับแก้ความลึก  $W$

$$W = \max [W_\theta, 1] \quad (\text{ข.5})$$

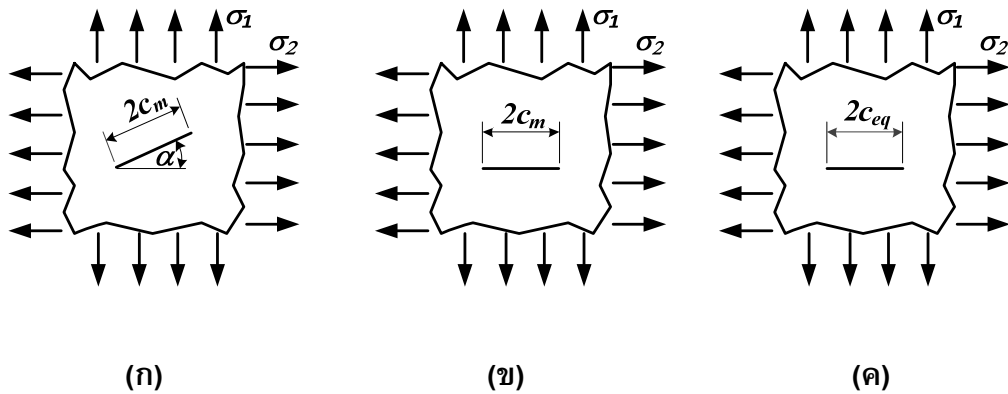
$$W_\theta = 0.9999 + 1.0481 \times 10^{-5} \theta + 1.5471 \times 10^{-4} \theta^2 + 1.5471 \times 10^{-4} \theta^2 \dots \\ + 3.4141 \times 10^{-5} \theta^3 - 2.0688 \times 10^{-6} \theta^4 + 4.4977 \times 10^{-8} \theta^5 + 3.4141 \times 10^{-5} \theta^3 \dots \\ - 2.0688 \times 10^{-6} \theta^4 + 4.4977 \times 10^{-8} \theta^5 - 4.5751 \times 10^{-10} \theta^6 + 1.8220 \times 10^{-12} \theta^7 \quad (\text{ข.6})$$

โดย  $\theta$  คือ มุมเอียง มีหน่วยเป็นองศา

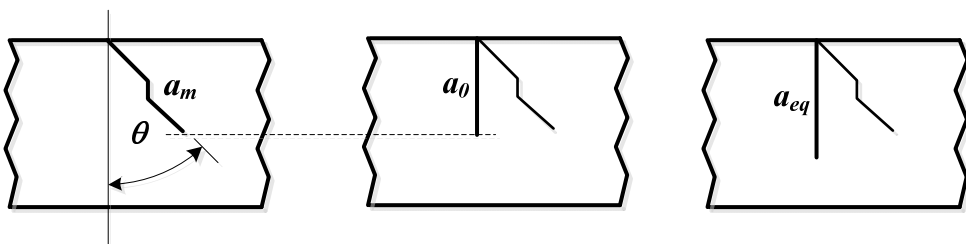
2.3 คำนวณความลึกสมมูล  $a_{eq}$

$$a_{eq} = a_0 W \quad (\text{ข.7})$$

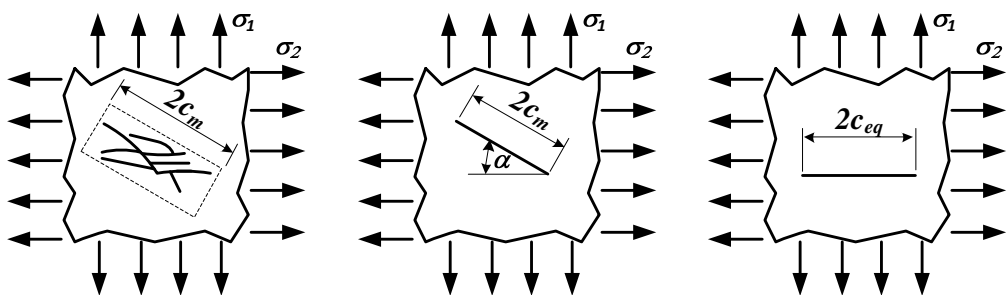
กรณีรอยร้าวแตกแขนง (Branched crack) การระบุขนาดรอยร้าวสามารถทำได้โดยตีกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าล้อมรอบรอยร้าวแตกแขนงจากนั้นแทนรอยร้าวแตกแขนงด้วยรอยร้าวที่มีความยาวเท่ากับกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สุดท้ายให้ฉายรอยร้าวไปบนระนาบความเค้นหลัก เพื่อหาความยาว และความลึกสมมูลด้วยวิธีที่กล่าวมาข้างต้น สำหรับความลึกสมมูลให้ใช้ค่า  $W$  เท่ากับ 1.2



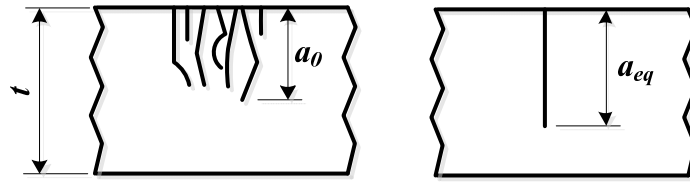
รูปที่ ข.1 การเปลี่ยนแนววางตัวของรอยร้าว [23]



รูปที่ ข.2 การหาความลึกสมมูล [23]



รูปที่ ข.3 การเปลี่ยนแนววางตัวรอยร้าวแตกแขนง [23]



รูปที่ ข.4 การหาความลึกสมมูลรอยร้าวแตกแขนง [23]

3) ปฏิสัมพันธ์ของรอยร้าว หมายถึง การที่สนามความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวที่พิจารณาถูกรบกวนจากรอยร้าวอื่น เมื่อสนามความเค้นเปลี่ยนแปลงไปค่าพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวจึงมีขนาดเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งจะมากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ตำแหน่งสัมพันธ์ของรอยร้าว และขนาดสัมพันธ์รอยร้าว เป็นต้น เนื่องจากผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวกรณีรอยร้าวมีปฏิสัมพันธ์กันมีจำนวนจำกัด จึงมักจะไม่สามารถครอบคลุมตัวแปรทั้งหมดที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวมาตรฐานการประเมินโครงสร้างจึงมีแนะนำให้จัดการรอยร้าวที่มีปฏิสัมพันธ์กันด้วยการรวมรอยร้าวที่เป็นรอยร้าวเดียว โดยรอยร้าวใหม่ต้องให้ผลประเมินอยู่ในด้านปลอดภัย

มาตรฐานแบ่งการจัดการรอยร้าวที่มีปฏิสัมพันธ์กันออกเป็น 2 กลุ่ม คือ รอยร้าวต่างระนาบ (Non-coplanar cracks) และรอยร้าวระนาบเดียวกัน (Coplanar cracks) เงื่อนไขการปฏิสัมพันธ์และการระบุลักษณะรอยร้าวที่รวมกันแล้วแสดงดังตารางที่ ข.2 และตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.2 การจัดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าวต่างระนาบ [23]

| รอยร้าวก่อนพิจารณา | เงื่อนไขการมีปฏิสัมพันธ์ | รอยร้าวที่รวมแล้ว |
|--------------------|--------------------------|-------------------|
|                    | $c_1 + c_2 \geq s_1$     |                   |

ตารางที่ ข.2 การจัดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าวต่างระนาบ (ต่อ)

| รอยร้าวก่อนพิจารณา | เงื่อนไขการมีปฏิสัมพันธ์   | รอยร้าวที่รวมแล้ว  |
|--------------------|--|--|
|                    | $c_1 + c_2 \geq s_1$ <p style="text-align: center;">และ</p> $c_1 + c_2 \geq s_2$ | <p style="text-align: center;"><math>2c = 2c_1 + 2c_2 + s_2</math></p> |

ตารางที่ ข.3 การจัดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าวระนาบเดียวกัน [23]

| รอยร้าวก่อนพิจารณา | เงื่อนไขการมีปฏิสัมพันธ์ | รอยร้าวที่รวมแล้ว  |
|--------------------|--------------------------|--|
|                    | $c_1 + c_2 \geq s_2$     | <p>เป็นรอยร้าวรูปครึ่งวงรี</p> <p>โดย :</p> $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_2$ $a = \max[a_1, a_2]$  |
|                    | $a_1 + a_2 \geq s_3$     | <p>เป็นรอยร้าวรูปวงรี</p> <p>โดย :</p> $2c = \max[2c_1, 2c_2]$ $2a = 2a_1 + 2a_2 + s_3$    |
|                    | $c_1 + c_2 \geq s_2$     | <p>เป็นรอยร้าวฝักรูปวงรี</p> <p>โดย :</p> $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_2$ $2a = \max[2a_1, 2a_2]$ |



ตารางที่ ข.3 การจัดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างรอยร้าวระนาบเดียวกัน (ต่อ)

| รอยร้าวก่อนพิจารณา | เงื่อนไขการมีปฏิสัมพันธ์                            | รอยร้าวที่รวมแล้ว   |
|--------------------|---|---|
|                    | $c_1 + c_2 \geq s_2$<br>และ<br>$a_1 + a_2 \geq s_3$ | เป็นรอยร้าวฝั่งรูปวงรี<br>โดย :<br>$2c = 2c_1 + 2c_2 + s_2$<br>$2a = 2a_1 + 2a_2 + s_3$ |
|                    | $a_1 + a_2 \geq s_3$                                | เป็นรอยร้าวรูปครึ่งวงรี<br>โดย :<br>$2c = \max[2c_1, 2c_2]$<br>$2a = 2a_1 + 2a_2 + s_3$ |
|                    | $c_1 + c_2 \geq s_2$<br>และ<br>$a_1 + a_2 \geq s_3$ | เป็นรอยร้าวรูปครึ่งวงรี<br>โดย :<br>$2a = 2a_1 + 2a_2 + s_3$                            |

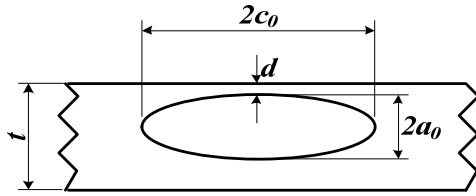
4) การเปลี่ยนชนิดรอยร้าว หมายถึง การแทนที่รอยร้าวเดิมด้วยรอยร้าวใหม่ มีความจำเป็นเพราะว่า เมื่อขอบหน้ารอยร้าวอยู่ใกล้กับผิวโครงสร้าง ภาระขีดจำกัดที่ทำให้ลิกกาเมนต์ (ด้านที่ขอบหน้ารอยร้าวอยู่ใกล้กับผิวโครงสร้าง) ทรากจะต่ำกว่าภาระที่โครงสร้างสามารถรับได้อย่างมาก ซึ่งจะทำให้ผลการประเมินปลอดภัยมากเกินไป เหตุผลประการที่สอง คือ ผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของรอยร้าวลึก ( $a/t > 0.8$ ) มักจะไม่แม่นยำ ตารางที่ ข.4 สรุปชนิดและขนาดรอยร้าวที่ใช้แทนที่ของเดิม

ตารางที่ ข.4 การเปลี่ยนชนิดรอยร้าว [23]

| รอยร้าวก่อนเปลี่ยน     | รอยร้าวหลังเปลี่ยน                                |
|------------------------|---|
|                        |   |
| เงื่อนไข : $d/t < 0.2$ | มิติหลังระบุ: $2c = 2c_0 + 2d$ และ $a = 2a_0 + d$ |

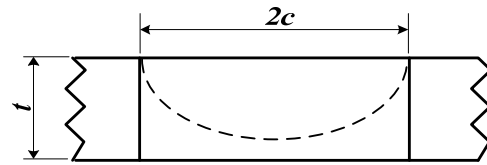
ตารางที่ ข.4 การเปลี่ยนชนิดรอยร้าว (ต่อ)

รอยร้าวก่อนเปลี่ยน



เงื่อนไข :  $a_0/t < 0.8$

รอยร้าวหลังเปลี่ยน



มิติหลังระบุ :  $2c = 2c_0 + 2(t - a_0)$  และ  $a = t$

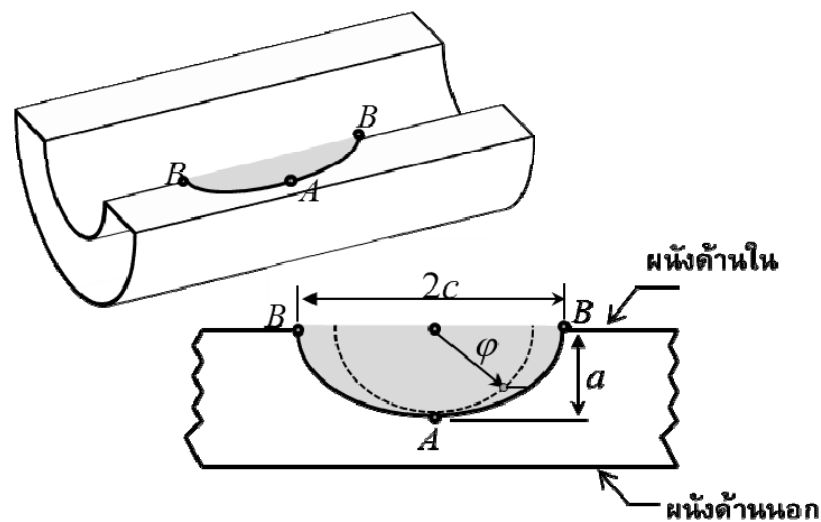
## ภาคผนวก ค

### ผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว

API RP 579 มีคำแนะนำในการหาพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวไว้ 3 แนวทาง [14] คือ วิธีโดยตรง (Direct method) วิธี Influence function สำหรับฟังก์ชันการกระจายความเค้นบนระนาบรอยร้าวในรูปโพลีโนเมียลกำลังสี่ และระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนัก (Weight function method)

#### ค.1 ท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกน

การหาผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวในโหมด 1  $K_I$  รูปที่ ค.1 กรณีท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนที่ผนังท่อรับภาระความดันภายในอย่างเดียวยังของวิธีทั้ง 3 วิธี จะกล่าวในหัวข้อย่อยต่อไปนี้



รูปที่ ค.1 ท่อมีรอยร้าวรูปครึ่งวงรีตามแนวแกนที่ผนังด้านใน

1) วิธีโดยตรง (สำหรับโครงสร้างรับภาระความดันภายในอย่างเดียว) วิธีนี้ผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวจะเป็นฟังก์ชันของความดัน มิติของท่อ มิติของรอยร้าว และ Influence coefficients ดังนี้

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

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6 \quad (\text{ค.2})$$

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

$$\beta = \frac{2\varphi}{\pi} \quad (\text{ค.4})$$

$$Q = \begin{cases} 1.0 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} & ; a/c \leq 1.0 \\ 1.0 + 1.464 \left(\frac{c}{a}\right)^{1.65} & ; a/c > 1.0 \end{cases} \quad (\text{ค.5})$$

ตำแหน่งลึกสุด (จุด A)  $\varphi$  เท่ากับ  $\frac{\pi}{2}$

$$G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right) \quad (\text{ค.6})$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right) \quad (\text{ค.7})$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{256}{315} + \frac{1}{5}M_1 + \frac{256}{3465}M_2 + \frac{1}{30}M_3 \right) \quad (\text{ค.8})$$

$$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5} \quad (\text{ค.9})$$

$$M_2 = 3 \quad (\text{ค.10})$$

$$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}} (G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5} \quad (\text{ค.11})$$

ตำแหน่งผิว (จุด B)  $\varphi$  เท่ากับ ศูนย์,  $Q$  เท่ากับ 1

$$G_2 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{5} + \frac{2}{3}N_1 + \frac{4}{7}N_2 + \frac{1}{2}N_3 \right) \quad (\text{ค.12})$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{7} + \frac{1}{2}N_1 + \frac{4}{9}N_2 + \frac{2}{5}N_3 \right) \quad (\text{ค.13})$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left( \frac{4}{9} + \frac{2}{5}N_1 + \frac{4}{11}N_2 + \frac{1}{3}N_3 \right) \quad (\text{ค.14})$$

$$N_1 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (2G_0 - 5G_1) - 8 \quad (\text{ค.15})$$

$$N_2 = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}} (3G_1 - G_0) + 15 \quad (\text{ค.16})$$

$$N_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (3G_0 - 10G_1) - 8 \quad (\text{ค.17})$$

เมื่อ  $G_i$  คือ Influence coefficients เมื่อ  $i = 0, 1, \dots, 4$  (ตารางที่ 9.12 หรือ 9.13 ในมาตรฐานสำหรับรอยร้าวที่ผนังด้านใน และผนังด้านนอก ตามลำดับ)  $Q$  คือ ค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับความลึกและความยาวรอยร้าว  $p$  คือ ความดันภายใน  $R_i$  และ  $R_o$  คือ รัศมีในและนอกของท่อ

ตามลำดับ  $t$  คือ ความหนาต่อ  $a$  และ  $c$  คือ ความลึกรอยร้าว และครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว (กรณีรอยร้าวรูปครึ่งวงรี)

2) วิธี Influence function วิธีนี้ต้องประมาณการกระจายความเค้นบนระนาบรอยร้าว ด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลัง 4 ในที่นี้ความเค้นที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของรอยร้าวครึ่งวงรีวางตัวตามแนวแกน คือความเค้นแนวเส้นรอบวง ผลเฉลยแม่นยำตรงของความเค้นแนวเส้นรอบวงซึ่งจะถูกประมาณเป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสี่ในรูป ดังสมการ (ก.1) และคำนวณหา  $K_I$  จากสมการ (ค.18) สำหรับตำแหน่งลึกสุดและผิวรอยร้าว กำหนดให้  $\varphi$  เท่ากับ  $\frac{\pi}{2}$  และ ศูนย์ ตามลำดับ

$$K_I = \left[ \sigma_0 G_0 + \sigma_1 G_1 \left( \frac{a}{t} \right) + \sigma_2 G_2 \left( \frac{a}{t} \right)^2 + \sigma_3 G_3 \left( \frac{a}{t} \right)^3 + G_4 \left( \frac{a}{t} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (\text{ค.18})$$

เมื่อ  $G_i$  คือ Influence coefficients เมื่อ  $i = 0, 1, \dots, 4$  หาได้จากตารางที่ 9.12 หรือตารางที่ 9.13 ในมาตรฐานสำหรับรอยร้าวที่ผนังด้านใน และผนังด้านนอก ตามลำดับ

$Q$  คือ สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับความลึกและความยาวรอยร้าว  $\sigma_i$  คือ สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสี่ ดังสมการ (ก.1)  $i = 0, 1, \dots, 4$   $t$  คือ ความหนาต่อ  $a$  คือ ความลึกรอยร้าว  $c$  คือ ครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว

3) ระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนัก เป็นการประยุกต์หลักการซ้อนทับในการหาผลเฉลยพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวหลักการคือพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของชิ้นงานแบบเดียวกันที่มีความเค้นกระจายบนผิวนอกจะสมมูลกับพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวที่มีความเค้นกระจายบนผิวรอยร้าวแต่ไม่มีภาวะภายนอก โดยใช้ระเบียบวิธีฟังก์ชันน้ำหนัก  $K_I$  หาได้จากสมการดังนี้

$$K_I = \int_0^a \sigma_{yy}(x) m_I(x, a) dx \quad (\text{ค.19})$$

เมื่อ  $\sigma_{yy}(x)$  คือ ฟังก์ชันความเค้นที่กระทำบนผิวรอยร้าว  $m_I(x, a)$  คือ ฟังก์ชันน้ำหนักของรอยร้าว  $a$  คือ ความลึกรอยร้าว

ตำแหน่งลึกสุด (จุด A)  $\varphi$  เท่ากับ  $\frac{\pi}{2}$

$$K_I = \int_0^a \sigma_{yy}(x) m_A(x, a) dx \quad (\text{ค.20})$$

ฟังก์ชันน้ำหนักของรอยร้าวที่ตำแหน่งลึกสุดของรอยร้าวหาจากสมการ

$$m_A(x, a) = \frac{2}{\sqrt{\pi x}} \left( 1 + M_{1,A} \left( 1 - \frac{x}{a} \right)^{1/2} + M_{2,A} \left( 1 - \frac{x}{a} \right) + M_{3,A} \left( 1 - \frac{x}{a} \right)^{3/2} \right) \quad (\text{ค.21})$$

เมื่อ  $M_{1,A}$ ,  $M_{2,A}$  และ  $M_{3,A}$  เป็นสัมประสิทธิ์ยังไม่ทราบค่าหาได้จากสมการดังนี้

$$M_{1,A} = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5} \quad (\text{ค.22})$$

$$M_{2,A} = 3 \quad (\text{ค.23})$$

$$M_{3,A} = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}} (G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5} \quad (\text{ค.24})$$

เมื่อ  $G_0$  และ  $G_1$  หาได้จากสมการ (ค.2) และ (ค.3) ตามลำดับ  $Q$  หาได้จากสมการ (ค.5)

$a$  คือ ความลึกรอยร้าว  $t$  คือ ความหนาท่อ  $c$  คือ ครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว

ตำแหน่งผิว (จุด B)  $\varphi$  เท่ากับ ศูนย์

$$K_I = \int_0^a \sigma_{yy}(x) m_B(x, a) dx \quad (\text{ค.25})$$

ฟังก์ชันน้ำหนักของรอยร้าวที่ตำแหน่งผิวของรอยร้าวหาจากสมการ

$$m_B(x, a) = \frac{2}{\sqrt{\pi x}} \left( 1 + M_{1,B} \left( \frac{x}{a} \right)^{1/2} + M_{2,B} \left( \frac{x}{a} \right) + M_{3,B} \left( \frac{x}{a} \right)^{3/2} \right) \quad (\text{ค.26})$$

โดย  $M_{1,B}$ ,  $M_{2,B}$  และ  $M_{3,B}$  เป็นสัมประสิทธิ์ยังไม่ทราบค่าหาได้จากสมการดังนี้

$$M_{1,B} = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (2G_0 - 5G_1) - 8 \quad (\text{ค.27})$$

$$M_{2,B} = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}} (3G_1 - G_0) + 15 \quad (\text{ค.28})$$

$$M_{3,B} = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (3G_0 - 10G_1) - 8 \quad (\text{ค.29})$$

เมื่อ  $G_0$  และ  $G_1$  หาได้จากสมการ (ค.2) และ (ค.3) ตามลำดับ  $Q$  หาได้จากสมการ (ค.5)

$a$  คือ ความลึกรอยร้าว  $t$  คือ ความหนาท่อ  $c$  คือ ครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว

## ค.2 ท่อมีรอยร้าวทะลุความหนาหนาแกน

1) วิธีโดยตรง (สำหรับกรณีท่อรับความดันภายในเพียงอย่างเดียว)

$$K_I = \frac{pR_o}{t} G_p \sqrt{\pi c} \quad (\text{ค.30})$$

2) วิธี influence function

$$K_I = [\{\sigma_0 + p_c\} G_0 + \sigma_1 G_1] \sqrt{\pi c} \quad (\text{ค.31})$$

หรือ

$$K_I = [\{\sigma_m + p_c\} G_0 + \sigma_b (G_0 - 2G_1)] \sqrt{\pi c} \quad (\text{ค.32})$$

$$G_{0,1,p} = \frac{A_0 + A_1 \lambda + A_2 \lambda^2 + A_3 \lambda^3}{1 + A_4 \lambda + A_5 \lambda^2 + A_6 \lambda^3} \quad (\text{ค.33})$$

$$\lambda = \frac{1.818c}{\sqrt{R_i t}} \quad (\text{ค.34})$$

เมื่อ  $\sigma_m$  คือ ความเค้นเมมเบรน  $\sigma_b$  คือ ความเค้นเมมดัด  $\sigma_0$  และ  $\sigma_1$  คือ สัมประสิทธิ์ความเค้นโพลีโนเมียลกำลังสี่  $G_0$ ,  $G_1$  และ  $G_p$  หาได้จากสมการ (ค.33)

$A_i$  ค่าคงที่ เมื่อ  $i = 0, 1, \dots, 6$  (ตารางที่ C.6 ในมาตรฐาน)  $\lambda$  หาได้จากสมการ (ค.34)

$R_i$  และ  $t$  คือ รัศมีภายใน และความหนาท่อชิ้นส่วน  $c$  คือ ครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าว

**ภาคผนวก จ**  
**ผลเฉลยความเค้นอ้างอิง**

**จ.1 ท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกน**

ความเค้นอ้างอิงเนื่องจากความเค้นปฐมภูมิ  $\sigma_{ref}^P$  กรณีท่อมีรอยร้าวผิวรูปครึ่งวงรีขนานแกนที่ผนังด้านในท่อรับภาระความดันภายในอย่างเดียวได้ดังนี้

$$\sigma_{ref}^P = \frac{gP_b + \left[ (gP_b)^2 + 9(M_s \cdot P_m \cdot (1-\alpha)^2)^2 \right]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2} \quad (จ.1)$$

เมื่อ

$$M_s = \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t} \left( \frac{1}{M_t(\lambda_a)} \right)} \quad (จ.2)$$

$$M_t(\lambda_a) = \left( \frac{1.02 + 0.4411\lambda_a^2 + 0.006124\lambda_a^4}{1.0 + 0.02642\lambda_a^2 + 1.533(10^{-6})\lambda_a^4} \right)^{0.5} \quad (จ.1)$$

$$g = 1 - 20 \left( \frac{a}{2c} \right)^{0.75} \alpha^3 \quad (จ.4)$$

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}} \quad (จ.5)$$

$$\lambda_a = \frac{1.818c}{\sqrt{R_t a}} \quad (จ.6)$$

เมื่อ  $P_b$  และ  $P_m$  คือ ความเค้นตัดปฐมภูมิ และความเค้นเมมเบรนปฐมภูมิ ตามลำดับ  
 $a$  และ  $c$  คือ ความลึก และครึ่งหนึ่งของความยาวรอยร้าวตามลำดับ  $t$  คือ ความหนาท่อ

กรณีหาความเค้นอ้างอิงเนื่องจากความเค้นทุติยภูมิ  $\sigma_{ref}^{SR}$  คำนวณตามขั้นตอนเช่นเดียวกับการหา  $\sigma_{ref}^P$  โดย  $P_b$  และ  $P_m$  ในสมการ (จ.1) คือ ความเค้นตัดทุติยภูมิ  $Q_b$  และความเค้นเมมเบรนทุติยภูมิ  $Q_m$  ตามลำดับ



## จ.2 ท่อมีรอยร้าวทะลุความหนาชนานแกน

ความเค้นอ้างอิงเนื่องจากความเค้นปฐมภูมิ  $\sigma_{ref}^P$  กรณีท่อมีรอยร้าวทะลุความหนาชนานแกน ที่รับภาระความดันภายในอย่างเต็มที่ได้ดังนี้

$$\sigma_{ref}^P = \frac{P_b + [(P_b)^2 + 9(M_s \cdot P_m)^2]^{0.5}}{3} \quad (จ.7)$$

$$M_t(\lambda) = \left( \frac{1.02 + 0.4411\lambda^2 + 0.006124\lambda^4}{1.0 + 0.02642\lambda^2 + 1.533(10^{-6})\lambda^4} \right)^{0.5} \quad (จ.8)$$

$$\lambda = \frac{1.818c}{\sqrt{R_i t}} \quad (จ.9)$$

กรณีหาความเค้นอ้างอิงเนื่องจากความเค้นทุติยภูมิ  $\sigma_{ref}^{SR}$  คำนวณตามขั้นตอนเช่นเดียวกับการหา  $\sigma_{ref}^P$  โดย  $P_b$  และ  $P_m$  ในสมการ (จ.7) คือ ความเค้นดัดทุติยภูมิ  $Q_b$  และความเค้นเมมเบรนทุติยภูมิ  $Q_m$  ตามลำดับ

## ภาคผนวก จ

### โปรไฟล์ของสนามความเค้นตกค้าง

API RP 579 มีคำแนะนำสำหรับการจัดการโปรไฟล์ของสนามความเค้น 2 วิธี คือ ความเค้นตกค้างผิว (Surface residual stress) และโปรไฟล์ความเค้นตกค้างตามแนวความหนา (Through-thickness residual stress) สำหรับงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงความเค้นตกค้างผิวสำหรับท่อมีรอยร้าววางตัวตามแนวแกน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

กรณีรอยเชื่อม Single V-Groove หรือ Double V-Groove ตั้งฉากแกนท่อและรอยร้าว

ขั้นตอนที่ 1 การปรับแก้ความเค้นคราก

$$\sigma_{ys}^r = \sigma_{ys} + 69 \text{ MPa} \quad (\text{จ.1})$$

ขั้นตอนที่ 2 หาคความเค้นตกค้างผิวภาวะ

$$\sigma^r(y) = \sigma_{ys}^r \cdot R_r \quad \text{if } |y| \leq \frac{w}{2} \quad (\text{จ.2})$$

$$\sigma^r(y) = \left\{ \frac{1 - \left( \frac{|y| - w/2}{c} \right)^2}{1 + \left( \frac{|y| - w/2}{c} \right)^{2n}} \right\} \cdot \sigma_{ys}^r \cdot R_r \quad \text{if } |y| > \frac{w}{2} \quad (\text{จ.3})$$

เมื่อ

$$T_p = \left( \frac{\sigma_{mc,t}}{\sigma_{ys}^r} \right) \cdot 100 \quad (\text{จ.4})$$

$$R_r = \begin{cases} 1.0 & T_p < 75\% \\ \frac{168.5063 - 226770T_p + 9.16852(10^{-3})T_p^2}{100} & 75\% \leq T_p \leq 110\% \\ 0.30 & T_p > 110\% \end{cases} \quad (\text{จ.5})$$

$$c = 0.5\sqrt{rt} \quad (\text{จ.6})$$

$$n = 2 \quad (\text{จ.7})$$

ขั้นตอนที่ 3 หาคความเค้นตกค้างผิวเนื่องจาก PWHT

$$\sigma^r(y) = 0.3\sigma_{ys}^r \quad (\text{จ.8})$$

เมื่อ  $w$  คือ ความกว้างรอยเชื่อม  $y$  คือ ระยะจากกึ่งกลางรอยเชื่อม  $r$  และ  $t$  คือ รัศมีภายใน และความหนาท่อ ตามลำดับ  $\sigma_{ys}$  และ  $\sigma_{ys}^r$  คือ ความเค้นคราก และ ความเค้นครากตกค้าง ตามลำดับ  $\sigma_{mc,t}$  คือ ความเค้นเมมเบรนขณะทดสอบความดัน  $R_r$  คือ การลดลงของความเค้นตกค้าง (Reduction in the residual stress)  $T_p$  คือ เปอร์เซ็นความเค้นเมมเบรนเทียบกับความเค้นครากระหว่างการทดสอบความดัน

กรณีรอยเชื่อม Single V-Groove หรือ Double V-Groove ขนานแกนท่อและรอยรั้ว คำนวณเช่นเดียวกับกรณีแรก แต่ขั้นตอนที่ 2 จะกำหนดให้

$$T_p = \left( \frac{\sigma_{mc,t}}{\sigma_{ys}^r} \right) \cdot 100 \quad (\text{จ.9})$$

$$R_r = \begin{cases} 1.0 & T_p < 75\% \\ \frac{1690.67 - 2.4501T_p + 1.07(10^{-3})T_p^2}{100} & 75\% \leq T_p \leq 110\% \\ 0.506 & T_p > 110\% \end{cases} \quad (\text{จ.10})$$

และในขั้นตอนที่ 3 ความเค้นตกค้างผิวเนื่องจาก PWHT เท่ากับ

$$\sigma^r(y) = 0.2\sigma_{ys}^r \quad (\text{จ.11})$$

## ภาคผนวก ข

### การประมาณค่าความต้านทานการแตกหัก

มาตรฐานแนะนำวิธีระบุค่าความต้านทานการแตกหักโหมด 1 ในสถานะความเครียดระนาบ  $K_{IC}$  ไว้ 6 แนวทาง ดังนี้

1) ทดสอบความต้านทานการแตกหักตามมาตรฐาน ASTM E 1820 [36] แล้วนำผลลัพธ์มาใช้

2) ประมาณค่าจากเส้นโค้งขอบเขตล่างของความต้านทานการแตกหักของ ASME (ASME Lower-bound fracture toughness curve) ด้วยการแทนค่าอุณหภูมิประเมิน และอุณหภูมิอ้างอิง ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$K_{IC} = 36.5 + 3.08 \exp[0.036(T - T_{ref} + 56)] \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ  $K_{IC}$  มีหน่วยเป็น  $MPa\sqrt{m}$   $T$  คือ อุณหภูมิประเมิน  $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิง หรือ อุณหภูมิ  $TR_{NDT}$  มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$

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

$$K_{IC} = 8.47(CVN)^{0.63} \quad \text{for transition region} \quad (\text{ข.2})$$

$$K_{IC} = \sigma_{ys} \sqrt{0.64 \left( \frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.01 \right)} \quad \text{for upper shelf} \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อ  $K_{IC}$  คือ ความต้านทานการแตกหักโหมด 1 ที่สถานะความเครียดระนาบ ( $MPa\sqrt{m}$ )  $CVN$  คือ พลังงาน Charpy-V notch (J)  $\sigma_{ys}$  คือ ความแข็งแรงคราก (MPa)

4) ประมาณค่าจาก Master curve ด้วยการแทนค่าอุณหภูมิประเมิน และอุณหภูมิอ้างอิง (จาก Master curve) ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$K_{mean} = 30 + 70 \exp[0.0190(T - T_0)] \quad (\text{ข.4})$$

เมื่อ  $K_{mean}$  คือ ค่ามัธยฐานของ  $K_{IC}$  มีหน่วยเป็น  $MPa\sqrt{m}$   $T$  คือ อุณหภูมิประเมิน  $T_0$  คือ อุณหภูมิอ้างอิง (จาก Master curve) มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$

5) ประมวลค่าจากพารามิเตอร์  $J$  วิกฤติ ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$K_{mean} = \sqrt{\frac{J_{crit} \cdot E_y}{1-\nu^2}} \quad (ข.5)$$

เมื่อ  $J_{crit}$  คือ พารามิเตอร์  $J$  วิกฤติ  $E_y$  คือ มอดูลัสความยืดหยุ่น  $\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง

6) ประมวลค่าจากระยะเปิดที่ปลายรอยร้าววิกฤติ ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$K_{mean} = \sqrt{\frac{m_{CTOD} \cdot \sigma_f \cdot \delta_{crit} \cdot E_y}{1-\nu^2}} \quad (ข.6)$$

เมื่อ  $m_{CTOD}$  คือ ค่าคงที่ในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 1.4  $\delta_{crit}$  คือ ระยะเปิดที่ปากรอยร้าววิกฤติ  $\sigma_f$  คือ ความเค้นเฉลี่ยระหว่างความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุด

สำหรับ  $K_{IC}$  ที่ได้จากเส้นโค้งขอบเขตล่างของความต้านทานการแตกหักของ ASME ก่อนนำไปใช้ในการประเมินต้องปรับแก้เป็นความต้านทานการแตกหักค่ากลาง  $K_{mat}^{mean}$  ก่อนเสมอเพื่อให้ผลการประเมินไม่อยู่ฝั่งปลอดภัยมากเกินไป

$$\frac{K_{mat}^{mean}}{K_{IC}} = \left( \frac{1.0}{B_0 + B_1\Delta T + B_2\Delta T^2 + B_3\Delta T^3 + B_4\Delta T^4 + B_5\Delta T^5} \right) \quad (ข.7)$$

เมื่อ  $K_{IC}$  คือ ความต้านทานการแตกหักโหมด 1 ในสถานะความเครียดระนาบ

$\Delta T$  คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิประเมินและอุณหภูมิอ้างอิง ( $^{\circ}F$ )  $B_i$  คือ สัมประสิทธิ์หาได้จากตารางที่ ข.1  $i = 0, 1, \dots, 5$

ตารางที่ ข.1 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างความต้านทานการแตกหักค่ากลางและความต้านทานการแตกหักขอบเขตล่าง [14]

| ความสัมพันธ์                    | SD | $B_0$     | $B_1$      | $B_2$     | $B_3$     | $B_4$     | $B_5$     |
|---------------------------------|----|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\frac{K_{mat}^{mean}}{K_{IC}}$ | 0  | 4.992E-01 | -1.210E-04 | 1.792E-05 | 3.859E-08 | 4.663E-11 | 2.980E-13 |
|                                 | 1  | 6.140E-01 | 2.214E-04  | 2.105E-05 | 5.933E-08 | 8.307E-11 | 2.945E-13 |
|                                 | 2  | 7.420E-01 | 7.645E-04  | 2.490E-05 | 8.576E-08 | 1.387E-10 | 2.801E-13 |
|                                 | 3  | 8.796E-01 | 1.542E-04  | 2.989E-05 | 1.182E-07 | 2.161E-10 | 2.797E-13 |

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจตุพร แก้วอ่อน เกิดวันที่ 24 มกราคม 2532 อำเภอสีเกา จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสภาราชนิ จังหวัดตรัง เมื่อปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555