

โปรแกรมออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน  
โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

OPTIMUM DESIGN PROGRAM FOR STOP-LEAKING CLAMP  
OF PRESSURE PIPELINE REPAIRS USING FINITE ELEMENT METHOD



นิติพงษ์ คุ่มเที่ยง  
ปวีณา แซ่ลิ้ม  
วรยุทธ กลังเนียม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

โปรแกรมออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน  
โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

OPTIMUM DESIGN PROGRAM FOR STOP-LEAKING CLAMP  
OF PRESSURE PIPELINE REPAIRS USING FINITE ELEMENT METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTIMUM DESIGN PROGRAM FOR STOP-LEAKING CLAMP  
OF PRESSURE PIPELINE REPAIRS USING FINITE ELEMENT METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2559

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โปรแกรมออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดันโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์  
OPTIMUM DESIGN PROGRAM FOR STOP-LEAKING CLAMP OF PRESSURE  
PIPELINE REPAIRS USING FINITE ELEMENT METHOD

ผู้จัดทำ

1. นายนิติพงษ์ คุ่มเที่ยง รหัสประจำตัว 56010679
2. นางสาวปวีณา แซ่ลิ้ม รหัสประจำตัว 56010735
3. นายวรยุทธ กลิ่งเนียม รหัสประจำตัว 56011065



อาจารย์ที่ปรึกษา

( รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว )

## โปรแกรมออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดันโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

|             |            |                                     |
|-------------|------------|-------------------------------------|
| นายนิติพงษ์ | คุ้มเที่ยง | 56010679                            |
| นางสาวปวีณา | แช่ลิ้ม    | 56010735                            |
| นายวรยุทธ   | กลิ้งเนียม | 56011065                            |
| รศ.ดร.จำลอง | ปราบแก้ว   | อาจารย์ที่ปรึกษา<br>ปีการศึกษา 2559 |

### บทคัดย่อ

เนื่องจากในโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้ท่อความดันสูง เช่น ท่อไอน้ำในโรงงานที่ผลิตกระแสไฟฟ้า ท่อความดันในอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น เมื่อท่อเกิดการรั่วเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ จำเป็นต้องปิดรอยรั่วของท่ออย่างรวดเร็วเพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างโปรแกรมหาขนาดของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดันให้มีขนาดที่เหมาะสม โดยคณะผู้จัดทำจึงได้ศึกษาสมการคำนวณความเค้นที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์นี้ แล้วเขียนลงในโปรแกรม MS Excel 2016 พร้อมทั้งวิเคราะห์ความเค้นของอุปกรณ์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SolidWorks Simulation 2016 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้พร้อมทั้งปรับปรุงโปรแกรมให้ใกล้เคียงกัน โดยหาขนาดของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วที่เหมาะสมสำหรับท่อตรงที่มีขนาด 2 4 6 และ 8 นิ้ว ความดันภายในท่อไม่เกิน 1100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิไม่เกิน 1100 องศาฟาเรนไฮต์ และมีค่าความปลอดภัยตั้งแต่ 1 สำหรับสลักเกลียว ค่าความปลอดภัยตั้งแต่ 2 สำหรับผนังท่อ แผ่นยึดด้านข้าง และแผ่นปิด จากการดำเนินงาน เมื่อเลือกขนาดชิ้นส่วนแต่ละชิ้นสำหรับท่อรั่วมาขนาดหนึ่ง แล้วนำมาวิเคราะห์ความเค้นด้วยโปรแกรมและระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า มีค่าความเค้นที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถนำโปรแกรมที่ได้ปรับปรุงไปสร้างตารางสำหรับเลือกขนาดของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดันที่เหมาะสมได้

OPTIMUM DESIGN PROGRAM FOR STOP-LEAKING CLAMP OF PRESSURE PIPELINE REPAIRS  
USING FINITE ELEMENT METHOD

|                        |            |          |
|------------------------|------------|----------|
| Nitipong               | Khumthiang | 56010679 |
| Paweena                | Sae-lim    | 56010735 |
| Worayut                | Klungniam  | 56011065 |
| Assoc.Prof.Dr.Chamlong | Prabkaew   | Advisor  |
| Year 2559              |            |          |

ABSTRACT

Generally, petrochemical industries and power plants convey the working fluid using piping system which possibly leak cause of corrosion, erosion or mechanical vibration. These leakages should be rapidly repaired to prevent effects. For these reason, the object of this research is programming to calculate the optimum stop-leaking clamps. In research collected the stress equations which design these clamps and insert into MS Excel 2016. Including use finite element methods (FEM) by SolidWorks Simulation 2016 to analysis stress on each component of clamps. And then, compare the result from two methods and improve this program to output result which be similar to result from finite element method. These repair clamps were designed for 2 4 6 and 8 inch diameters, pressure and temperature not more than 1100 pounds per square inch and 1100 degrees Fahrenheit, respectively of leaking pipeline. Safety factor, not less than 1 for studs and not less than 2 for shell walls, ear plates and end plates. In process, dimensions each part of clamp was selected and was analyzed by program and FEM. And the results from two methods were nearly. Hence, the adjusted program could be used to create the optimum repair clamp design catalogues.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากอาจารย์จำลอง  
ปราบแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้แนวคิด คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด  
รวมถึงให้กำลังใจอันเป็นสิ่งสำคัญยิ่งในการทำปริญญาบัตรให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำจึง  
ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณบริษัท ซีอาร์ เอเชีย(ไทยแลนด์) จำกัด ที่ได้ให้ประสบการณ์ คำแนะนำ ตลอดจน  
ข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งทำให้ปริญญาบัตรครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้  
ขอขอบคุณพี่ศิระวิษณุ วรรณมาศ พี่จิรเมธ บุญศักดา รวมถึงคณะเพื่อนและพี่น้องทุกคนที่คอยให้  
คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนคอยถามไถ่และเอาใจใส่เสมอมา

ท้ายสุดนี้ ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ คือ บิดา มารดา ที่ให้การ  
อุปการะเลี้ยงดู อบรมบ่มนิสัย ให้โอกาสทางการศึกษาอย่างเต็มที่ เอาใจใส่เสมอมาในทุก ๆ ด้านอัน  
หาที่เปรียบมิได้ ตลอดจนให้กำลังใจในการทำปริญญาบัตรจนสำเร็จไปได้อย่างราบรื่น ข้าพเจ้าขอ  
ระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายนิติพงษ์      คุ่มเที่ยง  
นางสาวปวีณา      แซ่ลิ้ม  
นายวรยุทธ      กลิ่งเนียม

# สารบัญ

หน้า

|   |     |
|---|-----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | I   |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | II  |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | III |
| สารบัญ.....   | IV  |
| สารบัญตาราง.....  | VI  |
| สารบัญรูป.....  | VII |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1   |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ.....  | 1   |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                                  | 1   |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา.....   | 2   |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                | 2   |
| บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                        | 3   |
| 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                    | 3   |
| 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                                       | 6   |
| 2.2.1 หลักพื้นฐานที่ใช้พิจารณาการออกแบบ.....                      | 6   |
| 2.2.2 อุปกรณ์ซ่อมแซมท่อ.....                                      | 7   |
| 2.2.3 วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ปิดรอยรั่วโดยทั่วไป.....               | 8   |
| 2.2.4 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อ.....                      | 9   |
| 2.2.5 ความดันที่ใช้ออกแบบ.....                                    | 10  |
| 2.2.6 ผลกระทบต่อรอยรั่ว.....                                      | 10  |
| 2.2.7 วัสดุที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน.....      | 11  |
| 2.2.8 การคำนวณความเค้นที่กระทำต่ออุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน..... | 12  |
| 2.2.9 ทฤษฎีความเสียหาย.....                                       | 16  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |    |
|--|----|
| 2.2.10 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....  | 19 |
| บทที่ 3 การดำเนินงาน .....   | 21 |
| 3.1 ตัวอย่างขนาดของอุปกรณ์เพื่อใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ค่าความเค้น.....                             | 21 |
| 3.2 การสร้างโปรแกรมคำนวณหาค่าความเค้นของอุปกรณ์ .....  | 22 |
| 3.3 การวิเคราะห์ความเค้นของอุปกรณ์โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ .....                             | 25 |
| 3.4 เปรียบเทียบผลระหว่างการคำนวณด้วยโปรแกรมและการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์<br>เอลิเมนต์ ..... | 30 |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....  | 31 |
| 4.1 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรมและการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....                        | 31 |
| 4.1.1 ผลจากหาค่าความปลอดภัยสำหรับ กรณีที่ 1.....   | 31 |
| 4.1.2 ผลจากหาค่าความปลอดภัยสำหรับ กรณีที่ 2.....   | 32 |
| 4.1.3 ผลจากหาค่าความปลอดภัยสำหรับ กรณีที่ 3.....   | 33 |
| 4.1.4 ผลจากหาค่าความปลอดภัยสำหรับ กรณีที่ 4.....   | 34 |
| 4.2 ผลจากการปรับปรุงโปรแกรมการคำนวณ.....   | 36 |
| บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน.....  | 37 |
| ภาคผนวก.....   | 38 |
| ภาคผนวก ก .....  | 39 |
| ภาคผนวก ข .....  | 59 |
| เอกสารอ้างอิง .....  | 86 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

|   |      |
|---|------|
| ตารางที่.....   | หน้า |
| 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็ก.....                             | 11   |
| 3.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างเอลิเมนต์แบบเอช กับเอลิเมนต์แบบพี..... | 29   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

|   |      |
|---|------|
| รูปที่ .....  | หน้า |
| 1.1 ท่อตรงที่เสื่อมสภาพ และเกิดการรั่วขึ้น .....          | 1    |
| 2.1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดัน .....        | 3    |
| 2.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดัน .....        | 4    |
| 2.3 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดัน .....        | 5    |
| 2.4 การทดสอบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วที่ทำจากวัสดุผสม .....       | 6    |
| 2.5 ลักษณะของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อแบบสองชั้นประกบกัน ..... | 7    |
| 2.6 ลักษณะของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อแบบชั้นเดียว .....       | 7    |
| 2.7 ท่อที่รั่ว และวัดขนาดเพื่อใช้ในการออกแบบ .....        | 8    |
| 2.9 ท่อวาล์วกับกระบอกที่ใช้สำหรับอัดผลิตภัณฑ์ .....       | 8    |
| 2.8 การสร้างอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อ ความดัน .....            | 8    |
| 2.10 อัดผลิตภัณฑ์จนเต็มร่องน้ำยา .....                    | 8    |
| 2.11 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่ว .....                 | 9    |
| 2.12 อุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดัน .....                    | 12   |
| 2.13 ทิศทางของแรงเนื่องจากความดันที่กระทำต่อผนังท่อ ..... | 13   |
| 2.14 ความเค้นรวมที่เกิดขึ้นบนแผ่นยึดด้านข้าง .....        | 13   |
| 2.15 ขนาดของแผ่นยึดด้านข้าง .....                         | 14   |
| 2.16 พื้นที่รับแรงภายในบริเวณแผ่นปิด .....                | 14   |
| 2.17 ทิศของแรงที่กระทำต่อสลักเกลียว .....                 | 15   |
| 2.18 พื้นที่รับแรงภายในอุปกรณ์ .....                      | 15   |
| 2.19 การเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ในระนาบหลัก .....         | 17   |
| 2.20 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด สำหรับเหล็กเหนียว .....  | 19   |
| 2.21 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย .....     | 20   |
| 3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม MS Excel 2016 .....         | 23   |
| 3.2 การพิมพ์คำบรรยายตัวแปรต่าง ๆ ลงในโปรแกรม .....        | 24   |
| 3.3 การพิมพ์คำบรรยายตัวแปรต่าง ๆ ลงในโปรแกรม .....        | 24   |
| 3.4 หน้าต่างแสดงการป้อนข้อมูล .....                       | 25   |
| 3.5 แบบจำลองอุปกรณ์ 3 มิติ .....                          | 25   |
| 3.6 การตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุ .....                     | 26   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

|   |    |
|---|----|
| 3.7 การตั้งค่าการยึดจับโดยการกำหนดการยึดจับแบบยืดหยุ่นและเลือกค่าชดเชยความเฉื่อย .....  | 27 |
| 3.8 การเลือกสองผิวสัมผัสแบบสัมผัสกัน.....   | 27 |
| 3.9 การกำหนดค่าความแข็งแรงของสลักเกลียว และค่าแรงขันเริ่มต้น .....  | 28 |
| 3.10 การกำหนดขนาดและทิศทางของความดัน.....   | 28 |
| 3.11 การตั้งค่าเอลิเมนต์แบบ h-adaptive.....   | 29 |
| 3.12 การประมวลผลการแบ่งเอลิเมนต์ของโปรแกรม.....   | 30 |
| 3.13 เอลิเมนต์ที่ได้จากการประมวลผลแบบ h-adaptive .....  | 30 |
| 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วนของ<br>อุปกรณ์.....  | 31 |
| 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัยของผนังท่อที่มีความหนา 5s,<br>10s, 40s และ 80s.....  | 32 |
| 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันและค่าความปลอดภัยของแผ่นยึดด้านข้างที่มีความหนา<br>0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว.....                          | 33 |
| 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันและค่าความปลอดภัยของสลักเกลียวขนาด 5/8 นิ้ว ที่มี<br>จำนวน 4 6 8 และ 10 ตัว.....                                | 34 |
| 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันและค่าความปลอดภัยของสลักเกลียวขนาด 3/4 นิ้ว ที่มี<br>จำนวน 4 6 8 และ 10 ตัว.....                                | 34 |
| 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันและค่าความปลอดภัยของสลักเกลียวขนาด 7/8 นิ้ว ที่มี<br>จำนวน 4 6 8 และ 10 ตัว.....                                | 35 |
| 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันและค่าความปลอดภัยของแผ่นยึดด้านข้าง ที่มีความหนา<br>0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว หลังจากปรับปรุงโปรแกรม ..... | 36 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบท่อความดันในโรงงานอุตสาหกรรมดังแสดงในรูปที่ 1.1 บางครั้งการสีกกร่อน การสั่นสะเทือน หรือความเค้นเนื่องจากความดันและอุณหภูมิอาจเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการรั่วไหลของระบบท่อ การรั่วไหลอาจเกิดขึ้นได้ทุกที่ไม่ว่าจะเป็น ข้อต่อ ข้อต่อสามทาง หน้าแปลน วาล์ว ท่อตัดโค้ง หรือท่อตรง ซึ่งในบางกรณีสามารถยับยั้งการรั่วไหลได้ชั่วคราวด้วย ไฟเบอร์กลาส (Fiber Glass) หรือ คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber) ในการเสริมความแข็งแรงและใช้อีพอกซีร่วมกับปะเก็น (Gasket) และอุปกรณ์ยึดท่อ (Pipe Clamp)



รูปที่ 1.1 ท่อตรงที่เสื่อมสภาพ และเกิดการรั่วขึ้น  
(Mercury MENA [1])

แต่บางครั้งในท่อที่มีความดันและอุณหภูมิสูง การแข็งตัวของอีพอกซีใช้เวลานาน หรือความเสียหายของท่อสูงมากจนอาจจะเกิดการระเบิดได้ ในกรณีนี้การซ่อมแซมที่มีระยะเวลาในการทำงานนานและน่าไว้วางใจกว่าจำเป็นต้องนำมาใช้ นั่นคือ อุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อ (Stop-Leaking Clamp) ดังนั้นโครงการนี้จึงได้นำเสนอการหาขนาดอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อที่เหมาะสมสำหรับท่อรั่วที่มีลักษณะเป็นท่อตรงขนาด 2 ถึง 8 นิ้ว

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ออกแบบโปรแกรมหาขนาดอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดันที่เหมาะสมสำหรับท่อรั่วที่มีลักษณะเป็นท่อตรงขนาด 2 4 6 และ 8 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สร้างคู่มือการใช้งานในรูปแบบของตารางสำหรับเลือกขนาดอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันที่เหมาะสม

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. เขียนแบบที่ใช้ในการตรวจสอบค่าความแข็งแรงของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันบริเวณท่อตรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2, 4, 6 และ 8 นิ้ว ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทำอุปกรณ์ปิดรอยรั่ว ได้แก่ A106 Grade B สำหรับผนังท่อ (Shell Walls), A516 Grade 70 สำหรับแผ่นยึดด้านข้าง (Ear Plates) และแผ่นปิด (End Plates), A193 Grade B7 สำหรับสลักเกลียว (Studs) และ A194 Grade 2H สำหรับหมุดเกลียว (Nuts)

2. กำหนดขนาดของชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ออกแบบ

แผ่นปิดหนา 1 นิ้ว

ผนังท่อน้ำท่อน้ำ 5s, 10s, 40s และ 80s

แผ่นยึดด้านข้างหนา 0.5, 1 และ 1.5 นิ้ว

สลักเกลียวขนาด 5/8, 3/4 และ 7/8 นิ้ว

สลักเกลียวจำนวน 4, 6, 8 และ 10 ตัว

3. สร้างโปรแกรมคำนวณหาความเค้นของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันโดยโปรแกรม MS Excel 2016

4. วิเคราะห์ความเค้นของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม SolidWorks Simulation 2016

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

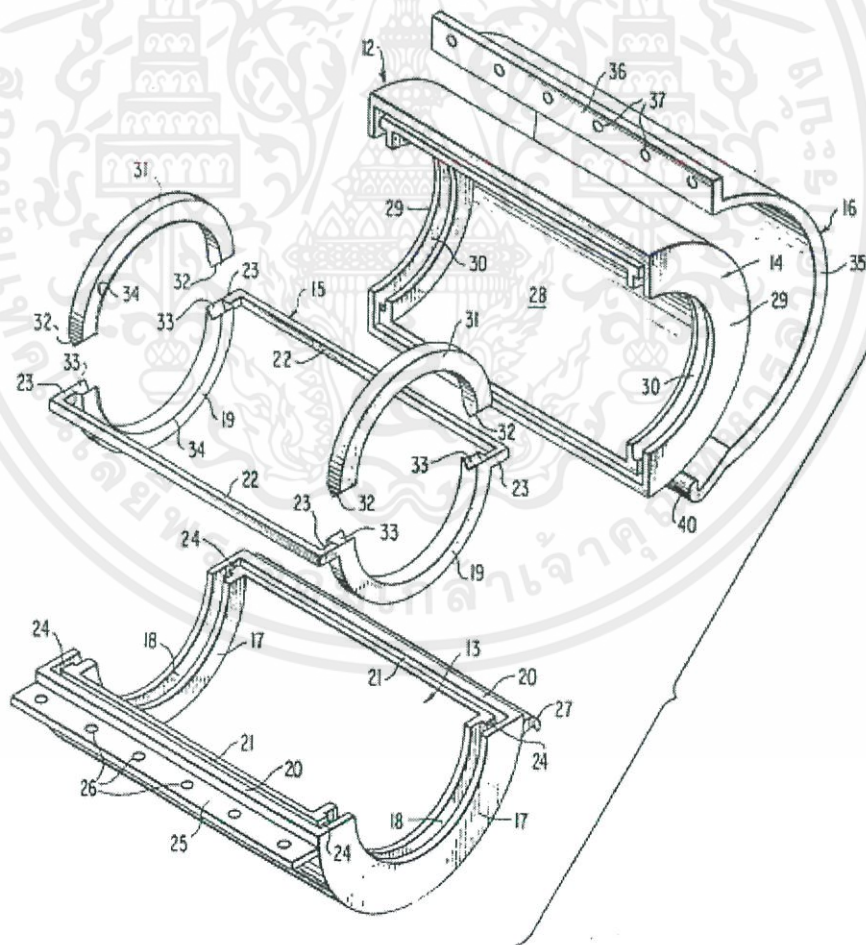
1. เพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจในการซ่อมแซมระบบท่อ
2. อำนวยความสะดวกในการออกแบบ และเลือกใช้อุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันที่มีขนาดเหมาะสมต่อการใช้งาน

## บทที่ 2

# งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

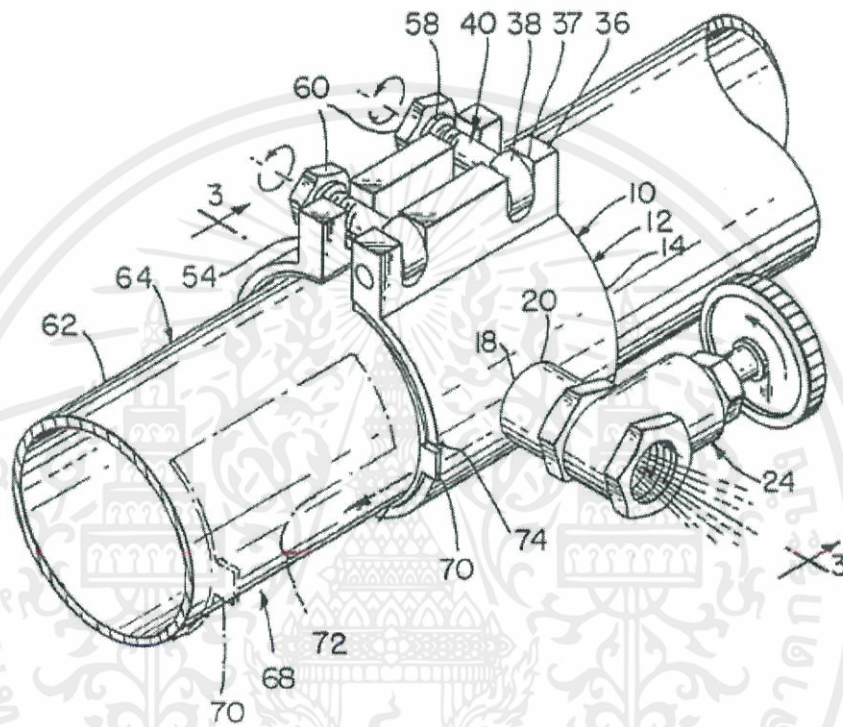
### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

James W. Wells และ Loyd A. Watts (1976) [2] ได้พัฒนาอุปกรณ์ปิดรอยร้าวท่อแบบถาวรเพื่อติดตั้งเข้ากับรอยต่อระหว่างท่อสองท่อที่มีขนาดเหมือนหรือต่างกัน อุปกรณ์ประกอบด้วย ตัวครอบที่แบ่งเป็นสองส่วน ปะเก็นที่ทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึ่งอยู่ระหว่างตัวครอบและท่อที่ต้องการติดตั้ง แผ่นยึดด้านข้างต้องยึดระหว่างตัวครอบทั้งสองส่วนอย่างแน่นหนาและสามารถปรับได้ตามความเหมาะสม ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้สามารถติดตั้งได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของของไหลภายในท่อในระหว่างที่ทำการซ่อมแซม ด้วยเหตุนี้ตัวครอบทั้งสองส่วนจึงน่ามีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสำหรับการปิดรอยร้าวท่อได้



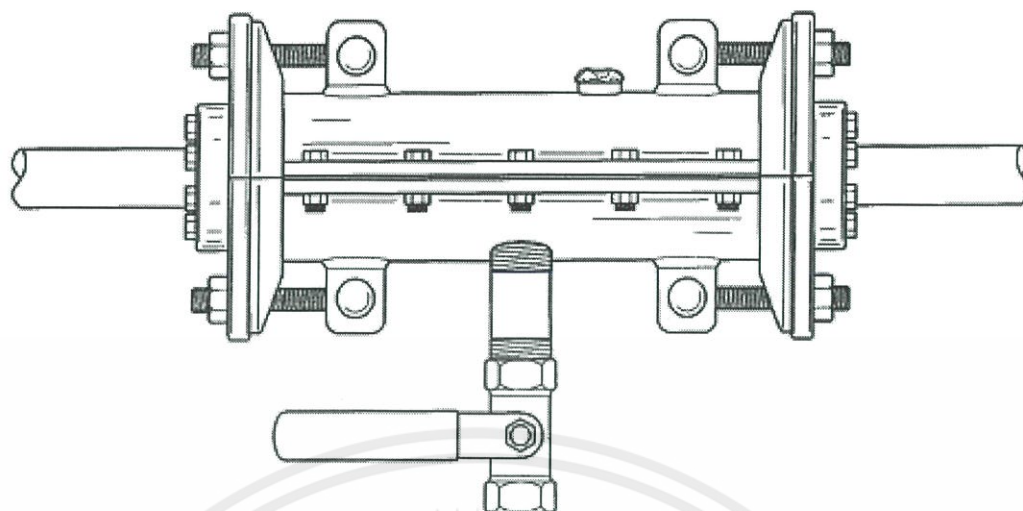
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยร้าวท่อความดัน

George R. Guyatt และ Gregory R. Markley (1987) [3] ได้อธิบายส่วนประกอบของ อุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันซึ่งประกอบด้วยทรงกระบอกกลางแบ่งครึ่งซึ่งอีกครึ่งมีวาล์วอยู่ตรงกลาง แผ่นปะเก็นเจาะรู และแป้นเกลียวยึด การติดตั้งอุปกรณ์นี้ให้เปิดวาล์วก่อน จากนั้นครอบทั้งสองส่วนเข้ากันให้รูที่เจาะผ่านไปยังวาล์วตรงกับรอยรั่วของท่อ นำแผ่นปะเก็นสอดเข้าไปให้รูของปะเก็นตรงกับรอยรั่วสลักเกลียวให้แน่นจนไม่มีของไหลรั่วออกด้านข้าง จากนั้นค่อย ๆ ปิดวาล์วจนของเหลวหยุดไหล



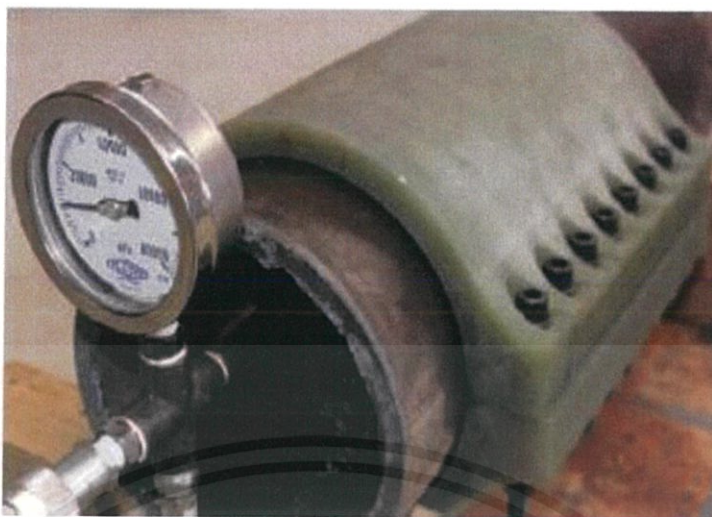
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดัน

Abdulaziz K. Al-Oriar (2008) [4] อุปกรณ์ปิดรอยรั่วที่ได้ถูกคิดค้นขึ้นประกอบด้วย แผ่นเหล็กตามแนวยาวเพื่อใช้แป้นเกลียวยึดขึ้นบนเข้ากับชั้นล่าง เชื่อมติดเข้ากับชั้นที่มีลักษณะทรงกระบอกกลางแบ่งครึ่งตามแนวยาวและภายในแบ่งเป็นช่องจำนวนสามช่องโดยสองช่องด้านข้างเปิดออก ซึ่งหนึ่งในช่องด้านข้างดังกล่าวมีรูสำหรับอัดสารกันรั่วเข้าไปในภายใน ส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนคือ แผ่นปิดปลายทั้งสองด้านของอุปกรณ์ซึ่งมีร่องสำหรับชั้นแป้นเกลียวยึดเข้ากับชั้นทรงกระบอกทั้งบนและล่างเพื่อปิดช่องสำหรับอัดสารกันรั่ว และยังมีวาล์วที่ตำแหน่งช่องกลางของชั้นล่างของส่วนที่เป็นทรงกระบอกกลางสำหรับระบายสารที่รั่วไหลขณะทำการติดตั้ง และรูบริเวณช่องใดช่องหนึ่งของส่วนปลายของอุปกรณ์เพื่อติดตั้งวาล์วสำหรับอัดสารกันรั่วเข้าสู่อุปกรณ์



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดัน

Luke P. Djukic, Wei Siang Sum, K.H. Leong, Timothy W. Eccleshall และ Alan Y.L. Leong. (2015) [5] ได้ทำการศึกษาการออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วโดยสร้างจากวัสดุผสมสองชนิด ความดันออกแบบ 10.5 เมกะปาสคาล โดยการทดลองตัวแปรต่าง ๆ คือ ความหนาของอุปกรณ์ ช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับท่อที่รั่ว ความแข็งแรงของสารกันรั่ว และอุณหภูมิใช้งาน ชั้นแรกทดลองโดยใช้ ต้นแบบอุปกรณ์ความหนาของผนังท่อ 20 มิลลิเมตร ความหนาของแผ่นยึดสลักเกลียวด้านข้าง 42 มิลลิเมตร และช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับท่อที่รั่วเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.4 ปรากฏว่าอุปกรณ์ เสียหายที่ความดัน 13.4 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้อง ชั้นที่สองทดลองโดยใช้ต้นแบบอุปกรณ์ความ หนาของผนังท่อ 35 มิลลิเมตร ความหนาของแผ่นยึดสลักเกลียวด้านข้าง 56 มิลลิเมตร และช่องว่าง ระหว่างอุปกรณ์กับท่อที่รั่วเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ผลแสดงให้เห็นว่าความดันที่ทนได้สามารถผ่านค่า ความดันออกแบบที่มีค่า 10.5 เมกะปาสคาล ได้อย่างแน่นอน ส่วนเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 65 องศา เซลเซียสและ 80 องศาเซลเซียส ได้ค่าความดันที่เสียหายเท่ากับ 19.2 องศาเซลเซียสและ 22.6 องศา เซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้สารกันรั่วที่มีความแข็งแรงตามมาตรฐาน สรุปผลการทดลองว่า ความหนา ของอุปกรณ์ (ผนังท่อและแผ่นยึดสลักเกลียวด้านข้าง) ช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับท่อที่รั่ว รวมทั้ง ความแข็งแรงของสารกันรั่ว ล้วนเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์ ดังนั้นแล้ว ความสามารถในการยับยั้งการรั่วไหลของอุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของ อุปกรณ์และเพิ่มค่าความแข็งแรงของสารกันรั่ว และลดช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับท่อที่รั่ว



รูปที่ 2.4 การทดสอบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วที่ทำจากวัสดุผสม

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 หลักพื้นฐานที่ใช้พิจารณาการออกแบบ (Basic Design Considerations) [6]

ควรคำนึงถึงความดันออกแบบ อุณหภูมิออกแบบ ชนิดวัสดุของท่อ ความหนาท่อ ค่าการกัดกร่อนที่ยอมรับได้ ชนิดของของไหลภายในท่อและอีกหลากหลายข้อจำกัดอื่นที่เกี่ยวข้องกับการซ่อมแซม โดยปกติแล้วจะมีการตรวจสอบการวางระบบท่อและวัสดุของท่อทั้งหมด นอกจากความดันออกแบบและอุณหภูมิออกแบบแล้ว จำเป็นต้องมีการคำนวณแรงกระทำต่อท่อ (Piping Forces) ที่จะส่งผ่านมายังอุปกรณ์ปิดรอยรั่ว แรงที่กระทำต่อท่อมาจากความดัน น้ำหนักของท่อหรือการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ

ขั้นตอนต่อไปทำการคำนวณขนาดของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อเพื่อให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการรั่วได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งตำแหน่งของรอยเชื่อม รอยต่อเล็ก ๆ จุดรองรับท่อ หรือไม่ว่าจะเป็นสิ่งกีดขวางอื่น ๆ ก็มีผลต่อการออกแบบด้วย สามารถแก้ปัญหาได้โดยการลงสำรวจความเสียหายในพื้นที่จริงเพื่อประเมินตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการติดตั้ง ซึ่งส่วนใหญ่อุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อสร้างขึ้นมโดยท่อทรงกระบอกหรือแผ่นเหล็กม้วน ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนออกแบบตามตาราง ASME B31.3 (หรือค่าอื่น ๆ ที่เหมาะสม) ตัวอุปกรณ์จะแบ่งตามแนวระนาบเป็นสองฝา มีแผ่นสำหรับยึดสลักเกลียว (Bolting Bars or Flanges) ติดตั้งตามแนวรอยตัดตั้งแต่ขอบหนึ่งไปยังอีกขอบหนึ่ง สลักเกลียว (Bolts) ใช้ยึดทั้งสองฝาประกบเข้าด้วยกันโดยต้องออกแบบให้สามารถรับยังความดันที่กระทำบนระนาบ รวมถึงการยึดด้วยสลักเกลียวต้องออกแบบให้สามารถรับแรงที่เกิดจากความดันของท่อได้อย่างเหมาะสมเพื่อซ่อมแซมรอยรั่วได้อย่างแน่นอน

การออกแบบจำเป็นต้องให้เกิดการส่งแรงข้ามผ่านบริเวณท่อที่ไม่แข็งแรง ในกรณีที่มีความดันและอุปกรณ์ขนาดเล็ก อุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อสามารถเป็นแผ่นเรียบและออกแบบให้เหมือนกับหน้าแปลนท่อ (ตัวอย่างเช่นใน ASME Code Section VIII, Div.1, Appendix 2) แต่ถ้าความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

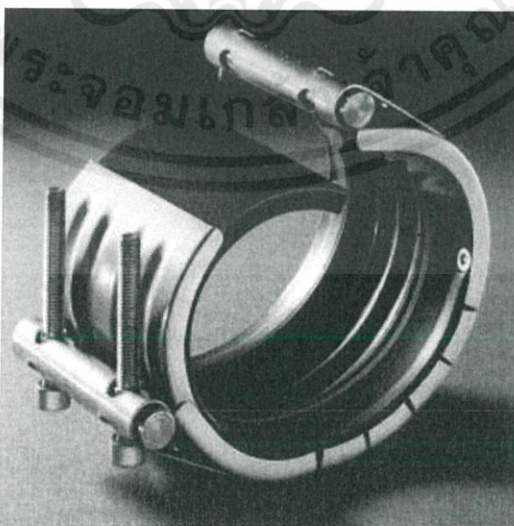
รูปแบบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อที่เป็นทรงกรวย (Conical) หรือท่อลดขนาด (Formed Reducers) จะเป็นที่นิยมนำมาออกแบบมากกว่าแบบแผ่นเรียบเนื่องจากแบบแผ่นเรียบที่ใช้กับความดันสูงจะมีความหนาและรอยเชื่อมจะมีขนาดใหญ่

### 2.2.2 อุปกรณ์ซ่อมแซมท่อ (Repair Clamps) [7]

รูปแบบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วที่ใช้ในการซ่อมแซมกันโดยทั่วไปคือ Stand-Off Repair Clamp โดยปกติจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกผ่าครึ่งเป็นสองส่วนดังรูปที่ 2.5 แต่ในกรณีที่ใช้งานในความดันต่ำ ๆ Repair Clamp สามารถออกแบบเป็นชิ้นเดียวที่มีความยืดหยุ่นได้ (Sprung) ในการติดตั้งเข้ากับท่อที่เกิดการรั่วไหลดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ลักษณะของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อแบบสองชิ้นประกบกัน  
(Half Shells Formed)

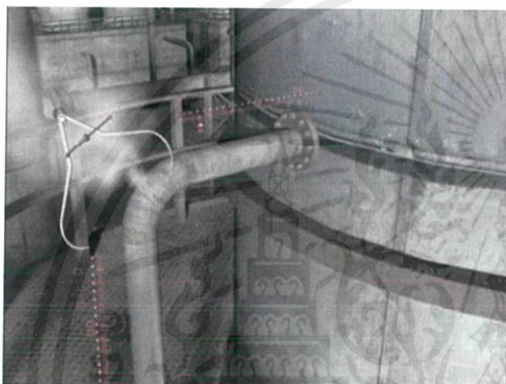


รูปที่ 2.6 ลักษณะของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อแบบชิ้นเดียว  
(Flexible one-piece Assembly)

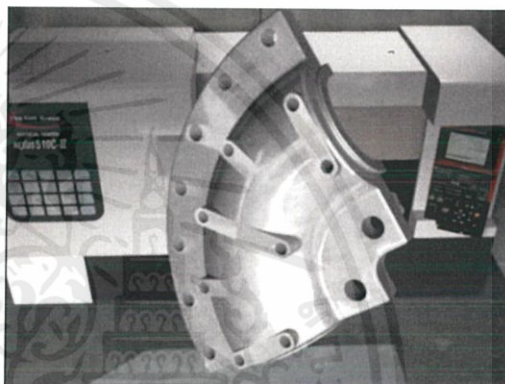
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ปิดรอยรั่วโดยทั่วไป [8]

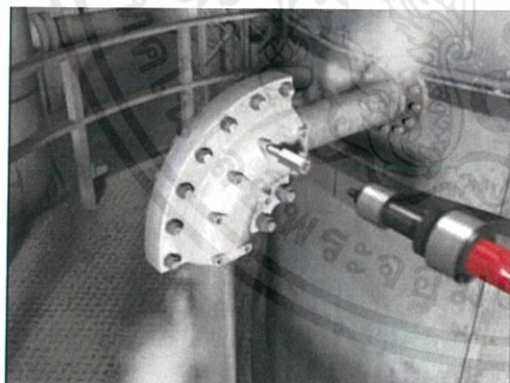
เมื่อท่อเกิดการรั่วขึ้นจะมีการลงพื้นที่ตรวจวัดขนาดของท่อ รอยรั่ว ความแข็งแรง ระยะความยาว เพื่อออกแบบและคำนวณ (รูปที่ 2.7) หลังจากนั้นจึงสร้างอุปกรณ์สำหรับปิดรอยรั่วขึ้น โดยใช้เครื่องมือแปรรูปทางกลต่าง ๆ สร้างอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่ขึ้นมา และนำมาเชื่อมประกอบกัน (รูปที่ 2.8) นำอุปกรณ์ติดตั้งท่อที่รั่ว พร้อมใส่สลักเกลียว และหมุดเกลียว ต่อกวาล์วสำหรับการอัดผลิตภัณฑ์ (Injection Valve) กับรูที่เจาะไว้ (รูปที่ 2.9) พร้อมกับประกอบกระบอกที่ใช้สำหรับอัดความดัน (Injection gun) กับปั๊มโยก (Pneumatic pump) เริ่มอัดผลิตภัณฑ์สำหรับการหยุดการรั่วไหล (Sealant) เข้าไปจนเต็มร่องน้ำยา (รูปที่ 2.10) เป็นอันเสร็จวิธีการปิดรอยรั่ว



รูปที่ 2.7 ท่อที่รั่วและวัดขนาดเพื่อใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 2.9 การสร้างอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน



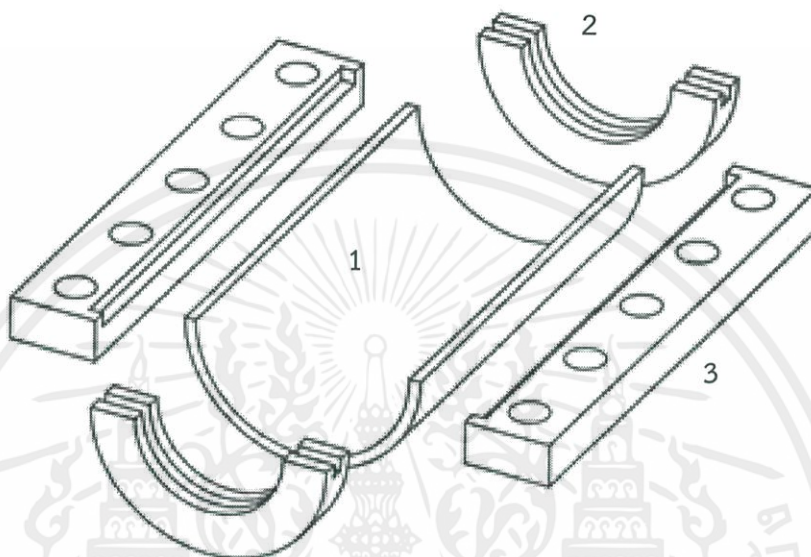
รูปที่ 2.8 ต่อกวาล์วกับกระบอกที่ใช้สำหรับอัดผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.10 อัดผลิตภัณฑ์จนเต็มร่องน้ำยา

## 2.2.4 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อ

จากการศึกษาค้นคว้าลักษณะของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อตรงรูปแบบต่าง ๆ พบว่ารูปแบบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วค่อนข้างคล้ายคลึงกัน คณะผู้จัดเลือกแบบของบริษัท ซีอาร์ เอเชีย (ประเทศไทย) จำกัด โดยมีส่วนประกอบดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่ว

หมายเลข 1 – ผนังท่อ (Shell Walls) ใช้ท่อที่มีขนาดใหญ่กว่าท่อที่รั่ว ทำการผ่าครึ่งตามแนวยาว และกัดร่องสำหรับอัดผลิตภัณฑ์สำหรับการหยุดการรั่วไหล (Sealant)

หมายเลข 2 – แผ่นปิด (End Plates) ใช้เหล็กแผ่นตัดเป็นวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของผนังท่อ (หมายเลข 1) เจาะรูตรงกลางให้มีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของท่อที่รั่ว นำไปตัดแบ่งเป็นสองส่วน และกัดร่องสำหรับอัดผลิตภัณฑ์สำหรับการหยุดการรั่วไหล (Sealant) จากนั้นนำไปเชื่อมติดกับตัวผนังท่อและแผ่นยึดด้านข้าง

หมายเลข 3 – แผ่นยึดด้านข้าง (Ear Plates) ใช้เหล็กแผ่น ตัดให้มีความยาวเท่ากับความยาวของผนังท่อรวมกับความหนาของแผ่นปิด เจาะรูเพื่อใส่สลักเกลียว นำมาเชื่อมติดกับผนังท่อ

สุดท้ายนำสลักเกลียว และหมุดเกลียว (Studs and Nuts) มาสวมที่รูของแผ่นยึดด้านข้าง เพื่อยึดอุปกรณ์ปิดรอยรั่วทั้งสองเข้าด้วยกัน กับบริเวณท่อที่รั่ว

### 2.2.5 ความดันที่ใช้ออกแบบ (Design Pressure) [9]

อุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันทำหน้าที่เพียงครอบท่อเท่านั้น ซึ่งสิ่งที่ช่วยยับยั้งการรั่วไหลนั้นคือ ผลิตภัณฑ์อุดรอยรั่ว (Sealant) โดยสารนี้จะถูกฉีดเข้าไปในช่องว่างระหว่างอุปกรณ์และท่อผ่านทางช่องสำหรับอัดสาร (Injection ports) ซึ่งเจาะทะลุแผ่นยึดด้านข้าง และแผ่นปิด ด้วยความดันจากระบบอัดความดัน (Injection gun) และปั๊มที่มีค่าประมาณ 1.1-1.3 เท่าของความดันภายในท่อ ซึ่งทางทฤษฎีต้องพิจารณาถึงขีดจำกัดของความดัน โดยความแตกต่างระหว่างความดันภายในท่อและความดันที่ใช้ในการฉีดสารจะต้องไม่เกินความดันวิกฤติของท่อเพื่อไม่ให้เกิดการเสียรูปของท่อนั้น ๆ

สำหรับความดันออกแบบที่ใช้ในการคำนวณระบบท่อ (Process piping) ภายใต้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASME B31.3 เพื่อให้ปลอดภัยในการใช้งานจะต้องมีค่า 1.1 เท่าของความดันภายในท่อ (Operating pressure)

### 2.2.6 ผลิตภัณฑ์อุดรอยรั่ว (Sealants) [9]

ผลิตภัณฑ์อุดรอยรั่วถูกออกแบบให้มีการไหลแบบพลาสติก โดยองค์ประกอบหลักของสารคือ ยางเทอร์โมพลาสติก (Thermosetting Rubbers), ยางเสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Rubber), เทฟลอน (Polytetrafluoroethylene), เรซิน และ เส้นใยผสม (Fiber/Graphite mixture) ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกสารให้เหมาะสมมีดังนี้

1. สามารถรักษาอุณหภูมิภายในท่อและรูปทรงของท่อให้คงเดิมอีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีต้องสามารถเข้ากันได้กับกระบวนการไหลของของไหลนั้นด้วย
2. ไม่เสื่อมสภาพเนื่องจากผลกระทบจากอุณหภูมิภายในท่อ ซึ่งโดยปกติองค์ประกอบของสารต้องสามารถรองรับอุณหภูมิได้ถึง 1100 F
3. ไม่ทำปฏิกิริยากับสารภายในท่อ
4. สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนมากับสารจะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนท่อ มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดความเสียหาย ดังนั้นควรใช้สารที่มีความบริสุทธิ์หรือมีปริมาณในระดับที่ยอมรับได้ คือ คลอไรด์, ซัลเฟอร์ และฟลูออไรด์ ต้องต่ำกว่า 0.1 ppm
5. อายุของสารถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิภายในท่อ ดังนั้นต้องมีการประเมินคุณภาพของสารที่สามารถรองรับเงื่อนไขดังกล่าวได้

#### ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อุดรอยรั่ว: CS200 [10]

|                 |  |
|-----------------|--|
| ชื่อผลิตภัณฑ์:  | CS200 Sealant                                  |
| คุณสมบัติ:      | ทนความดันและอุณหภูมิของไอน้ำและเคมีภัณฑ์ได้สูง |
| เหมาะสำหรับ:    | ปะเก็นหน้าแปลนและงานซ่อมแซมท่อ                 |
| อุณหภูมิใช้งาน: | อุณหภูมิห้อง ถึง 1000 องศาฟาเรนไฮต์            |
| ความดันใช้งาน:  | สุญญากาศ ถึง 6000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว            |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                     |   |
|---------------------|---|
| ความความเป็นกรดเบส: | pH 3-12   |
| ส่วนประกอบ:         | ไฟเบอร์(Fibers) แกรไฟต์(Graphite) และ สารเติมแต่งอื่น ๆ |
| กลิ่น:              | ไฮโดรคาร์บอน(Aromatic Hydrocarbon)                      |
| ความถ่วงจำเพาะ:     | 1.12-1.13 กรัมต่อมิลลิลิตร                              |

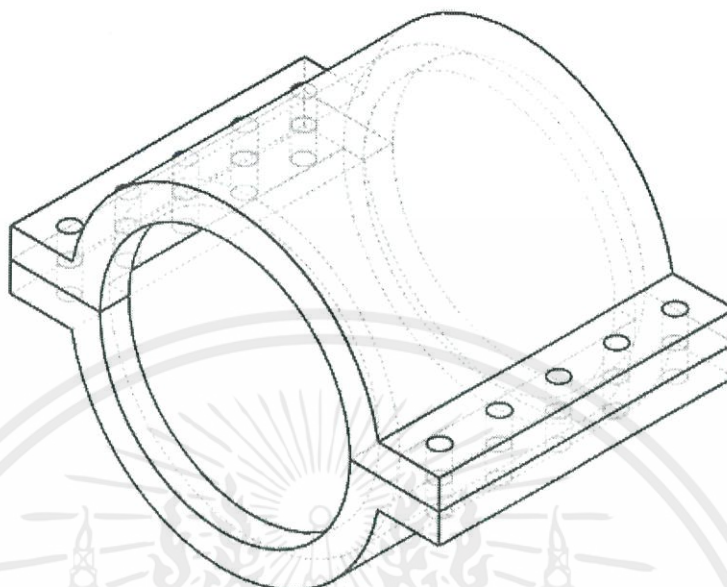
## 2.2.7 วัสดุที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วที่ความดัน (Materials) [11]

วัสดุที่นิยมใช้และมีจำหน่ายภายในประเทศ สำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและโรงไฟฟ้าจะใช้วัสดุดังนี้ ผนังท่อ (Shell Walls) ใช้ A106 Grade B, แผ่นยึดด้านข้าง (Ear Plates) และแผ่นปิด (End Plates) ใช้ A516 Grade 70, สลักเกลียว (Studs) ใช้ A193 Grade B7 และหมุดเกลียว (Nuts) ใช้ A194 Grade 2H

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเหล็ก

|                                      | ASTM          |              |                                 |
|--------------------------------------|---------------|--------------|---------------------------------|
|                                      | A516 Grade 70 | A106 Grade B | A193 Grade B7/<br>A194 Grade 2H |
| Elastic Modulus (psi)                | 29007600      | 29007600     | 27557220                        |
| Poisson's Ratio                      | 0.29          | -            | 0.27                            |
| Shear Modulus (psi)                  | 11603040      | -            | 11603040                        |
| Mass Density (lbs./in <sup>3</sup> ) | 0.2818        | 0.2836       | 0.2836                          |
| Tensile Strength (psi)               | 70343.43      | 60190.77     | 94999.89                        |
| Yield Strength (psi)                 | 37709.88      | 34809.12     | 60190.77                        |

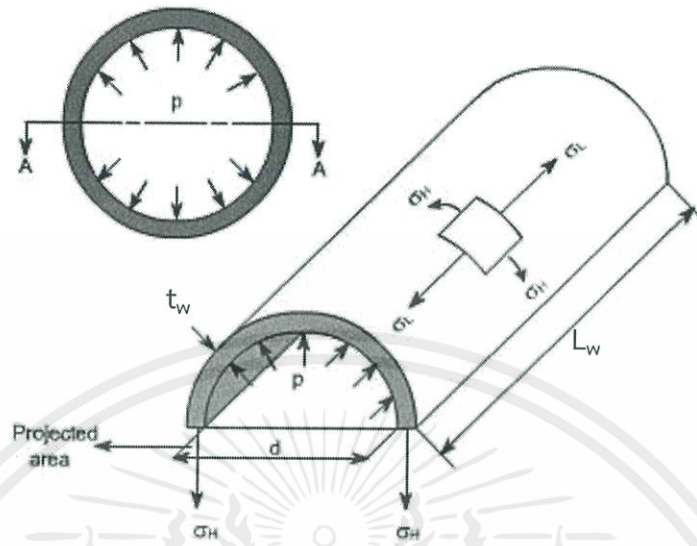
## 2.2.8 การคำนวณความเค้นที่กระทำต่ออุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน

|                |                                |           |  |
|----------------|--------------------------------|-----------|--|
| $\sigma$       | Stress on each Components      | $L_w$     | Length of Shell Wall                                       |
| $\sigma_{all}$ | Stress Allowance               | $L_{ear}$ | Length between stud holes center line to edge of ear plate |
| $\sigma_m$     | Bending Stress                 | $N_s$     | Number of Stud   |
| $\tau$         | Shear Stress                   | $P$       | Pressure of Leaking Pipe                                   |
| $A_p$          | Projection Area                | $P_d$     | Design Pressure  |
| $A_s$          | Tensile Stress Area of Stud    | $R$       | Inner radius   |
| $D_{nw}$       | Nominal Diameter of Shell Wall | $T$       | Temperature of Leaking Pipe                                |
| $D_{ow}$       | Outer Diameter of Shell Wall   | $t_{end}$ | Thickness of End Plate                                     |
| $D_l$          | Diameter of Leaking Pipe       | $t_w$     | Thickness of Shell Wall                                    |
| $H$            | Thickness of Ear Plate         | $W$       | Length of Ear Plate  |
| $K$            | Coefficients for Length Ratio  |           |  |

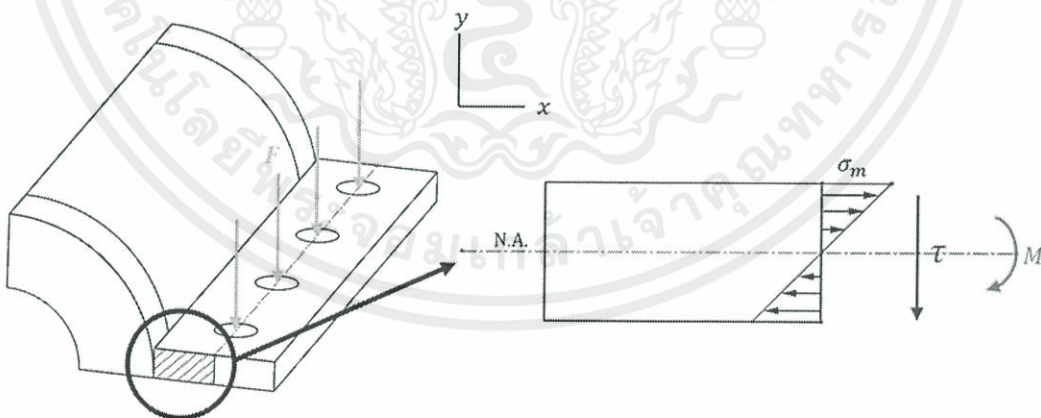
### 2.2.8.1. ความเค้นที่เกิดบริเวณผนังท่อ (Shell Walls) [12]



รูปที่ 2.13 ทิศทางของแรงเนื่องจากความดันที่กระทำต่อผนังท่อ  
( Prof. SATISH C. SHARMA [13] )

$$\sigma = \frac{P_d(R + 0.6t_w)}{t_w} \quad (2-1)$$

### 2.2.8.2. ความเค้นบริเวณแผ่นยึดด้านข้าง (Ear Plate) [14]



รูปที่ 2.14 ความเค้นรวมที่เกิดขึ้นบนแผ่นยึดด้านข้าง

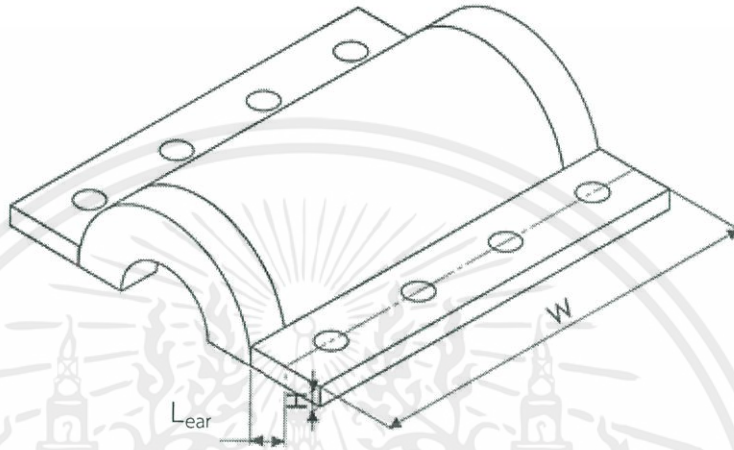
Combined Stress

$$\sigma = \frac{\sigma_m}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (2-2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_m = \frac{(P_d \times A_p \times L_{ear})(H/2)}{\frac{1}{12} \times W \times H^2} \quad (2-3)$$

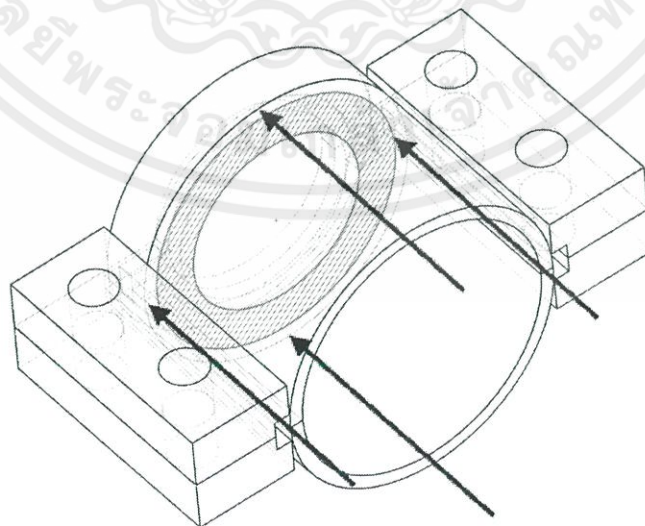
$$\tau = \frac{P_d \times A_p}{W \times H} \quad (2-4)$$



รูปที่ 2.15 ขนาดของแผ่นยึดด้านข้าง

### 2.2.8.3. ความเค้นบริเวณแผ่นปิด (End Plate) [15]

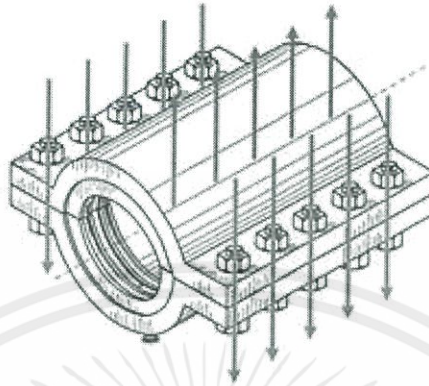
$$\sigma = \frac{KP_d R^2}{t_e^2} \quad (2-5)$$



รูปที่ 2.16 พื้นที่รับแรงภายในบริเวณแผ่นปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.2.8.4. ความเค้นบริเวณสลักเกลียว (Studs) [14]



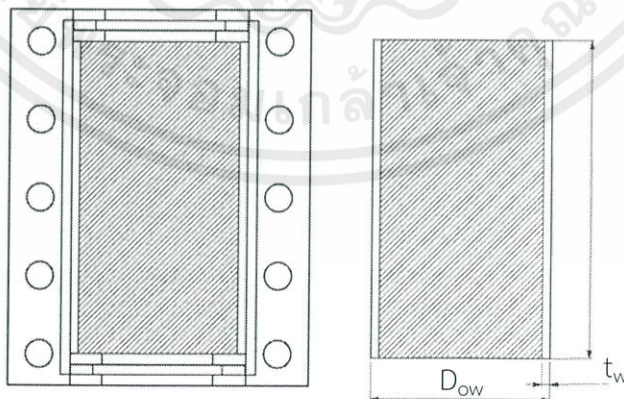
รูปที่ 2.17 ทิศของแรงที่กระทำต่อสลักเกลียว  
( Laurence S. Smith, Jr. [16] )

แรงที่เกิดจากความดันภายในท่อ = แรงที่สลักเกลียวต้านการเคลื่อนที่

$$P \times A_p = \sigma \times (N_s \times A_s) \quad (2-6)$$

$$\sigma = \frac{P_d \times A_p}{N_s \times A_s} \quad (2-7)$$

พื้นที่รับแรงดันภายในท่อ



รูปที่ 2.18 พื้นที่รับแรงภายในอุปกรณ์

$$A_p = (D_{ow} - (2 \times t_w)) \times L_w \quad (2-8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.9 ทฤษฎีความเสียหาย [17]

ในการออกแบบชิ้นงานทางวิศวกรรมจำนวนมากนั้น ชิ้นงานจะรับภาระหลายอย่างพร้อมกัน เช่น ความเค้นดึง ความเค้นกด และความเค้นเฉือน ซึ่งเรียกว่าความเค้นผสม(Combined Stress) และเป็นแบบสามมิติ จึงมีผู้พยายามตั้งทฤษฎีขึ้นมาใช้อธิบายถึงความเสียหายของชิ้นงาน โดยการเทียบกับสิ่งที่สามารถตรวจสอบด้วยการทดลองได้เช่น ความเค้นดึงจุดคราก (Yield tensile strength) , ความเค้นดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) หรือความเครียด (Strain) ซึ่งค่าทั้งหมดได้จากการทดลองดึงชิ้นทดสอบในแนวแกนหรือแบบมิติเดียว ทฤษฎีเหล่านี้เรียกว่า ทฤษฎีความเสียหาย (Failure Criterion Theorem) และเนื่องจากวัสดุเหนียว (Ductile Material) และเปราะ (Brittle Material) เกิดความเสียหายที่ต่างกัน โดยวัสดุเหนียวจะเกิดความเสียหายเมื่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุถึงจุดครากซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ เพราะเมื่อความเค้นเกินค่านี้ไปแล้ว วัสดุจะไม่สามารถคืนรูปกลับสู่สภาพเริ่มต้นได้ ดังนั้นเมื่อก้าวถึงความเสียหาย (Failure) ของวัสดุเหนียวก็จะต้องพุดถึงจุดคราก ส่วนวัสดุเปราะจะไม่มีแต่ความเสียหายเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อวัสดุรับความเค้นจนเกิดการแตกหรือแยกของเนื้อวัสดุ ดังนั้นเมื่อก้าวถึงความเสียหาย (Failure) ของวัสดุเปราะก็จะต้องพุดถึงความเค้นสูงสุดซึ่งคือค่าความเค้นที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก

#### 2.2.9.1. ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress) [18]

ทฤษฎีนี้เกิดจากการสังเกตว่าวัสดุเหนียวจะเกิดการคราก เนื่องจากผลของการเลื่อน หรือเฉือนในระนาบของผลึกโดยทฤษฎีนี้กล่าวว่า “วัสดุจะเริ่มครากเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้น มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดขณะที่เริ่มครากของชิ้นส่วนทดสอบด้วยการดึงอย่างง่าย”

สำหรับการทดสอบการดึงอย่างง่าย  $\sigma = P/A$  ความเค้นเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นบนระนาบที่ทำมุม  $45^\circ$  กับระนาบของการดึง โดยมีขนาด  $\tau_{max} = \sigma/2$  ดังนั้น ความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดครากจึงมีค่า  $\tau_{max} = S_y/2$  สำหรับสภาวะความเค้นใน 3 มิติ ความเค้นหลักในแต่ละระนาบจะมีขนาดเรียงตามลำดับคือ  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  นั่นคือความเค้นเฉือนสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ  $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  ดังนั้น สำหรับสภาวะความเค้นโดยทั่วไปจะได้

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2} \quad (2-9)$$

เมื่อ  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  หรือ  $\sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y$

ให้สังเกตว่า สมการนี้บอกให้ทราบว่าความต้านแรงครากในการเฉือนจะมีค่าดังนี้

$$S_{sy} = 0.5S_y \quad (2-10)$$

เพื่อวัตถุประสงค์ในการออกแบบ เราสามารถปรับปรุงสมการที่(2-1) ให้มีค่าแฟกเตอร์ในการออกแบบรวมอยู่ด้วย คือ

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{S_y}{n} \quad (2-11)$$

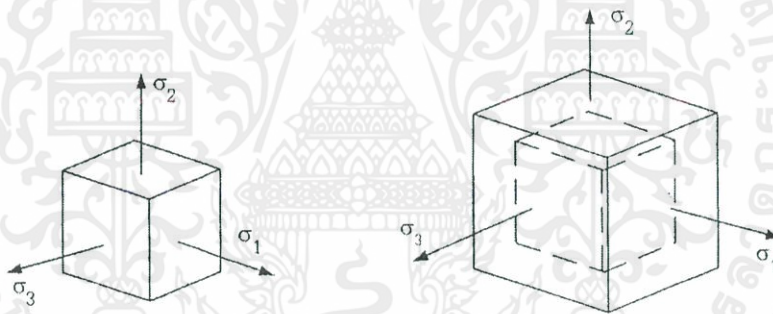
เมื่อ n คือ ค่าความปลอดภัย (Safety Factor)

### 2.2.9.2. ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Distortion Energy) [19]

พลังงานความเครียด(Strain Energy) ได้ถูกค้นพบว่า มีผลต่อการทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรเกิดความเสียหาย โดยการวิเคราะห์ค่า Strain Energy ต่อหน่วยปริมาตร(U) ได้จาก

$$U_{axial} = 0.5\sigma_x \varepsilon_x \quad (2-12)$$

สามารถเขียนในสภาวะของระนาบหลัก 1,2 และ 3 ได้เป็นพลังงานรวมทั้งสามแนวแกนได้ โดยการยืดหดตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงขนาดเอลิเมนต์ในระนาบหลัก

สามารถเขียนพลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรในรูปของสมการความเค้นหลักดังในสมการ (2-13)

$$U = \left( \frac{1}{2E} \right) (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)) \quad (2-13)$$

ถ้าค่า  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  ความเสียหายก็จะเกิดขึ้นน้อย ซึ่งในความเป็นจริงเกิดขึ้นได้ยากมาก จึงอาศัยค่าเฉลี่ยความเค้นสาเหตุของการที่พลังงานจากการยืดหดตัวในแต่ละแนวแกนไม่เท่ากัน จะนำไปสู่การเกิดความเสียหายกับชิ้นส่วนเครื่องจักรต้น ( $\sigma_{avg}$ ) ในการคาดการณ์ความเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2-14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Strain Energy ของความเค้นเฉลี่ยหาได้โดยการแทนค่าความเค้นหลักแต่ละแนวแกนด้วยค่าความเค้นเฉลี่ยในสมการ (2-13) จะได้ว่า

$$U_{avg} = \frac{3(1-2\nu)}{2E} \sigma_{avg}^2 \quad (2-15)$$

หรือเขียนในสมการรูปของความเค้นหลักโดยแทนค่าความเค้นเฉลี่ย ( $\sigma_{avg}$ ) ในสมการ (2-15) จะได้

$$U_d = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)) \quad (2-16)$$

Distortion Energy คือ ความแตกต่างระหว่าง Strain Energy ของเอลิเมนต์ใด ๆ กับ Strain Energy ของความเค้นเฉลี่ย ( $U_{avg}$ )

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3) \quad (2-17)$$

การเกิดความเสียหายจะขึ้นอยู่กับ Distortion Energy โดยการสังเกตจากผลการทดลองนำแท่งโลหะไปทดสอบแรงดึง แล้วสังเกตค่าของ Distortion Energy ต่อหน่วยปริมาตร โดยจะถือว่าความเค้นจุดครากวัสดุเป็นจุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย  $\sigma_1 = \sigma_x = S_y$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$

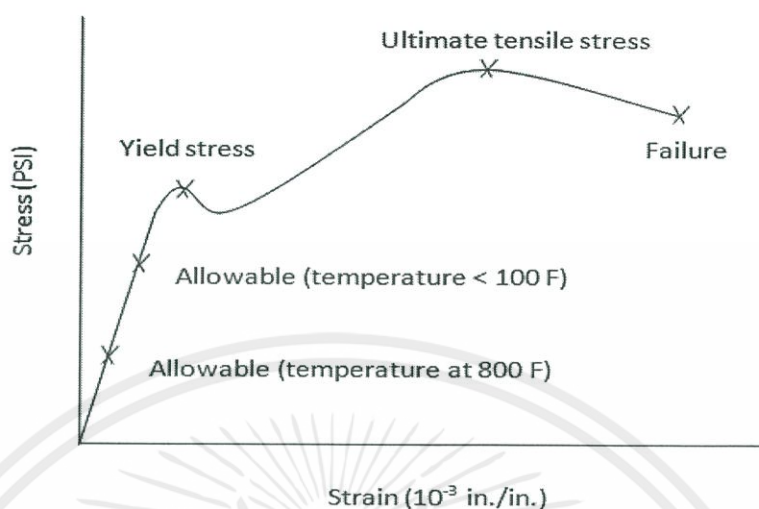
แทนค่าความเค้นจุดครากที่ใช้งานได้อย่างปลอดภัยด้วยการให้ค่า  $\sigma_1 = \frac{S_y}{S.F.}$  และสามารถหา Distortion Energy ที่ทำให้วัสดุทดสอบเกิดความเสียหายได้ด้วยการแทนค่าในสมการ (2-17)

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} \left( \frac{S_y}{S.F.} \right)^2 \quad (2-18)$$

ผลลัพธ์ของสมการ Distortion Energy ที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบแรงดึงเกิดความเสียหายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระนาบความเค้น 3 มิติ ได้ด้วยการพิจารณาสมการ (2-17) และสมการ (2-18) จะได้ว่า

$$\left( \frac{S_y}{S.F.} \right)^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3 \quad (2-19)$$

### ความเค้นอนุญาตของท่อ (Stress Allowance) [20]



รูปที่ 2.20 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด สำหรับเหล็กเหนียว (ASTM A53 Grade B)

ความเค้นอนุญาต คือ ค่าความเค้นจุดครากหารด้วยค่าตัวประกอบความปลอดภัย เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำท่อและอุณหภูมิใช้งานท่อ เป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม โดยเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับท่อ ดังนั้นความเค้นดัดที่กระทำต่อท่อต้องมีค่าไม่เกินค่าความเค้นดัดอนุญาต

#### 2.2.10 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [21]

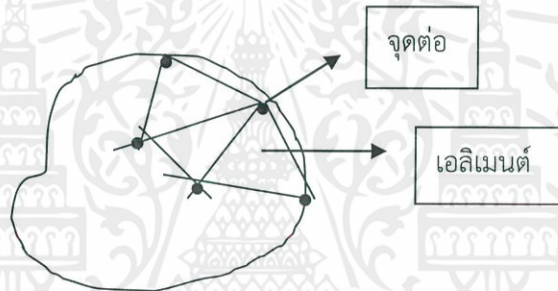
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหนึ่งในหลายวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่ว ๆ ไปที่ไม่ซับซ้อน เราจะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใด ๆ ของชิ้นส่วนโดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่า ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งต่าง ๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอ และบางบริเวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของภาระอย่างฉับพลัน หรือใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equations) หรือสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ได้ ฉะนั้นจึงต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์

การแก้ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะไม่วิเคราะห์ปัญหาที่เดียวทั้งระบบเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทั่ว ๆ ไป แต่เราจะวิเคราะห์หาค่าทีละเอลิเมนต์แล้วนำมารวมเข้ากันเป็นผลเฉลยของระบบ เช่น การหาความเค้นของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างของระบบ ในปัจจุบันระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เข้ามามีบทบาทต่อการทำงานของวิศวกรเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมได้มีการนำไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์เข้ามาใช้เพื่อทำนายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเสมือนการใช้งานจริงได้โดยตรงทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ จึงไม่ต้องมีการลองผิดลองถูก ซึ่งทำให้ลดเวลาและปริมาณในการทำงาน ลดปริมาณวัสดุที่ใช้ รวมทั้งหลีกเลี่ยงการทดลองที่ไม่จำเป็น และยังทำให้ชิ้นงานที่ถูกออกแบบมา มีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงาน

หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การแบ่งสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ (Domain) ออกเป็นส่วนย่อย เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมักจะอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ที่จุดตัดของกรอบเอลิเมนต์เรียกว่า จุดต่อ (Node) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการสร้างฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าตอบที่จุดต่อเหล่านั้นพร้อม ๆ กันโดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.21 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย

ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามส่วนของโปรแกรมซึ่งมี 3 ขั้นตอนดังนี้

1. Pre-Processing คือขั้นตอนการเตรียมข้อมูลเพื่อคำนวณ โดยมีข้อมูลดังนี้
  - 1.1 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 3 มิติ
  - 1.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Properties of Material)
  - 1.3 การกำหนดการยึดจับ (Fixture)
  - 1.4 การกำหนดจุดเชื่อมต่อ (Connector)
  - 1.5 การกำหนดแรงกระทำ (Load)
  - 1.6 การแบ่งแบบจำลองคำนวณ (Mesh)
2. Solve-Processing คือขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลย
3. Post-Processing คือการแสดงผลจากการวิเคราะห์

## บทที่ 3

### การดำเนินงาน

การสร้างโปรแกรมคำนวณความเค้นเพื่อหาขนาดอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันที่เหมาะสมสำหรับท่อรั่วขนาด 2, 4, 6 และ 8 นิ้ว ทำได้โดยการกำหนดขนาดของอุปกรณ์ตัวอย่าง และทำการปรับเปลี่ยนขนาดของแต่ละชิ้นส่วนซึ่งแบ่งออกเป็น 5 กรณี จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความเค้นด้วยโปรแกรมคำนวณที่สร้างขึ้นจาก MS Excel 2016 พร้อมทั้งวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดย SolidWorks Simulation 2016 และนำค่าที่จากจากการคำนวณทั้งสองมาเปรียบเทียบ เพื่อปรับปรุงโปรแกรมคำนวณให้สามารถใช้งานในกรณีอื่น ๆ และนำผลที่ได้ไปสร้างตารางการออกแบบ

#### 3.1 ตัวอย่างขนาดของอุปกรณ์เพื่อใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ค่าความเค้น

##### 3.1.1 กรณีที่ 1 ขนาดต้นแบบ

ขนาดของท่อที่รั่ว NPS 8 และยาว 10 นิ้ว

ผนังท่อ NPS 10 และความหนา 40s

ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 1 นิ้ว

ความหนาของแผ่นปิด 1 นิ้ว

ขนาดของสลักเกลียว 5/8

จำนวนของสลักเกลียว 10 ตัว

##### 3.1.2 กรณีที่ 2 เปลี่ยนความหนาของผนังท่อ 4 ขนาด

ขนาดของท่อที่รั่ว NPS8 และยาว 10 นิ้ว

ผนังท่อ NPS 10 และความหนา 5s, 10s, 40s และ 80s

ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 1 นิ้ว,

ความหนาของแผ่นปิด 1 นิ้ว

ขนาดของสลักเกลียว 5/8 นิ้ว

จำนวนของสลักเกลียว 10 ตัว

##### 3.1.3 กรณีที่ 3 เปลี่ยนความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 3 ขนาด

ขนาดของท่อที่รั่ว NPS8 และยาว 10 นิ้ว

ผนังท่อ NPS 10 และความหนา 40s

ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 0.5, 1 และ 1.5 นิ้ว

ความหนาของแผ่นปิด 1 นิ้ว  
 ขนาดของสลักเกลียว 5/8 นิ้ว  
 จำนวนของสลักเกลียว 10 ตัว

### 3.1.4 กรณีที่ 4 เปลี่ยนขนาดของสลักเกลียว 3 ขนาด

ขนาดของท่อที่รั่ว NPS8 และยาว 10 นิ้ว  
 ผนังท่อ NPS 10 และความหนา 40s  
 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 1 นิ้ว  
 ความหนาของแผ่นปิด 1 นิ้ว  
 ขนาดของสลักเกลียว 5/8, 3/4 และ 7/8 นิ้ว  
 จำนวนของสลักเกลียว 10 ตัว

### 3.1.5 กรณีที่ 5 เปลี่ยนจำนวนของสลักเกลียว 5 จำนวน

ขนาดของท่อที่รั่ว NPS8 และยาว 10 นิ้ว  
 ผนังท่อ NPS 10 และความหนา 40s  
 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 1 นิ้ว  
 ความหนาของแผ่นปิด 1 นิ้ว  
 ขนาดของสลักเกลียว 5/8 นิ้ว  
 จำนวนของสลักเกลียว 4, 6, 8 และ 10 ตัว

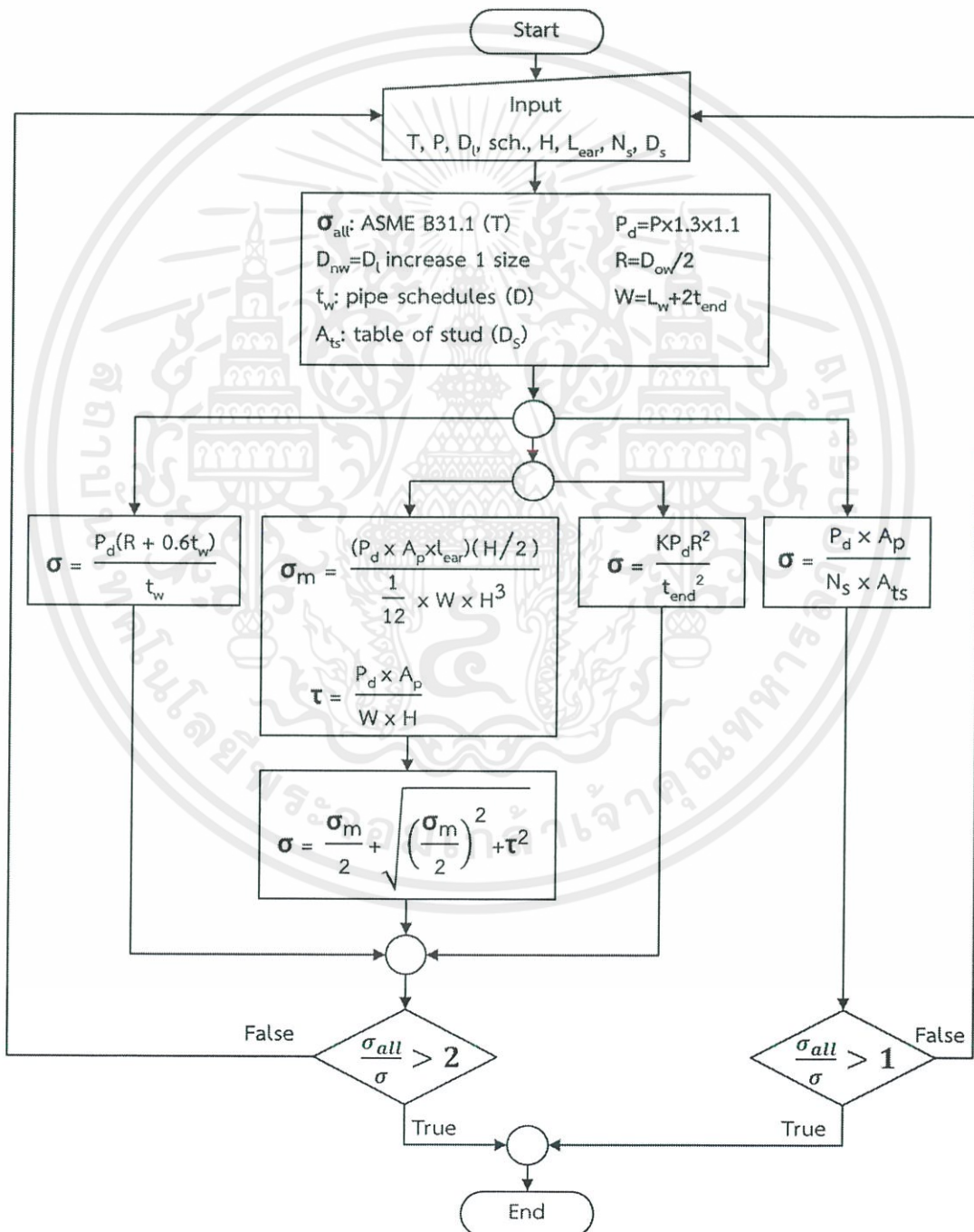
## 3.2 การสร้างโปรแกรมคำนวณหาค่าความเค้นของอุปกรณ์

การเขียนโปรแกรมคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นบนแต่ละชั้นส่วนของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน สามารถทำได้โดยนำสมการจากบทที่ 2 ป้อนเข้าโปรแกรม MS Excel 2016 ความดันออกแบบสำหรับการคำนวณจากหัวข้อ 2.2.5 จะได้

$$P_d = P \times 1.3 \times 1.1 \quad (3-1)$$

### 3.2.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรมคำนวณ (Flow Chart)

การทำงานของโปรแกรมคำนวณที่สร้างจาก MS Excel 2016 จะเริ่มจากการป้อนค่าต่าง ๆ เข้าในโปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณเพื่อหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนแต่ละชิ้นส่วน โดยใช้สมการการคำนวณจากหัวข้อ 2.2.8 จากนั้นนำค่าความเค้นที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าความเค้นอนุญาตของวัสดุนั้น ๆ หากค่าที่ได้ไม่ตรงตามเงื่อนไข โปรแกรมจะกลับไปรับค่าใหม่และคำนวณอีกครั้งจนกระทั่งมีค่าตรงตามเงื่อนไข และโปรแกรมจะสิ้นสุดการทำงาน ดังรูปที่ 3.1

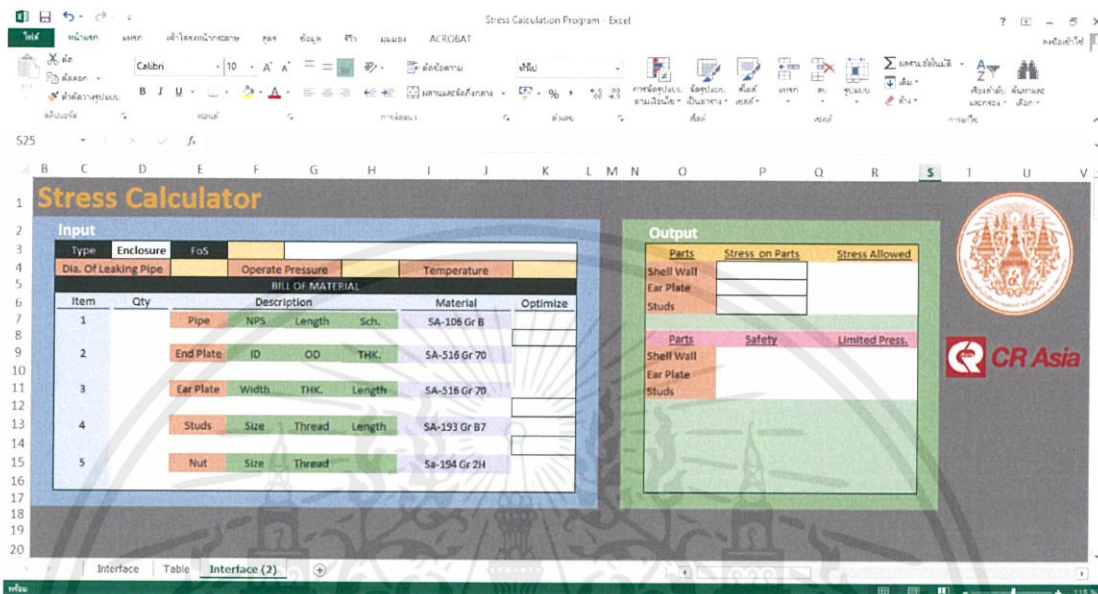


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม MS Excel 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

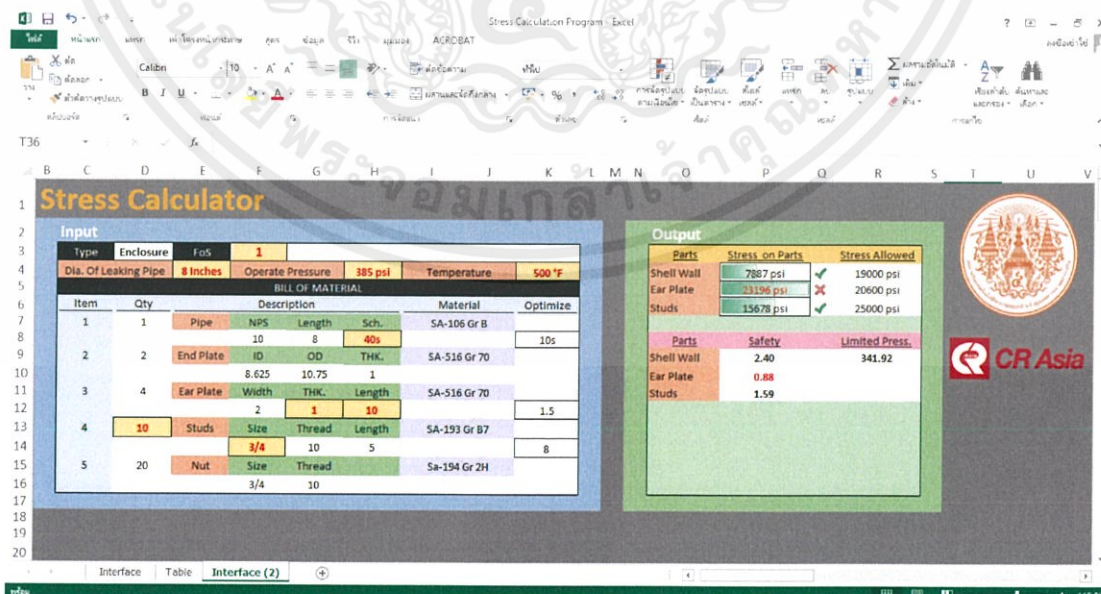
### 3.2.2 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมคำนวณ

1) พิมพ์คำบรรยายตัวแปรที่ต้องการป้อนข้อมูล (Input) และคำบรรยายค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ (Output) รวมทั้งคำบรรยายตัวแปรที่เกี่ยวข้องลงในโปรแกรม MS Excel 2016 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การพิมพ์คำบรรยายตัวแปรต่าง ๆ ลงในโปรแกรม

2) ป้อนสมการ (2-1), (2-2), (2-3), (2-4), (2-5), (2-6), (2-7) และ (2-8) ลงในโปรแกรม MS Excel 2016 โดยกำหนดให้ผนังท่อและแผ่นยึดด้านข้างมีค่าความปลอดภัย 2 และสลักเกลียวมีค่าความปลอดภัย 1 ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การพิมพ์คำบรรยายตัวแปรต่าง ๆ ลงในโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมการคำนวณ

เริ่มจากการป้อนท่อรั่วขนาด 8 นิ้ว ความดันทำงาน 385 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิทำงาน 500 องศาฟาเรนไฮต์ จากนั้นกำหนดค่าความยาวของอุปกรณ์ที่ 10 นิ้ว เลือกความหนาของผนังท่อแบบ 40s ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 1 นิ้ว สลักเกลียวขนาด 5/8 นิ้ว จำนวน 10 ตัว ดังรูปที่ 3.4

| Input                |           |                             |              |             |        |
|----------------------|-----------|-----------------------------|--------------|-------------|--------|
| Type                 | Enclosure | FoS                         | 1            |             |        |
| Dia. Of Leaking Pipe | 8 Inches  | Operate Pressure            | 385 psi      | Temperature | 500 °F |
| BILL OF MATERIAL     |           |                             |              |             |        |
| Item                 | Qty       | Description                 | Material     | Optimize    |        |
| 1                    | 1         | Pipe NPS Length Sch.        | SA-106 Gr B  |             |        |
|                      |           | 10 8 40s                    |              |             | 10s    |
| 2                    | 2         | End Plate ID OD THK.        | SA-516 Gr 70 |             |        |
|                      |           | 8.625 10.75 1               |              |             |        |
| 3                    | 4         | Ear Plate Width THK. Length | SA-516 Gr 70 |             |        |
|                      |           | 2 1 10                      |              |             | 1.5    |
| 4                    | 10        | Studs Size Thread Length    | SA-193 Gr B7 |             |        |
|                      |           | 5/8 11 5                    |              |             | 10     |
| 5                    | 20        | Nut Size Thread             | Sa-194 Gr 2H |             |        |
|                      |           | 5/8 11                      |              |             |        |

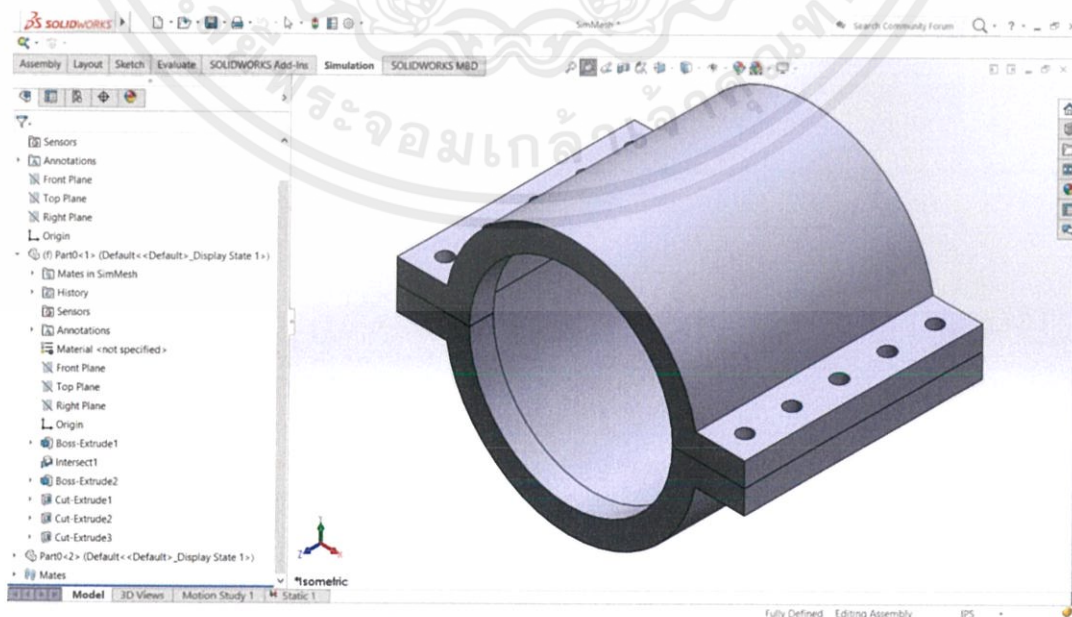
รูปที่ 3.4 หน้าต่างแสดงการป้อนข้อมูล

### 3.3 การวิเคราะห์ความเค้นของอุปกรณ์โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ความดันออกแบบสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จากหัวข้อ 2.2.5 จะได้

$$P_d = P \times 1.3 \tag{3-2}$$

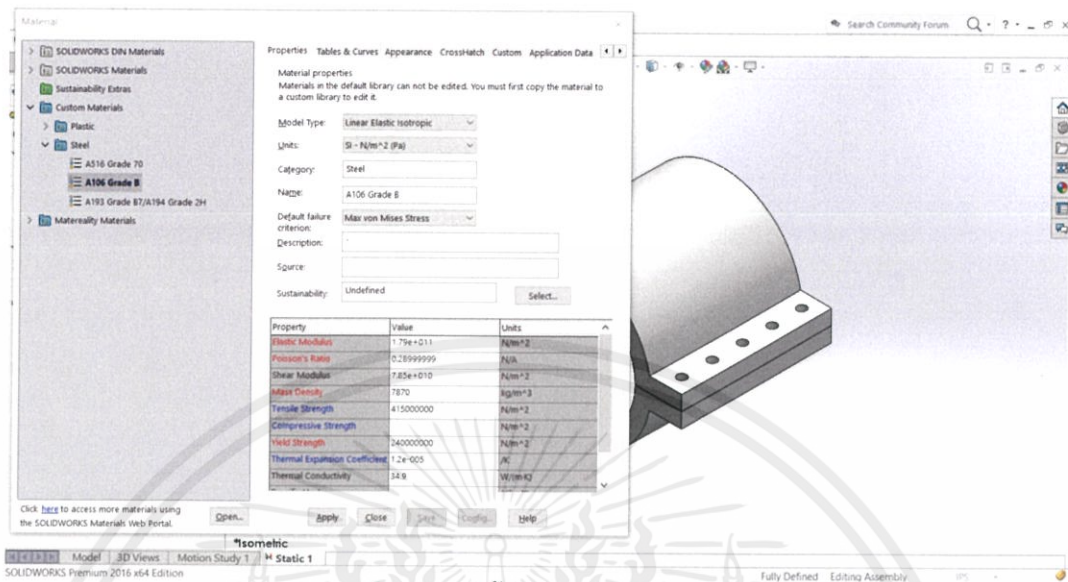
1. การสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ 3 มิติ โดยโปรแกรม SolidWorks Simulation 2016



รูปที่ 3.5 แบบจำลองอุปกรณ์ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การกำหนดคุณสมบัติโดยเลือกวัสดุ A106 Grade B ที่ได้ทำการเพิ่มเข้าไป

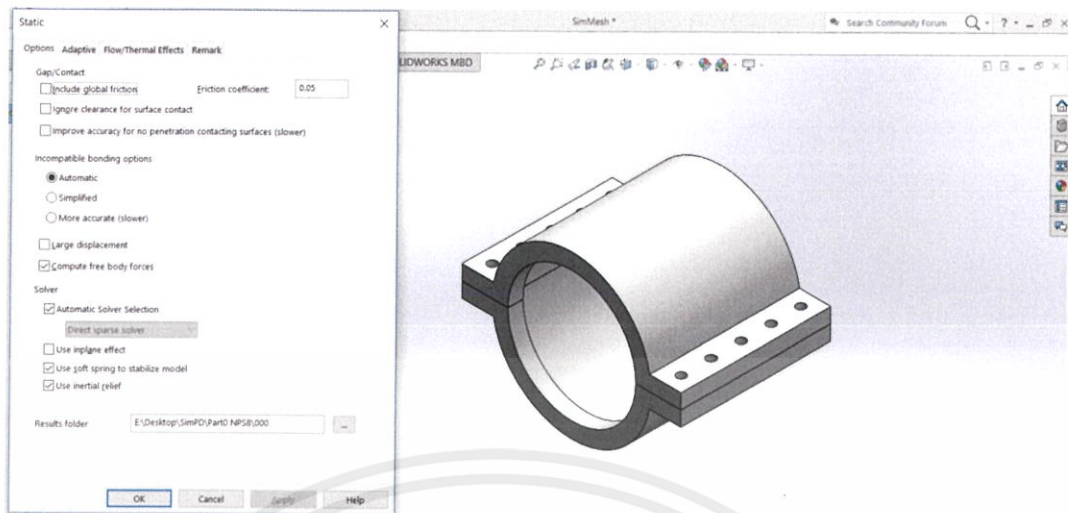


รูปที่ 3.6 การตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุ

## 3. กำหนดการยึดจับ (Fixture) [22]

เลือกการยึดจับแบบยืดหยุ่น (Use soft spring to stabilize model) เนื่องจากชิ้นงานมีการขยายตัวได้ แต่หากใช้การจับยึดเป็นแบบยึดกับที่ (Fixed) ชิ้นงานจะไม่สามารถขยายตัวได้เลย แต่หากไม่กำหนดจุดยึดจับเลยโปรแกรมจะไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากตัวแปรไม่เพียงพอ ดังนั้นจะใช้คำสั่งนี้ซึ่งโปรแกรมจะสร้างสปริงเสมือนมารองรับโมเดลซึ่งมีค่าคงที่สปริงน้อยมาก ๆ (เมื่อโมเดลขยายตัวความผิดพลาดที่เกิดจากสปริงไปยึดจะน้อยไปด้วย) ทำให้ตัวแปรเพียงพอที่จะคำนวณได้

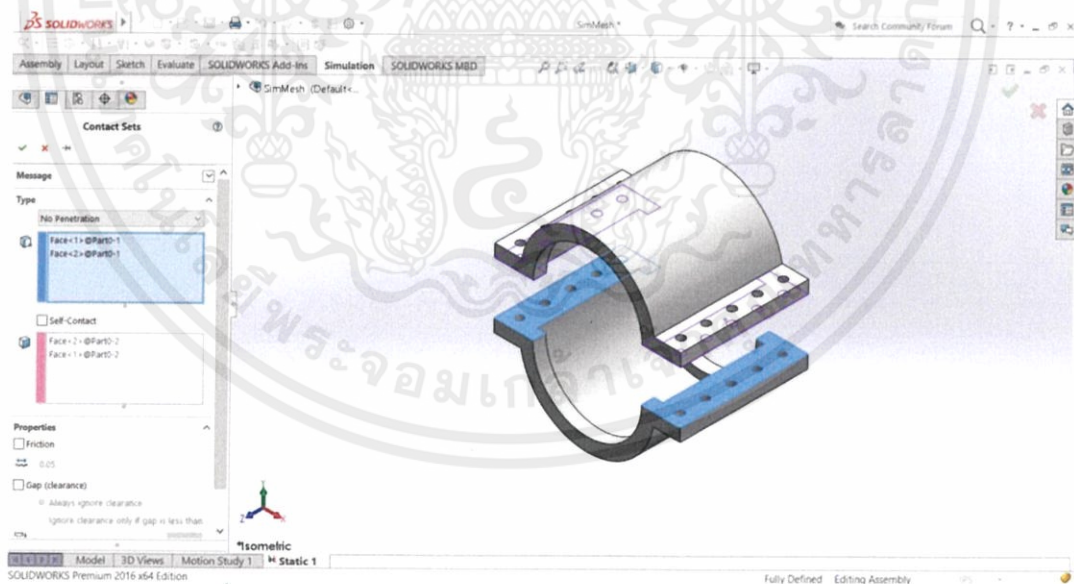
เลือกค่าลดเซยความเฉื่อย (Use inertial relief) เป็นการบอกโปรแกรมว่าจะไม่คิดความเฉื่อยในการวิเคราะห์ เพราะงานชิ้นนี้ไม่มีการจูดจับยึด (Fixture) ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ ถึงแม้ว่าแรงที่กระทำเป็นแรงสมดุลก็ตาม (หักล้างกันได้พอดี) แต่ถ้าไม่เลือกข้อนี้โปรแกรมก็อาจจะเกิดข้อผิดพลาดเนื่องจากชิ้นงานไม่อยู่นิ่ง



รูปที่ 3.7 การตั้งค่าการยึดจับโดยการกำหนดการยึดจับแบบยึดหยุ่นและเลือกค่าขดเชยความเฉื่อย

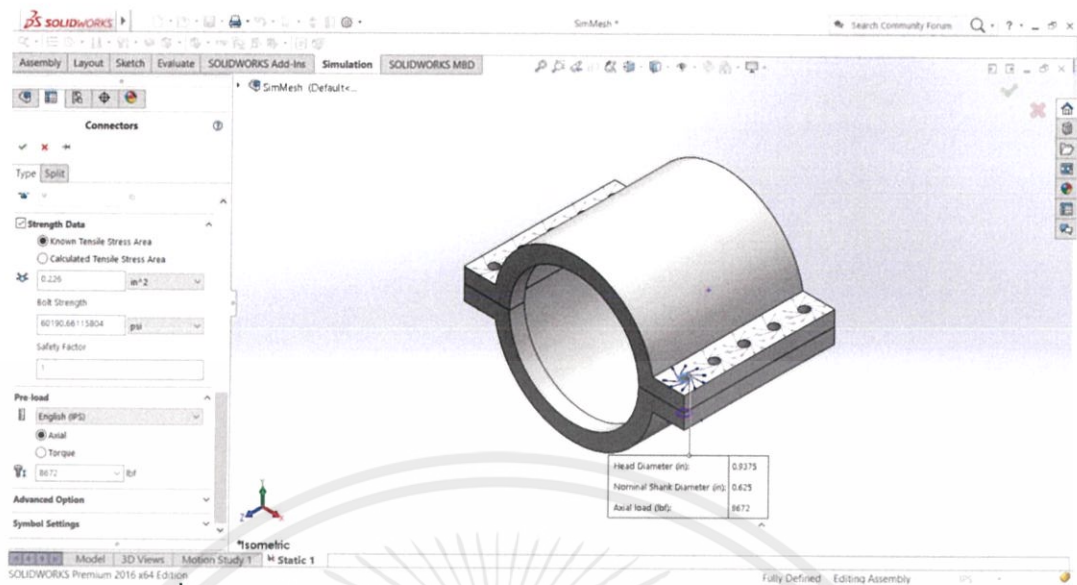
#### 4. การกำหนดจุดเชื่อมต่อ (Connector)

สำหรับการกำหนดผิวสัมผัสระหว่างอุปกรณ์ชิ้นบนและอุปกรณ์ชิ้นล่างเป็นแบบสัมผัสกัน (No Penetration) โดยเมื่อเกิดการเสียรูปชิ้นงานจะไม่ทับซ้อนกันดังรูปที่ 3.8 กำหนดการยึดด้วยสลักเกลียวโดยการกำหนดค่าความแข็งแรงของสลักเกลียว และค่าแรงขันเริ่มต้นดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 การเลือกสองผิวสัมผัสแบบสัมผัสกัน (No Penetration)

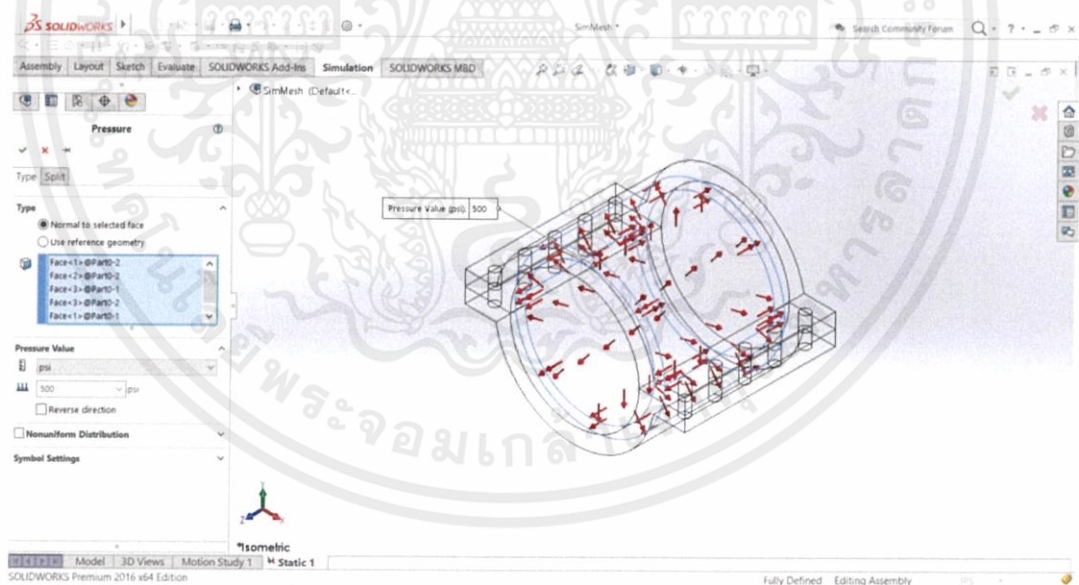
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การกำหนดค่าความแข็งแรงของสลักเกลียว และค่าแรงขึ้นเริ่มต้น

#### 5. การกำหนดแรงกระทำภายนอก (Load)

กำหนดขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำต่ออุปกรณ์ โดยเลือกเป็นความดันให้กระทำภายในผนังท่อ และด้านในแผ่นปิด



รูปที่ 3.10 การกำหนดขนาดและทิศทางของความดัน

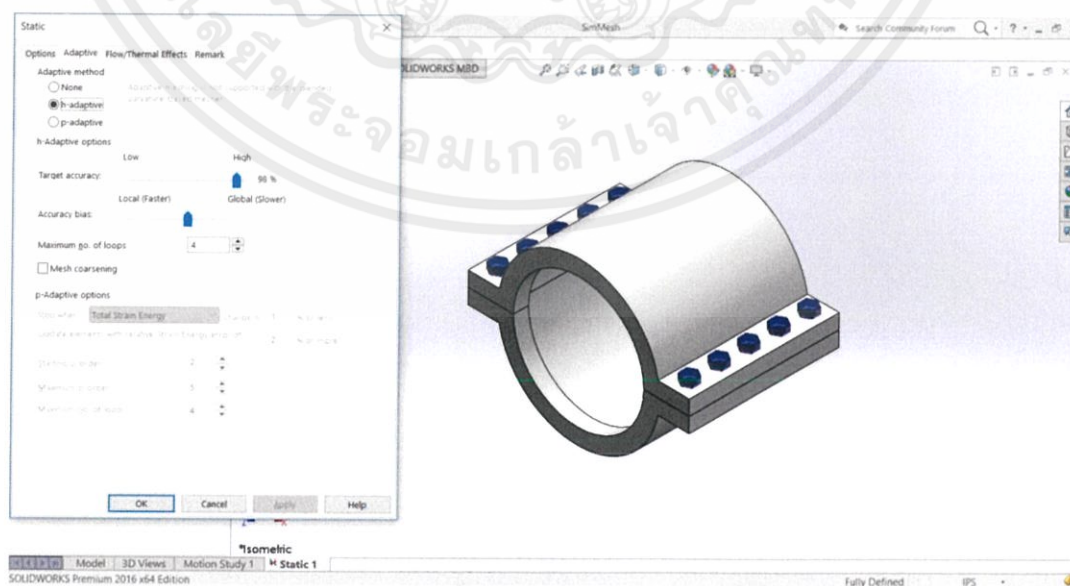
#### 6. การแบ่งเอลิเมนต์ (Meshing)

เลือกใช้วิธี h-adaptive เพื่อให้โปรแกรมปรับขนาดเอลิเมนต์ให้อัตโนมัติ ซึ่งโปรแกรมจะหยุดเมื่อค่าความผิดพลาดของพลังงานความเครียดครั้งก่อนหน้าและครั้งปัจจุบันไม่เกิน 2% ดังรูปที่ 3.11 โปรแกรมจะทำการประมวลผลดังรูปที่ 3.12 และจะได้ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

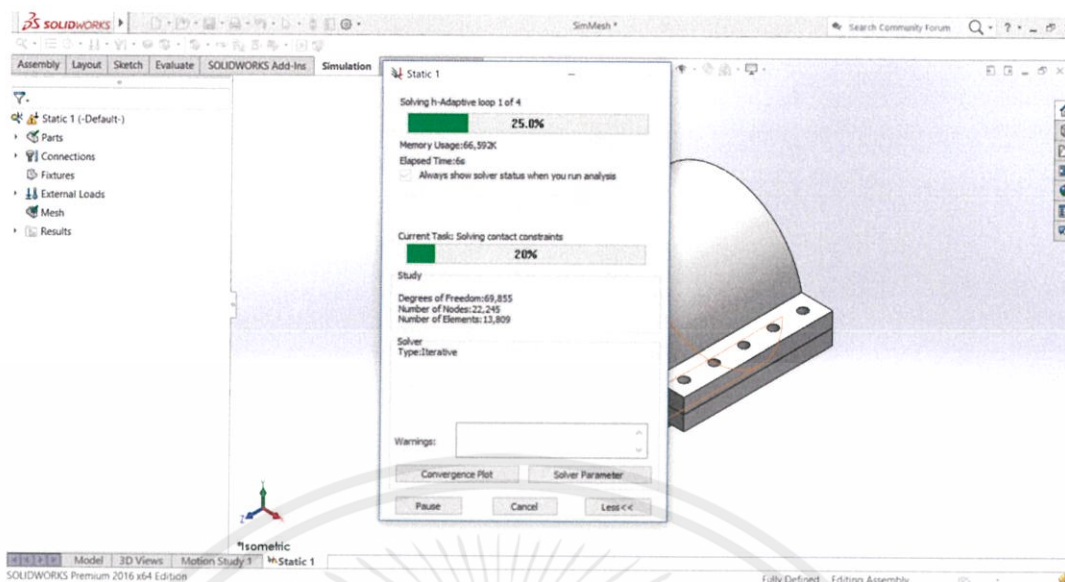
ตารางที่ 3.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างเอลิเมนต์แบบเอช กับเอลิเมนต์แบบพี [22]

|   | วิธี h-adaptive  | วิธี p-adaptive  |
|---|--|--|
| Order ของ<br>เอลิเมนต์                            | ไม่สามารถเปลี่ยนอันดับอนุพันธ์ระหว่าง<br>การประมวลผลได้  | สามารถเปลี่ยนอันดับอนุพันธ์จากยก<br>กำลังสองถึงยกกำลังห้า จนกว่าจะ<br>ได้ค่าที่แม่นยำ                                  |
| การปรับปรุง<br>เอลิเมนต์                          | การปรับปรุงขนาดเอลิเมนต์จะปรับทั้ง<br>ขนาดและตำแหน่งของเอลิเมนต์พร้อม ๆ<br>กัน โดยการปรับจะเน้นบริเวณที่เกิด<br>ความหนาแน่นของความเค้นหลัก | ไม่มีการแบ่งเอลิเมนต์ใหม่ แต่จะ<br>ปรับอันดับอนุพันธ์ให้สูงขึ้นโดย<br>เปลี่ยนสมการที่แสดงความสัมพันธ์<br>ระหว่างจุดต่อ |
| การควบคุมค่า<br>ความคลาด<br>เคลื่อนในระบบ<br>รวม  | ใช้พลังงานความเครียดรวม (Strain<br>Energy) ในพิจารณาค่าความ<br>คลาดเคลื่อน   | ใช้พลังงานความเครียดรวมในการ<br>พิจารณาความคลาดเคลื่อน RMS<br>ระยะเคลื่อนตัว RMS และความ<br>เค้น Von Mises             |
| การควบคุมค่า<br>ความคลาด<br>เคลื่อนในระบบ<br>ย่อย | ใช้พลังงานความเครียดระบบย่อย<br>(local) สามารถปรับได้จากระดับความ<br>แม่นยำ (Target Accuracy)  | ใช้พลังงานความเครียดระบบย่อย   |
| จำนวนรอบ<br>ประมวลผล                              | 6 รอบ โดยตอนเริ่มจะใช้เอลิเมนต์ตามที่<br>โปรแกรมกำหนด ส่วนการประมวลผลอีก<br>5 ครั้งจะมีการปรับปรุงขนาดเอลิเมนต์                            | 4 รอบ โดยตอนเริ่มจะใช้อนุพันธ์<br>อันดับสอง รอบต่อไปจะใช้อันดับ<br>อนุพันธ์ ที่สูงขึ้น                                 |

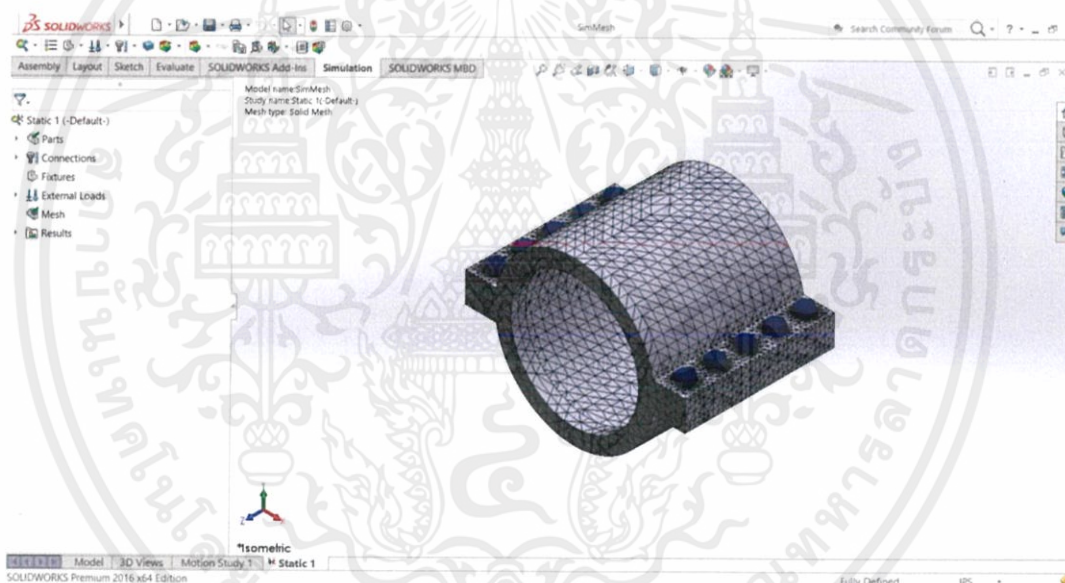


รูปที่ 3.11 การตั้งค่าเอลิเมนต์แบบ h-adaptive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การประมวลผลการแบ่งเอลิเมนต์ของโปรแกรม



รูปที่ 3.13 เอลิเมนต์ที่ได้จากการประมวลผลแบบ h-adaptive

### 3.4 เปรียบเทียบผลระหว่างการคำนวณด้วยโปรแกรมและการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการคำนวณค่าความเค้นจากวิธีการทั้งสองข้างต้นได้ถูกนำมาเปรียบเทียบ เพื่อทำการปรับปรุงโปรแกรมให้มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นนำโปรแกรมที่ถูกปรับปรุงไปใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างตารางการออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยร้าวที่ความดันให้มีขนาดที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

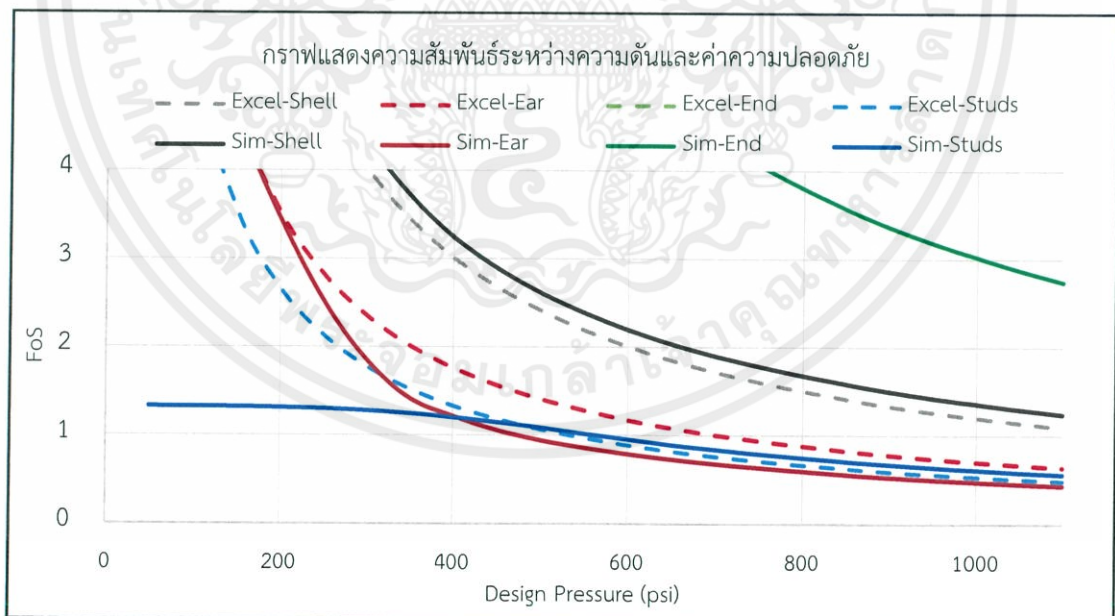
จากการศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ปัดรอยรั่วต่อความดันเนื่องจากความดันของไหล โดยใช้โปรแกรมคำนวณ และระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ คณะผู้จัดทำจึงนำเสนอผลการศึกษาของทั้งสองวิธีรวมถึงการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ดังต่อไปนี้

### 4.1 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรมและการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการนำสมการที่ใช้ในการคำนวณความเค้นและค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนของอุปกรณ์ จากบทที่ 2 ไปสร้างเป็นโปรแกรมคำนวณใน MS Excel ในบทที่ 3 ได้ผลลัพธ์ตั้งเส้นประและการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ผลลัพธ์ตั้งเส้นทึบที่แสดงในกราฟต่อไปนี้

#### 4.1.1 ผลจากหาค่าความปลอดภัยสำหรับ กรณีที่ 1

ประกอบด้วย ผนังท่อ แผ่นยึดด้านข้าง แผ่นปิด และสลักเกลียว แสดงผลในตารางที่ ข-1 และแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัยดังรูปที่ 4.1



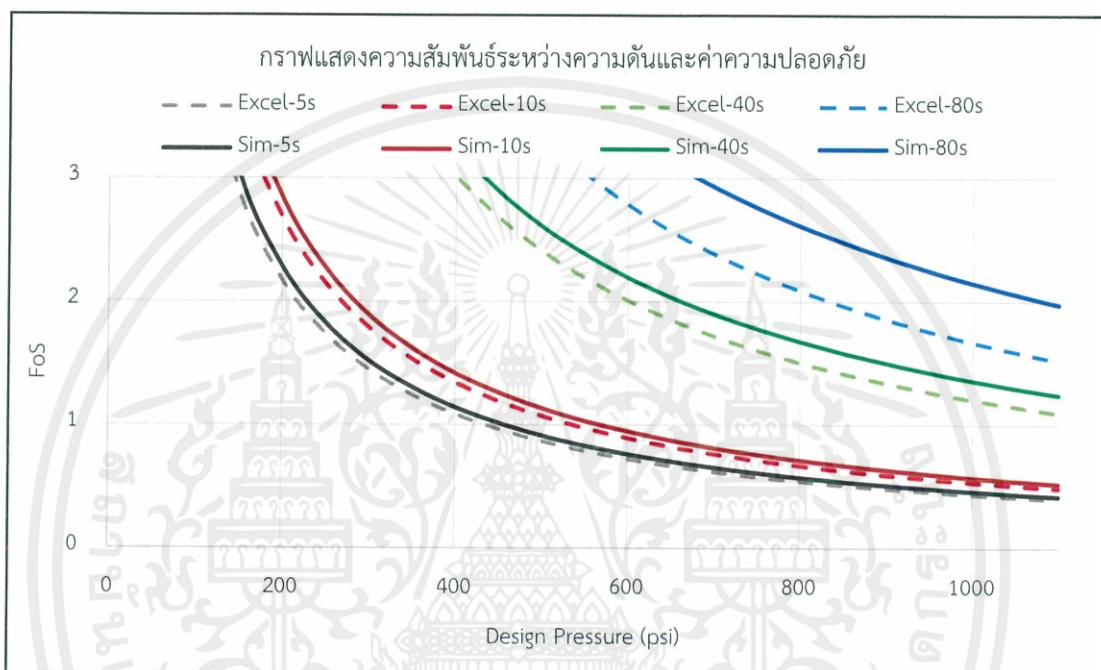
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัย  
ของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วนของอุปกรณ์

จากรูปที่ 4.1 สามารถเรียงลำดับค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนจากน้อยที่สุดไปยังมากที่สุด คือ แผ่นยึดด้านข้างและสลักเกลียว ผนังท่อ และแผ่นปิดตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่าค่าความ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลอดภัยของแผ่นปิดด้านข้างมีค่าสูงกว่าชั้นส่วนอื่นมาก คณะผู้จัดทำจึงไม่นำมาพิจารณาในการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของแผ่นปิดด้านข้าง

#### 4.1.2 ผลจากหาค่าความปลอดภัยสำหรับ กรณีที่ 2

ความหนาของผนังท่อที่แตกต่างกันคือ 5s, 10s, 40s และ 80s เกลียว แสดงผลในตารางที่ ข-2 และแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัยดังรูปที่ 4.2

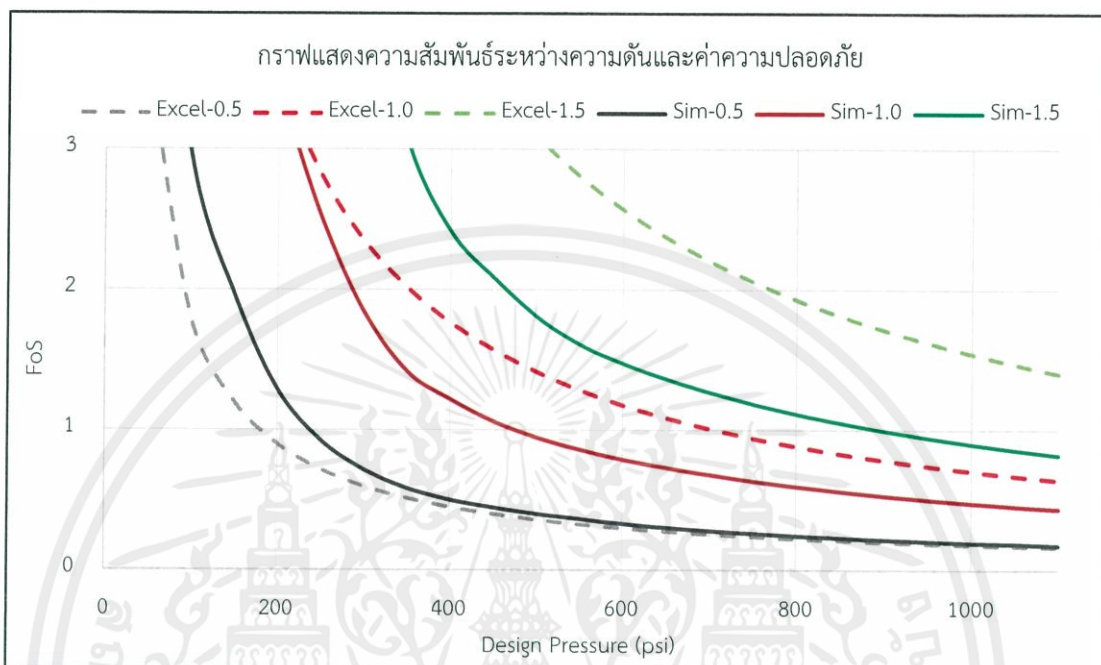


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัยของผนังท่อที่มีความหนา 5s, 10s, 40s และ 80s

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่ความหนาของผนังท่อที่มีความหนาแตกต่างกัน ซึ่งที่ความดันเท่ากันนั้นค่าความปลอดภัยของชั้นผนังท่อก็แตกต่างกันโดยเรียงลำดับจากมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุดคือ 80s 40s 10s และ 5s ตามลำดับ

### 4.1.3 ผลจากหาค่าความปลอดภัยสำหรับ กรณีที่ 3

ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่แตกต่างกันคือ 0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว แสดงผลในตารางที่ ข-3 และแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัยดังรูปที่ 4.3

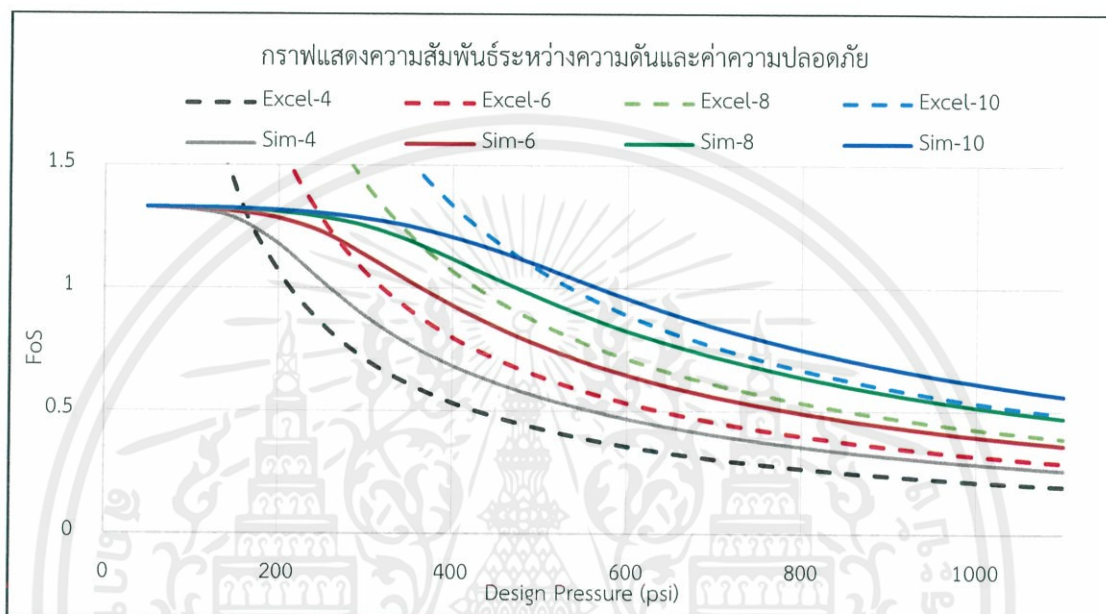


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันและค่าความปลอดภัยของแผ่นยึดด้านข้างที่มีความหนา 0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว

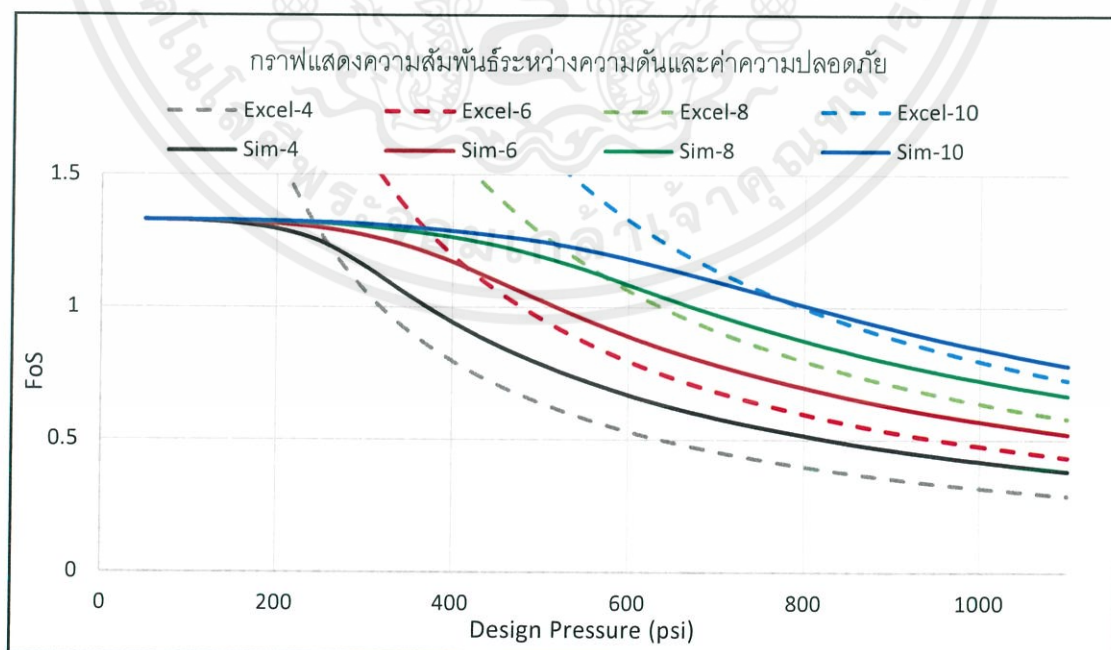
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าที่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความปลอดภัยของแผ่นยึดด้านข้างลดลง และเมื่อสังเกตที่ความดันค่าใดค่าหนึ่งความหนาที่แตกต่างกันพบว่า ความหนามากกว่าจะให้ค่าความปลอดภัยที่มากกว่าเช่นกันซึ่งสามารถเรียงลำดับค่าความปลอดภัยของความหนาของแผ่นยึดด้านข้างจากมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้คือ 0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว ตามลำดับ

#### 4.1.4 ผลจากหาค่าความปลอดภัยสำหรับ กรณีที่ 4

ขนาดสลักเกลียวที่แตกต่างกันคือ 5/8 นิ้ว 3/4 นิ้ว และ 7/8 นิ้ว และแต่ละขนาดที่จำนวนสลักเกลียวที่ต่างกันคือ จำนวน 4 ตัว 6 ตัว 8 ตัว และ 10 ตัว แสดงผลในตารางที่ ข-4, ข-5 และ ข-6 ตามลำดับ และแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัยดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

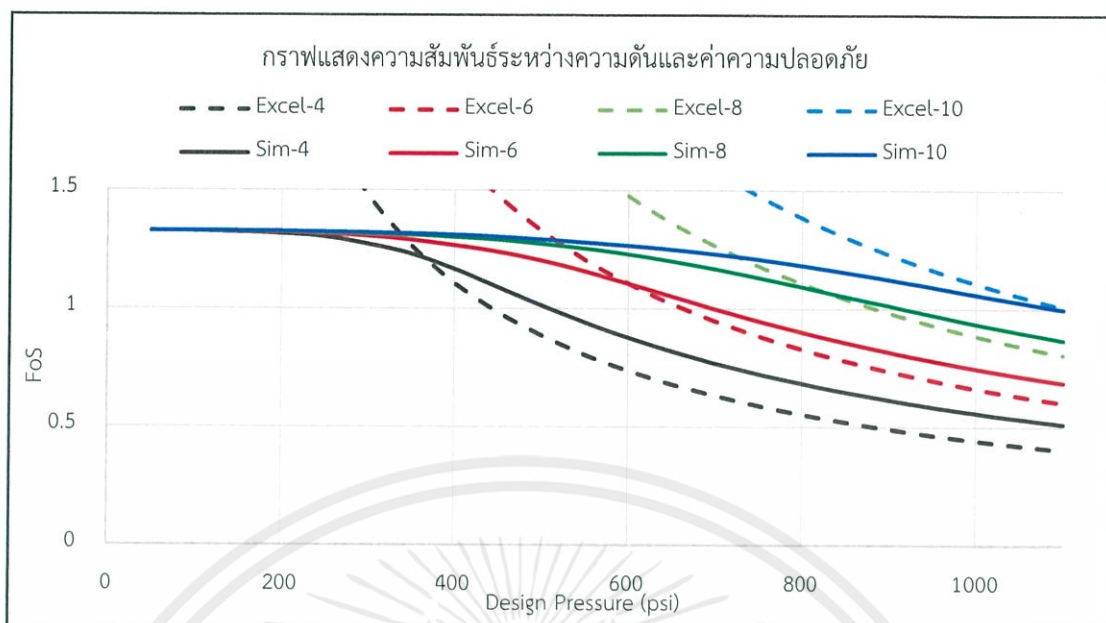


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันและค่าความปลอดภัยของสลักเกลียวขนาด 5/8 นิ้วที่มีจำนวน 4 6 8 และ 10 ตัว



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันและค่าความปลอดภัย

ของสลักเกลียวขนาด 3/4 นิ้วที่มีจำนวน 4 6 8 และ 10 ตัว

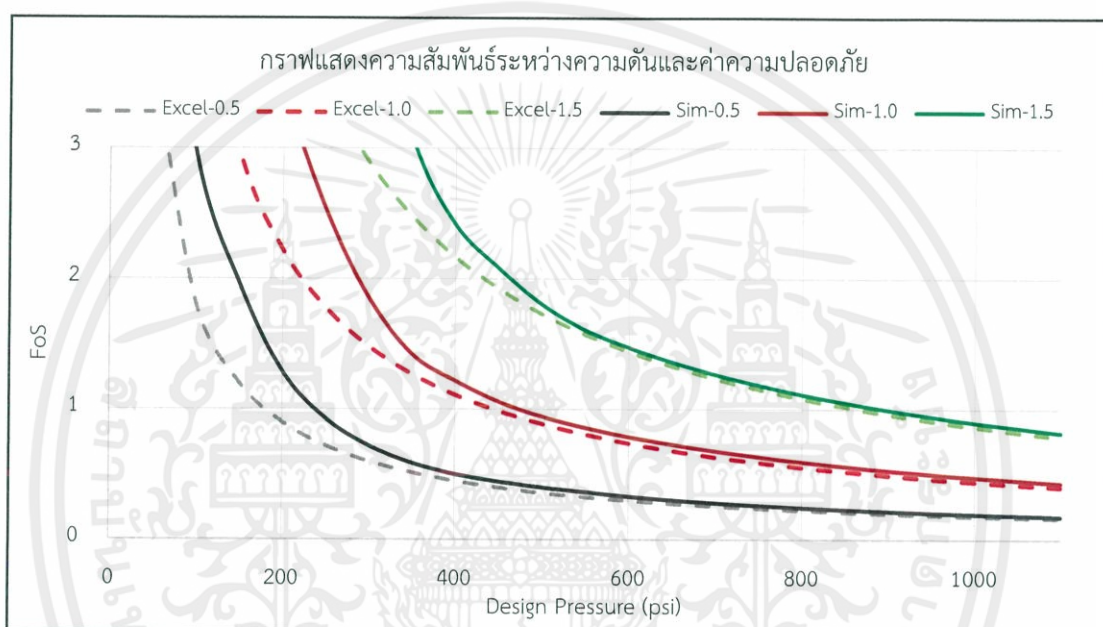


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของควมดันและค่าความปลอดภัยของสลักเกลียวขนาด 7/8 นิ้ว ที่มีจำนวน 4 6 8 และ 10 ตัว

จากรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ค่าความปลอดภัยของสลักเกลียวจะลดลง และเมื่อสังเกตที่ความดันค่าใดค่าหนึ่งจะเห็นว่าขนาดและจำนวนสลักเกลียวสูงขึ้น ค่าความปลอดภัยจะมากขึ้นโดยสามารถเรียงลำดับค่าความปลอดภัยของขนาดสลักเกลียวจากมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดได้คือ 7/8 นิ้ว 3/4 นิ้ว และ 5/8 นิ้ว และจำนวนสลักเกลียว 10 ตัว 8 ตัว 6 ตัว และ 4 ตัวตามลำดับ

## 4.2 ผลจากการปรับปรุงโปรแกรมการคำนวณ

จากผลการหาค่าความปลอดภัยสำหรับ กรณีที่ 3 ด้วยโปรแกรมคำนวณและระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีความแตกต่างกันดังนั้นจึงทำการปรับปรุงโปรแกรมเพื่อให้มีค่าใกล้เคียงกันโดยการทำการศึกษาที่ความยาวความหนาแผ่นยึดด้านข้างหลาย ๆ ความยาว สำหรับความหนา 0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว ทำให้ได้ตัวคูณปรับแก้ 1.59 และ 1.78 สำหรับความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งแสดงผลในตารางที่ ข-7 และแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัยดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันและค่าความปลอดภัยของแผ่นยึดด้านข้างที่มีความหนา 0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว หลังจากปรับปรุงโปรแกรม

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงาน

จากการวิเคราะห์ความเค้นของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันโดยโปรแกรมคำนวณที่สร้างจาก MS Excel 2016 และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก SolidWorks Simulation 2016 พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และยังมีลำดับการเสียหายของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเหมือนกัน คือ สลักเกลียวและแผ่นยึดด้านข้างซึ่งเกิดความเค้นสูงมากและมีแนวโน้มที่จะเสียหายเป็นอันดับแรก รองลงมาคือผนังท่อ และส่วนที่มีแนวโน้มที่จะเสียหายน้อยสุดคือ แผ่นปิด โดยที่ความหนาขนาด 1 นิ้ว เพียงพอต่อการออกแบบที่ความดันไม่เกิน 1100 psi และ อุณหภูมิไม่เกิน 1100 องศาฟาเรนไฮต์ ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงไม่นำมาพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์

ถึงแม้ว่าวิธีการทั้งสองจะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่ความเค้นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสูงกว่า อันเนื่องมาจากอุปกรณ์มีลักษณะเฉพาะทำให้มีแรงภายนอกจากชิ้นส่วนอื่นเข้ามากระทำนอกเหนือจากสมการที่ใช้ในการคำนวณ จึงได้ปรับปรุงโปรแกรมคำนวณเพื่อให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยมีตัวคูณปรับแก้สำหรับแผ่นยึดด้านข้าง 1.59 และ 1.78 สำหรับความหนา 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถใช้โปรแกรมคำนวณความเค้นที่สร้างขึ้นหาขนาดของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันที่เหมาะสมและมีความปลอดภัยต่อการใช้งาน อีกทั้งนำผลการคำนวณจากโปรแกรมมาสร้างตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิที่ขนาดท่อต่าง ๆ เพื่อสะดวกในการเลือกใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 ความหนาของผนังท่อที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 2

| NPS 2    |      | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|----------|------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|          |      | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure | 50   | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 40s  | 80s  |      |
|          | 100  | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 40s | 80s  |      |      |
|          | 150  | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 40s | 40s  |      |      |
|          | 200  | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 10s | 40s | 40s | 80s |      |      |      |
|          | 250  | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 10s | 10s | 10s | 40s | 40s | 80s |      |      |      |
|          | 300  | 10s         | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |      |      |      |
|          | 350  | 10s         | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |     |      |      |      |
|          | 400  | 10s         | 10s | 10s | 10s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |     |      |      |      |
|          | 450  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s |     |     |      |      |      |
|          | 500  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |     |      |      |      |
|          | 550  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |     |     |      |      |      |
|          | 600  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s |     |     |     |      |      |      |
|          | 650  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 700  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 750  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 800  | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 850  | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 900  | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 950  | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 1000 | 80s         | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050     | 80s  | 80s         | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100     |      |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

ตารางที่ ก-2 ความหนาของผนังท่อที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 4

| NPS 4    |      | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|----------|------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|          |      | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure | 50   | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 40s  | 80s  |      |
|          | 100  | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 40s | 40s | 80s  |      |      |
|          | 150  | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 40s | 40s | 80s |      |      |      |
|          | 200  | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 40s | 40s | 80s | 80s |      |      |      |
|          | 250  | 10s         | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 40s | 40s | 80s |     |     |      |      |      |
|          | 300  | 10s         | 10s | 10s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |     |     |      |      |      |
|          | 350  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s |     |     |      |      |      |
|          | 400  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s |     |     |     |      |      |      |
|          | 450  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s |     |     |     |      |      |      |
|          | 500  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s |     |     |     |      |      |      |
|          | 550  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 600  | 40s         | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 650  | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 700  | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 750  | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 800  | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 850  | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 900  | 80s         | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 950  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 1000 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050     |      |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100     |      |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

ตารางที่ ก-3 ความหนาของผนังท่อที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 6

| NPS 6    |     | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|----------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|          |     | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure | 50  | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 40s  | 80s  |      |
|          | 100 | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 40s | 40s  | 80s  |      |
|          | 150 | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 40s | 40s | 40s | 80s  |      |      |
|          | 200 | 10s         | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 40s | 40s | 40s | 80s |      |      |      |
|          | 250 | 10s         | 10s | 10s | 10s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |      |      |      |
|          | 300 | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |      |      |      |
|          | 350 | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s |     |      |      |      |
|          | 400 | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s |     |     |      |      |      |
|          | 450 | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |      |      |      |
|          | 500 | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |      |      |      |
|          | 550 | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |      |      |      |
|          | 600 | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 650 | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 700 | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 750 | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 800 | 80s         | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 850 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

ตารางที่ ก-4 ความหนาของผนังท่อที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 8

| NPS 8    |     | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|----------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|          |     | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure | 50  | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 40s | 40s  | 80s  |      |
|          | 100 | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 40s | 40s | 80s  |      |      |
|          | 150 | 5s          | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 5s  | 10s | 40s | 40s | 80s |     |      |      |      |
|          | 200 | 10s         | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 10s | 40s | 40s | 40s | 40s |     |      |      |      |
|          | 250 | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |      |      |      |
|          | 300 | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |      |      |      |
|          | 350 | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s |     |     |      |      |      |
|          | 400 | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s |     |     |     |      |      |      |
|          | 450 | 40s         | 40s | 40s | 40s | 40s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 500 | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 550 | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 600 | 80s         | 80s | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 650 | 80s         | 80s | 80s | 80s |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 700 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 750 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 800 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 850 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 2 และยาว 6 นิ้ว

| NPS 2    |      | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|----------|------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Length 6 |      | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure | 50   | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5  | 0.5  | 0.5  |
|          | 100  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 150  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 200  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 250  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 300  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 350  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 400  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 450  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|          | 500  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|          | 550  | 1.0         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|          | 600  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 650  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 700  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 750  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 800  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 850  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 900  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 950  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 1000 | 1.5         | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050     | 1.5  | 1.5         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100     | 1.5  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

ตารางที่ ก-6 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 2 และยาว 8 นิ้ว

| NPS 2    |      | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|----------|------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Length 8 |      | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure | 50   | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5  | 0.5  | 0.5  |
|          | 100  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 150  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 200  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.5  |
|          | 250  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 300  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 350  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 400  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|          | 450  | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|          | 500  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 550  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 600  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 650  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 700  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 750  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 800  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 850  | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 900  | 1.5         | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 950  | 1.5         | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 1000 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050     |      |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100     |      |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-7 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 2 และยาว 10 นิ้ว

| NPS 2     |     | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|-----------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Length 10 |     | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure  | 50  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5  | 0.5  | 0.5  |
|           | 100 | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|           | 150 | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|           | 200 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|           | 250 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|           | 300 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|           | 350 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|           | 400 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|           | 450 | 1.0         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|           | 500 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|           | 550 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|           | 600 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|           | 650 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|           | 700 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|           | 750 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|           | 800 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|           | 850 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
| 900       |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950       |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

ตารางที่ ก-8 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 4 และยาว 6 นิ้ว

| NPS 4    |     | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|----------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Length 6 |     | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure | 50  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5  | 0.5  | 0.5  |
|          | 100 | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 150 | 0.5         | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 200 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 250 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 300 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 350 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 400 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 450 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 500 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 550 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 600 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 650 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 700 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 750 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 800 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 850 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-9 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 4 และยาว 8 นิ้ว

| NPS 4    |     | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|----------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Length 8 |     | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure | 50  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5  | 0.5  | 0.5  |
|          | 100 | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 150 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 200 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 250 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 300 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 350 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|          | 400 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|          | 450 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 500 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 550 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 600 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 650 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 700 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 750 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 800 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 850 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

ตารางที่ ก-10 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 4 และยาว 10 นิ้ว

| NPS 4     |     | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|-----------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Length 10 |     | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure  | 50  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5  | 0.5  | 0.5  |
|           | 100 | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|           | 150 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|           | 200 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|           | 250 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|           | 300 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|           | 350 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|           | 400 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|           | 450 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|           | 500 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|           | 550 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|           | 600 | 1.5         | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|           | 650 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|           | 700 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|           | 750 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|           | 800 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|           | 850 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900       |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950       |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-11 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 6 และยาว 6 นิ้ว

| NPS 6    |     | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|----------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Length 6 |     | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure | 50  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 100 | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 150 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 200 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 250 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |      |      |      |
|          | 300 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 350 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 400 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 450 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 500 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 550 | 1.5         | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 600 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 650 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 700 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 750 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 800 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 850      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

ตารางที่ ก-12 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 6 และยาว 8 นิ้ว

| NPS 6    |     | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|----------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Length 8 |     | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Pressure | 50  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 100 | 0.5         | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
|          | 150 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
|          | 200 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|          | 250 | 1.0         | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
|          | 300 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 350 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 400 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 450 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 500 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 550 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 600 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 650 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 700 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 750 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|          | 800 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 850      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-13 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 6 และยาว 10 นิ้ว

| NPS 6     |     | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|-----------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|--|
| Length 10 |     | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |  |
| Pressure  | 50  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |  |
|           | 100 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |  |
|           | 150 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |  |
|           | 200 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 250 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 300 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 350 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 400 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 450 | 1.5         | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 500 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 550 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 600 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 650 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 700 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 750 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 800 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|           | 850 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 900       |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 950       |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 1000      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 1050      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 1100      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |

ตารางที่ ก-14 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 8 และยาว 6 นิ้ว

| NPS 8    |     | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|----------|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|--|
| Length 6 |     | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |  |
| Pressure | 50  | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |  |
|          | 100 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |  |
|          | 150 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |  |
|          | 200 | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 250 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 300 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 350 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 400 | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 450 | 1.5         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 500 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 550 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 600 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 650 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 700 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 750 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 800 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
|          | 850 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 900      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 950      |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 1000     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 1050     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |
| 1100     |     |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-15 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 8 และยาว 8 นิ้ว

| NPS 8<br>Length 8 | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|-------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|                   | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| 50                | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
| 100               | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
| 150               | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
| 200               | 1.0         | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
| 250               | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
| 300               | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 350               | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 400               | 1.5         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 450               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 500               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 550               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 600               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 650               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 700               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 750               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 800               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 850               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000              |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050              |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100              |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

ตารางที่ ก-16 ความหนาของแผ่นยึดด้านข้างที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 8 และยาว 10 นิ้ว

| NPS 8<br>Length 10 | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|--------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|                    | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| 50                 | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
| 100                | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
| 150                | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |      |      |      |
| 200                | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |      |      |      |
| 250                | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 300                | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 350                | 1.5         | 1.5 | 1.5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 400                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 450                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 500                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 550                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 600                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 650                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 700                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 750                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 800                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 850                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950                |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100               |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-16 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 2 และยาว 6 นิ้ว

| NPS 2<br>Length 6 | Temperature     |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                   | 100             | 200             | 300             | 400             | 500             | 600             | 650             | 700             | 750             | 800             | 850             | 900             | 950             | 1000            | 1050            | 1100            |
|                   | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 |
| 50                | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 100               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 150               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 200               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 250               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 300               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 350               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 400               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 450               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 500               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 550               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 600               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 650               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 700               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 750               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |
| 800               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |
| 850               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |
| 900               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |
| 950               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |
| 1000              | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |
| 1050              | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |
| 1100              | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |



ตารางที่ ก-17 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 2 และยาว 8 นิ้ว

| NPS 2<br>Length 8 | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |     |     |     |     |     |    |
|-------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|
|                   | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |     |     |     |     |     |    |
|                   | 5/8         | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4  | 7/8  | 5/8  | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 |    |
| 50                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 100               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 150               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 200               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 250               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 300               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 350               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 400               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 450               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 500               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 550               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 600               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 650               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 700               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 750               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 800               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 850               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 900               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 950               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 1000              | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 1050              | 10          | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6    | 4    | 10   | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10 |
| 1100              | 10          | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6    | 4    | 10   | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10 |





ตารางที่ ก-19 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความถี่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 4 และยาว 6 นิ้ว

| NPS 4<br>Length 6 | Temperature     |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                   | 100             | 200             | 300             | 400             | 500             | 600             | 650             | 700             | 750             | 800             | 850             | 900             | 950             | 1000            | 1050            | 1100            |
| 50                | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 |
| 100               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 150               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 200               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 250               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 300               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 350               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 400               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 450               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 500               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 550               | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       |
| 600               | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       |
| 650               | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       |
| 700               | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       |
| 750               | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       |
| 800               | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 850               | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 900               | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 950               | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 1000              | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 1050              | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 1100              | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      | 10   6   4      |



ตารางที่ ก-20 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 4 และยาว 8 นิ้ว

| NPS 4<br>Length 8 | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |     |     |     |     |     |    |
|-------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|
|                   | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |     |     |     |     |     |    |
|                   | 5/8         | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4  | 7/8  | 5/8  | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 |    |
| 50                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 100               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 150               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 200               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 250               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 300               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 350               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 400               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 450               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 500               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 550               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 600               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 650               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 700               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 750               | 10          | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6    | 6    | 10   | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10 |
| 800               | 10          | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8    | 6    | 10   | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10 |
| 850               | 10          | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8    | 6    | 10   | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10 |
| 900               | 8           | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6    | 6    | 8    | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8  |
| 950               | 8           | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6    | 6    | 8    | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8  |
| 1000              | 8           | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6    | 6    | 8    | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8  |
| 1050              | 8           | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8   | 6    | 6    | 8    | 6   | 6   | 8   | 6   | 6   | 8  |
| 1100              | 10          | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6    | 6    | 10   | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-21 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความถี่ต่างกันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 4 และยาว 10 นิ้ว

| NPS 4<br>Length 10 | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |     |     |     |     |     |
|--------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                    | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |     |     |     |     |     |
|                    | 5/8         | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4  | 7/8  | 5/8  | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 |
| 50                 | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 100                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 150                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 200                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 250                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 300                | 6           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 350                | 6           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 400                | 8           | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 450                | 8           | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 500                | 8           | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 550                | 10          | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 600                | 10          | 8   | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 650                | 10          | 8   | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 700                | 8           | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 750                | 8           | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 800                | 10          | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 850                | 10          | 8   | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 900                | 10          | 8   | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 950                | 10          | 8   | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 1000               | 8           | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 1050               | 8           | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |
| 1100               | 8           | 6   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |



ตารางที่ ก-22 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความถี่ต่างกันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 6 และยาว 6 นิ้ว

| NPS 6<br>Length 6 | Temperature     |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |  |  |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|--|
|                   | 100             | 200             | 300             | 400             | 500             | 600             | 650             | 700             | 750             | 800             | 850             | 900             | 950             | 1000            | 1050            | 1100            |  |  |
|                   | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 |  |  |
| 50                | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |  |  |
| 100               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |  |  |
| 150               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |  |  |
| 200               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |  |  |
| 250               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |  |  |
| 300               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |  |  |
| 350               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |  |  |
| 400               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               |  |  |
| 450               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |  |  |
| 500               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |  |  |
| 550               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |  |  |
| 600               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               | 4               | 4               | 6               |  |  |
| 650               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               |  |  |
| 700               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               |  |  |
| 750               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               |  |  |
| 800               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               | 6               | 4               | 8               |  |  |
| 850               | 10              | 6               | 6               | 10              | 6               | 6               | 10              | 6               | 6               | 10              | 6               | 6               | 10              | 6               | 6               | 10              |  |  |
| 900               | 10              | 6               | 6               | 10              | 6               | 6               | 10              | 6               | 6               | 10              | 6               | 6               | 10              | 6               | 6               | 10              |  |  |
| 950               | 10              | 8               | 6               | 10              | 8               | 6               | 10              | 8               | 6               | 10              | 8               | 6               | 10              | 8               | 6               | 10              |  |  |
| 1000              | 10              | 8               | 6               | 10              | 8               | 6               | 10              | 8               | 6               | 10              | 8               | 6               | 10              | 8               | 6               | 10              |  |  |
| 1050              | 8               | 6               | 8               | 8               | 6               | 8               | 8               | 6               | 8               | 8               | 6               | 8               | 8               | 6               | 8               | 8               |  |  |
| 1100              | 8               | 6               | 8               | 8               | 6               | 8               | 8               | 6               | 8               | 8               | 6               | 8               | 8               | 6               | 8               | 8               |  |  |



ตารางที่ ก-23 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 6 และยาว 8 นิ้ว

| NPS 6<br>Length 8 | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |     |     |     |     |     |    |
|-------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|
|                   | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |     |     |     |     |     |    |
|                   | 5/8         | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4  | 7/8  | 5/8  | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 |    |
| 50                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 100               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 150               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 200               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 250               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  |
| 300               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 350               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 400               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6  |
| 450               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 500               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8  |
| 550               | 10          | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6    | 4    | 10   | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10 |
| 600               | 10          | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6    | 6    | 10   | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10 |
| 650               | 10          | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8    | 6    | 10   | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10 |
| 700               | 8           | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6    | 8    | 8    | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8  |
| 750               | 8           | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6    | 8    | 8    | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8  |
| 800               | 8           | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6    | 8    | 8    | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8  |
| 850               | 10          | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8    | 10   | 8    | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8  |
| 900               | 10          | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8    | 10   | 8    | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8  |
| 950               | 10          | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8    | 10   | 8    | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8  |
| 1000              | 10          | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8    | 10   | 8    | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8  |
| 1050              | 8           | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8    | 8    | 8    | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8  |
| 1100              | 8           | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8    | 8    | 8    | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8  |



ตารางที่ ก-24 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 6 และยาว 10 นิ้ว

| NPS 6<br>Length 10 | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |     |     |
|--------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|
|                    | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |     |     |
|                    | 5/8         | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4  | 7/8  | 5/8  | 3/4 | 7/8 |
| 50                 | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   |
| 100                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   |
| 150                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   |
| 200                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   |
| 250                | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   |
| 300                | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   |
| 350                | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   |
| 400                | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   |
| 450                | 10          | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6   | 6   | 10  | 6    | 6    | 10   | 6   | 6   |
| 500                | 10          | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8    | 6    | 10   | 8   | 6   |
| 550                | 8           | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6    | 8    | 8    | 6   | 8   |
| 600                | 8           | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6   | 8   | 8   | 6    | 8    | 8    | 6   | 8   |
| 650                | 10          | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8    | 10   | 8    | 10  | 8   |
| 700                | 10          | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8    | 10   | 8    | 10  | 8   |
| 750                | 10          | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8    | 10   | 8    | 10  | 8   |
| 800                | 8           | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8    | 8    | 8    | 8   | 8   |
| 850                | 10          | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  |
| 900                | 10          | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  |
| 950                | 10          | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  |
| 1000               | 10          | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  |
| 1050               | 10          | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  |
| 1100               | 10          | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-25 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 8 และยาว 6 นิ้ว

| NPS 8<br>Length 6 | Temperature     |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                   | 100             | 200             | 300             | 400             | 500             | 600             | 650             | 700             | 750             | 800             | 850             | 900             | 950             | 1000            | 1050            | 1100            |
| 50                | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 |
| 100               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 150               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 200               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 250               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 300               | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 350               | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       |
| 400               | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 450               | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       |
| 500               | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 550               | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 600               | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 650               | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 700               | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      |
| 750               | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      |
| 800               | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      |
| 850               | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       |
| 900               | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       |
| 950               | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       |
| 1000              | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      |
| 1050              | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      |
| 1100              | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      |



ตารางที่ ก-26 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 8 และยาว 8 นิ้ว

| NPS 8<br>Length 8 | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |     |     |
|-------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|
|                   | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |     |     |
|                   | 5/8         | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4 | 7/8 | 5/8 | 3/4  | 7/8  | 5/8  | 3/4 | 7/8 |
| 50                | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   |
| 100               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   |
| 150               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   |
| 200               | 4           | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4    | 4   | 4   |
| 250               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   |
| 300               | 6           | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4   | 4   | 6   | 4    | 4    | 6    | 4   | 4   |
| 350               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   |
| 400               | 8           | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6   | 4   | 8   | 6    | 4    | 8    | 6   | 4   |
| 450               | 10          | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6   | 4   | 10  | 6    | 4    | 10   | 6   | 4   |
| 500               | 10          | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8   | 6   | 10  | 8    | 6    | 10   | 8   | 6   |
| 550               | 8           | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6    | 8    | 6    | 8   | 6   |
| 600               | 8           | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6    | 8    | 6    | 8   | 6   |
| 650               | 8           | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6   | 8   | 6    | 8    | 6    | 8   | 6   |
| 700               | 10          | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8    | 10   | 8    | 10  | 8   |
| 750               | 10          | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8    | 10   | 8    | 10  | 8   |
| 800               | 10          | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8   | 10  | 8    | 10   | 8    | 10  | 8   |
| 850               | 8           | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8    | 8    | 8    | 8   | 8   |
| 900               | 8           | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8   | 8    | 8    | 8    | 8   | 8   |
| 950               | 10          | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  |
| 1000              | 10          | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  |
| 1050              | 10          | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  |
| 1100              | 10          | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  |



ตารางที่ ก-27 ขนาดและจำนวนสลักเกลียวที่ความดันและอุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับท่อรั้ว NPS 8 และยาว 10 นิ้ว

| NPS 8<br>Length 10 | Temperature     |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                    | 100             | 200             | 300             | 400             | 500             | 600             | 650             | 700             | 750             | 800             | 850             | 900             | 950             | 1000            | 1050            | 1100            |
| 50                 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 | 5/8   3/4   7/8 |
| 100                | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 150                | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       | 4   4   4       |
| 200                | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       | 6   4   4       |
| 250                | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 300                | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       | 8   6   4       |
| 350                | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      |
| 400                | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      | 10   8   6      |
| 450                | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       | 8   6   6       |
| 500                | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      | 10   6   6      |
| 550                | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     |
| 600                | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     | 10   8   10     |
| 650                | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       | 8   8   8       |
| 700                | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    |
| 750                | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    |
| 800                | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    |
| 850                | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    |
| 900                | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    | 10   10   10    |
| 950                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 1000               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 1050               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 1100               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าความปลอดภัยสำหรับกรณีที่ 1 ค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วน  
ของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วที่ค่าความดันแตกต่างกัน

| ความดัน<br>(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) | ค่าความปลอดภัย |       |        |       |                               |      |       |       |
|--------------------------------|----------------|-------|--------|-------|-------------------------------|------|-------|-------|
|                                | โปรแกรมคำนวณ   |       |        |       | ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ |      |       |       |
|                                | Shell          | Ear   | End    | Studs | Shell                         | Ear  | End   | Studs |
| 50                             | 24.11          | 14.13 | 142.11 | 10.68 | 30.54                         | 7.16 | 30.87 | 1.33  |
| 100                            | 12.06          | 7.07  | 71.06  | 5.34  | 13.74                         | 5.84 | 26.25 | 1.33  |
| 150                            | 8.04           | 4.71  | 47.37  | 3.56  | 8.91                          | 4.58 | 21.23 | 1.32  |
| 200                            | 6.03           | 3.53  | 35.53  | 2.67  | 6.59                          | 3.46 | 15.96 | 1.32  |
| 250                            | 4.82           | 2.83  | 28.42  | 2.14  | 5.23                          | 2.53 | 12.77 | 1.30  |
| 300                            | 4.02           | 2.36  | 23.69  | 1.78  | 4.34                          | 1.85 | 10.56 | 1.28  |
| 350                            | 3.44           | 2.02  | 20.30  | 1.53  | 3.71                          | 1.42 | 9.02  | 1.25  |
| 400                            | 3.01           | 1.77  | 17.76  | 1.33  | 3.25                          | 1.22 | 7.83  | 1.21  |
| 450                            | 2.68           | 1.57  | 15.79  | 1.19  | 2.89                          | 1.06 | 6.92  | 1.15  |
| 500                            | 2.41           | 1.41  | 14.21  | 1.07  | 2.61                          | 0.95 | 6.20  | 1.09  |
| 550                            | 2.19           | 1.28  | 12.92  | 0.97  | 2.38                          | 0.86 | 5.61  | 1.02  |
| 600                            | 2.01           | 1.18  | 11.84  | 0.89  | 2.20                          | 0.79 | 5.12  | 0.96  |
| 650                            | 1.85           | 1.09  | 10.93  | 0.82  | 2.04                          | 0.73 | 4.71  | 0.90  |
| 700                            | 1.72           | 1.01  | 10.15  | 0.76  | 1.90                          | 0.68 | 4.36  | 0.84  |
| 750                            | 1.61           | 0.94  | 9.47   | 0.71  | 1.78                          | 0.64 | 4.06  | 0.79  |
| 800                            | 1.51           | 0.88  | 8.88   | 0.67  | 1.68                          | 0.60 | 3.80  | 0.75  |
| 850                            | 1.42           | 0.83  | 8.36   | 0.63  | 1.59                          | 0.56 | 3.57  | 0.71  |
| 900                            | 1.34           | 0.79  | 7.90   | 0.59  | 1.50                          | 0.53 | 3.37  | 0.68  |
| 950                            | 1.27           | 0.74  | 7.48   | 0.56  | 1.43                          | 0.50 | 3.19  | 0.64  |
| 1000                           | 1.21           | 0.71  | 7.11   | 0.53  | 1.36                          | 0.48 | 3.02  | 0.61  |
| 1050                           | 1.15           | 0.67  | 6.77   | 0.51  | 1.30                          | 0.46 | 2.88  | 0.59  |
| 1100                           | 1.10           | 0.64  | 6.46   | 0.49  | 1.24                          | 0.44 | 2.74  | 0.56  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าความปลอดภัยสำหรับกรณีที่ 2 ค่าความปลอดภัยของผนังท่อที่ความหนา 5s, 10s, 40s และ 80s เมื่อได้รับความดันแตกต่างกัน

| ความดัน<br>(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) | ค่าความปลอดภัย       |       |       |       |                               |       |       |       |
|--------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|-------|
|                                | โปรแกรมคำนวณ         |       |       |       | ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ |       |       |       |
|                                | ความหนาของท่อ (นิ้ว) |       |       |       | ความหนาของท่อ (นิ้ว)          |       |       |       |
|                                | 5s                   | 10s   | 40s   | 80s   | 5s                            | 10s   | 40s   | 80s   |
| 50                             | 8.70                 | 10.74 | 24.11 | 33.38 | 9.40                          | 11.82 | 30.54 | 47.55 |
| 100                            | 4.35                 | 5.37  | 12.06 | 16.69 | 4.61                          | 5.76  | 13.74 | 20.47 |
| 150                            | 2.90                 | 3.58  | 8.04  | 11.13 | 3.06                          | 3.81  | 8.91  | 13.15 |
| 200                            | 2.17                 | 2.68  | 6.03  | 8.34  | 2.29                          | 2.85  | 6.59  | 9.69  |
| 250                            | 1.74                 | 2.15  | 4.82  | 6.68  | 1.83                          | 2.27  | 5.23  | 7.70  |
| 300                            | 1.45                 | 1.79  | 4.02  | 5.56  | 1.52                          | 1.89  | 4.34  | 6.39  |
| 350                            | 1.24                 | 1.53  | 3.44  | 4.77  | 1.31                          | 1.62  | 3.71  | 5.49  |
| 400                            | 1.09                 | 1.34  | 3.01  | 4.17  | 1.14                          | 1.42  | 3.25  | 4.82  |
| 450                            | 0.97                 | 1.19  | 2.68  | 3.71  | 1.02                          | 1.26  | 2.89  | 4.32  |
| 500                            | 0.87                 | 1.07  | 2.41  | 3.34  | 0.92                          | 1.14  | 2.61  | 3.93  |
| 550                            | 0.79                 | 0.98  | 2.19  | 3.03  | 0.83                          | 1.04  | 2.38  | 3.61  |
| 600                            | 0.72                 | 0.89  | 2.01  | 2.78  | 0.76                          | 0.95  | 2.20  | 3.35  |
| 650                            | 0.67                 | 0.83  | 1.85  | 2.57  | 0.71                          | 0.88  | 2.04  | 3.12  |
| 700                            | 0.62                 | 0.77  | 1.72  | 2.38  | 0.66                          | 0.82  | 1.90  | 2.93  |
| 750                            | 0.58                 | 0.72  | 1.61  | 2.23  | 0.61                          | 0.76  | 1.78  | 2.76  |
| 800                            | 0.54                 | 0.67  | 1.51  | 2.09  | 0.58                          | 0.72  | 1.68  | 2.61  |
| 850                            | 0.51                 | 0.63  | 1.42  | 1.96  | 0.54                          | 0.67  | 1.59  | 2.48  |
| 900                            | 0.48                 | 0.60  | 1.34  | 1.85  | 0.51                          | 0.64  | 1.50  | 2.36  |
| 950                            | 0.46                 | 0.57  | 1.27  | 1.76  | 0.49                          | 0.60  | 1.43  | 2.25  |
| 1000                           | 0.43                 | 0.54  | 1.21  | 1.67  | 0.46                          | 0.57  | 1.36  | 2.15  |
| 1050                           | 0.41                 | 0.51  | 1.15  | 1.59  | 0.44                          | 0.55  | 1.30  | 2.06  |
| 1100                           | 0.40                 | 0.49  | 1.10  | 1.52  | 0.42                          | 0.52  | 1.24  | 1.97  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความปลอดภัยสำหรับกรณีที่ 3 ค่าความปลอดภัยของแผ่นยึดด้านข้างที่ความหนา 0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้วเมื่อได้รับความดันแตกต่างกัน

| ความดัน<br>(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) | ค่าความปลอดภัย                   |       |       |                                  |      |       |
|--------------------------------|----------------------------------|-------|-------|----------------------------------|------|-------|
|                                | โปรแกรมคำนวณ                     |       |       | ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์    |      |       |
|                                | ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง (นิ้ว) |       |       | ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง (นิ้ว) |      |       |
|                                | 0.5                              | 1.0   | 1.5   | 0.5                              | 1.0  | 1.5   |
| 50                             | 3.60                             | 14.13 | 30.84 | 5.46                             | 7.16 | 11.45 |
| 100                            | 1.80                             | 7.07  | 15.42 | 2.95                             | 5.84 | 10.81 |
| 150                            | 1.20                             | 4.71  | 10.28 | 1.96                             | 4.58 | 9.45  |
| 200                            | 0.90                             | 3.53  | 7.71  | 1.29                             | 3.46 | 7.68  |
| 250                            | 0.72                             | 2.83  | 6.17  | 0.93                             | 2.53 | 5.98  |
| 300                            | 0.60                             | 2.36  | 5.14  | 0.72                             | 1.85 | 4.38  |
| 350                            | 0.51                             | 2.02  | 4.41  | 0.59                             | 1.42 | 3.06  |
| 400                            | 0.45                             | 1.77  | 3.86  | 0.50                             | 1.22 | 2.41  |
| 450                            | 0.40                             | 1.57  | 3.43  | 0.45                             | 1.06 | 2.08  |
| 500                            | 0.36                             | 1.41  | 3.08  | 0.40                             | 0.95 | 1.80  |
| 550                            | 0.33                             | 1.28  | 2.80  | 0.37                             | 0.86 | 1.61  |
| 600                            | 0.30                             | 1.18  | 2.57  | 0.33                             | 0.79 | 1.47  |
| 650                            | 0.28                             | 1.09  | 2.37  | 0.30                             | 0.73 | 1.36  |
| 700                            | 0.26                             | 1.01  | 2.20  | 0.28                             | 0.68 | 1.27  |
| 750                            | 0.24                             | 0.94  | 2.06  | 0.26                             | 0.64 | 1.19  |
| 800                            | 0.23                             | 0.88  | 1.93  | 0.25                             | 0.60 | 1.11  |
| 850                            | 0.21                             | 0.83  | 1.81  | 0.23                             | 0.56 | 1.05  |
| 900                            | 0.20                             | 0.79  | 1.71  | 0.22                             | 0.53 | 1.00  |
| 950                            | 0.19                             | 0.74  | 1.62  | 0.21                             | 0.50 | 0.94  |
| 1000                           | 0.18                             | 0.71  | 1.54  | 0.20                             | 0.48 | 0.90  |
| 1050                           | 0.17                             | 0.67  | 1.47  | 0.19                             | 0.46 | 0.86  |
| 1100                           | 0.16                             | 0.64  | 1.40  | 0.18                             | 0.44 | 0.82  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 แสดงค่าความปลอดภัยสำหรับกรณีที่ 4 ค่าความปลอดภัยของสลักเกลียวขนาด 5/8 นิ้ว จำนวน 4 6 8 และ 10 ตัว เมื่อได้รับความดันแตกต่างกัน

| ความดัน<br>(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) | ค่าความปลอดภัย        |      |      |      |                               |      |      |       |
|--------------------------------|-----------------------|------|------|------|-------------------------------|------|------|-------|
|                                | โปรแกรมคำนวณ          |      |      |      | ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ |      |      |       |
|                                | จำนวนสลักเกลียว (ตัว) |      |      |      | จำนวนสลักเกลียว (ตัว)         |      |      |       |
|                                | 4                     | 6    | 8    | 10   | 4                             | 6    | 8    | 10    |
| 50                             | 1.33                  | 1.33 | 1.33 | 1.33 | 4.27                          | 6.41 | 8.54 | 10.68 |
| 100                            | 1.32                  | 1.32 | 1.33 | 1.33 | 2.14                          | 3.20 | 4.27 | 5.34  |
| 150                            | 1.29                  | 1.31 | 1.32 | 1.32 | 1.42                          | 2.14 | 2.85 | 3.56  |
| 200                            | 1.18                  | 1.29 | 1.31 | 1.32 | 1.07                          | 1.60 | 2.14 | 2.67  |
| 250                            | 1.03                  | 1.23 | 1.29 | 1.30 | 0.85                          | 1.28 | 1.71 | 2.14  |
| 300                            | 0.89                  | 1.13 | 1.25 | 1.28 | 0.71                          | 1.07 | 1.42 | 1.78  |
| 350                            | 0.77                  | 1.03 | 1.19 | 1.25 | 0.61                          | 0.92 | 1.22 | 1.53  |
| 400                            | 0.68                  | 0.93 | 1.12 | 1.21 | 0.53                          | 0.80 | 1.07 | 1.33  |
| 450                            | 0.61                  | 0.84 | 1.03 | 1.15 | 0.47                          | 0.71 | 0.95 | 1.19  |
| 500                            | 0.56                  | 0.77 | 0.96 | 1.09 | 0.43                          | 0.64 | 0.85 | 1.07  |
| 550                            | 0.51                  | 0.70 | 0.89 | 1.02 | 0.39                          | 0.58 | 0.78 | 0.97  |
| 600                            | 0.47                  | 0.65 | 0.83 | 0.96 | 0.36                          | 0.53 | 0.71 | 0.89  |
| 650                            | 0.43                  | 0.60 | 0.77 | 0.90 | 0.33                          | 0.49 | 0.66 | 0.82  |
| 700                            | 0.40                  | 0.56 | 0.72 | 0.84 | 0.31                          | 0.46 | 0.61 | 0.76  |
| 750                            | 0.38                  | 0.52 | 0.68 | 0.79 | 0.28                          | 0.43 | 0.57 | 0.71  |
| 800                            | 0.35                  | 0.49 | 0.64 | 0.75 | 0.27                          | 0.40 | 0.53 | 0.67  |
| 850                            | 0.33                  | 0.47 | 0.60 | 0.71 | 0.25                          | 0.38 | 0.50 | 0.63  |
| 900                            | 0.32                  | 0.44 | 0.57 | 0.68 | 0.24                          | 0.36 | 0.47 | 0.59  |
| 950                            | 0.30                  | 0.42 | 0.54 | 0.64 | 0.22                          | 0.34 | 0.45 | 0.56  |
| 1000                           | 0.29                  | 0.40 | 0.52 | 0.61 | 0.21                          | 0.32 | 0.43 | 0.53  |
| 1050                           | 0.27                  | 0.38 | 0.49 | 0.59 | 0.20                          | 0.31 | 0.41 | 0.51  |
| 1100                           | 0.26                  | 0.36 | 0.47 | 0.56 | 0.19                          | 0.29 | 0.39 | 0.49  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 แสดงค่าความปลอดภัยสำหรับกรณีที่ 4 ค่าความปลอดภัยของสลักเกลียวขนาด 3/4 นิ้ว จำนวน 4 6 8 และ 10 ตัว เมื่อได้รับความดันแตกต่างกัน

| ความดัน(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) | ค่าความปลอดภัย        |      |       |       |                               |      |      |      |
|----------------------------|-----------------------|------|-------|-------|-------------------------------|------|------|------|
|                            | โปรแกรมคำนวณ          |      |       |       | ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ |      |      |      |
|                            | จำนวนสลักเกลียว (ตัว) |      |       |       | จำนวนสลักเกลียว (ตัว)         |      |      |      |
|                            | 4                     | 6    | 8     | 10    | 4                             | 6    | 8    | 10   |
| 50                         | 6.38                  | 9.58 | 12.77 | 15.96 | 1.33                          | 1.33 | 1.33 | 1.33 |
| 100                        | 3.19                  | 4.79 | 6.38  | 7.98  | 1.33                          | 1.33 | 1.33 | 1.33 |
| 150                        | 2.13                  | 3.19 | 4.26  | 5.32  | 1.32                          | 1.32 | 1.33 | 1.33 |
| 200                        | 1.60                  | 2.39 | 3.19  | 3.99  | 1.30                          | 1.32 | 1.32 | 1.33 |
| 250                        | 1.28                  | 1.92 | 2.55  | 3.19  | 1.25                          | 1.30 | 1.32 | 1.32 |
| 300                        | 1.06                  | 1.60 | 2.13  | 2.66  | 1.16                          | 1.27 | 1.31 | 1.31 |
| 350                        | 0.91                  | 1.37 | 1.82  | 2.28  | 1.05                          | 1.23 | 1.29 | 1.30 |
| 400                        | 0.80                  | 1.20 | 1.60  | 2.00  | 0.94                          | 1.17 | 1.27 | 1.29 |
| 450                        | 0.71                  | 1.06 | 1.42  | 1.77  | 0.86                          | 1.10 | 1.23 | 1.27 |
| 500                        | 0.64                  | 0.96 | 1.28  | 1.60  | 0.78                          | 1.03 | 1.19 | 1.25 |
| 550                        | 0.58                  | 0.87 | 1.16  | 1.45  | 0.72                          | 0.96 | 1.14 | 1.22 |
| 600                        | 0.53                  | 0.80 | 1.06  | 1.33  | 0.67                          | 0.89 | 1.09 | 1.18 |
| 650                        | 0.49                  | 0.74 | 0.98  | 1.23  | 0.62                          | 0.84 | 1.03 | 1.14 |
| 700                        | 0.46                  | 0.68 | 0.91  | 1.14  | 0.58                          | 0.78 | 0.97 | 1.10 |
| 750                        | 0.43                  | 0.64 | 0.85  | 1.06  | 0.55                          | 0.74 | 0.92 | 1.05 |
| 800                        | 0.40                  | 0.60 | 0.80  | 1.00  | 0.52                          | 0.70 | 0.87 | 1.01 |
| 850                        | 0.38                  | 0.56 | 0.75  | 0.94  | 0.49                          | 0.66 | 0.83 | 0.96 |
| 900                        | 0.35                  | 0.53 | 0.71  | 0.89  | 0.46                          | 0.63 | 0.79 | 0.92 |
| 950                        | 0.34                  | 0.50 | 0.67  | 0.84  | 0.44                          | 0.60 | 0.76 | 0.88 |
| 1000                       | 0.32                  | 0.48 | 0.64  | 0.80  | 0.42                          | 0.57 | 0.73 | 0.85 |
| 1050                       | 0.30                  | 0.46 | 0.61  | 0.76  | 0.40                          | 0.55 | 0.70 | 0.81 |
| 1100                       | 0.29                  | 0.44 | 0.58  | 0.73  | 0.38                          | 0.52 | 0.67 | 0.78 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 แสดงค่าความปลอดภัยสำหรับกรณีที่ 4 ค่าความปลอดภัยของสลักเกลียวขนาด 7/8 นิ้ว จำนวน 4 6 8 และ 10 ตัว เมื่อได้รับความดันแตกต่างกัน

| ความดัน<br>(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) | ค่าความปลอดภัย        |       |       |       |                               |      |      |      |
|--------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|------|------|------|
|                                | โปรแกรมคำนวณ          |       |       |       | ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ |      |      |      |
|                                | จำนวนสลักเกลียว (ตัว) |       |       |       | จำนวนสลักเกลียว (ตัว)         |      |      |      |
|                                | 4                     | 6     | 8     | 10    | 4                             | 6    | 8    | 10   |
| 50                             | 8.86                  | 13.29 | 17.72 | 22.15 | 1.33                          | 1.33 | 1.33 | 1.33 |
| 100                            | 4.43                  | 6.64  | 8.86  | 11.07 | 1.33                          | 1.33 | 1.33 | 1.33 |
| 150                            | 2.95                  | 4.43  | 5.91  | 7.38  | 1.32                          | 1.33 | 1.33 | 1.33 |
| 200                            | 2.21                  | 3.32  | 4.43  | 5.54  | 1.32                          | 1.32 | 1.32 | 1.33 |
| 250                            | 1.77                  | 2.66  | 3.54  | 4.43  | 1.30                          | 1.32 | 1.32 | 1.32 |
| 300                            | 1.48                  | 2.21  | 2.95  | 3.69  | 1.27                          | 1.31 | 1.32 | 1.32 |
| 350                            | 1.27                  | 1.90  | 2.53  | 3.16  | 1.23                          | 1.29 | 1.31 | 1.32 |
| 400                            | 1.11                  | 1.66  | 2.21  | 2.77  | 1.17                          | 1.27 | 1.30 | 1.31 |
| 450                            | 0.98                  | 1.48  | 1.97  | 2.46  | 1.09                          | 1.24 | 1.29 | 1.30 |
| 500                            | 0.89                  | 1.33  | 1.77  | 2.21  | 1.01                          | 1.20 | 1.27 | 1.29 |
| 550                            | 0.81                  | 1.21  | 1.61  | 2.01  | 0.94                          | 1.16 | 1.25 | 1.28 |
| 600                            | 0.74                  | 1.11  | 1.48  | 1.85  | 0.88                          | 1.11 | 1.23 | 1.27 |
| 650                            | 0.68                  | 1.02  | 1.36  | 1.70  | 0.82                          | 1.05 | 1.20 | 1.25 |
| 700                            | 0.63                  | 0.95  | 1.27  | 1.58  | 0.77                          | 1.00 | 1.17 | 1.23 |
| 750                            | 0.59                  | 0.89  | 1.18  | 1.48  | 0.73                          | 0.95 | 1.13 | 1.21 |
| 800                            | 0.55                  | 0.83  | 1.11  | 1.38  | 0.68                          | 0.90 | 1.09 | 1.18 |
| 850                            | 0.52                  | 0.78  | 1.04  | 1.30  | 0.65                          | 0.86 | 1.05 | 1.16 |
| 900                            | 0.49                  | 0.74  | 0.98  | 1.23  | 0.62                          | 0.82 | 1.01 | 1.12 |
| 950                            | 0.47                  | 0.70  | 0.93  | 1.17  | 0.59                          | 0.78 | 0.98 | 1.09 |
| 1000                           | 0.44                  | 0.66  | 0.89  | 1.11  | 0.56                          | 0.75 | 0.94 | 1.06 |
| 1050                           | 0.42                  | 0.63  | 0.84  | 1.05  | 0.54                          | 0.72 | 0.90 | 1.03 |
| 1100                           | 0.40                  | 0.60  | 0.81  | 1.01  | 0.51                          | 0.69 | 0.87 | 1.00 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 แสดงค่าความปลอดภัยหลังจากปรับปรุงโปรแกรม (สำหรับแผ่นยึดด้านข้าง)  
ค่าความปลอดภัยของแผ่นยึดด้านข้างที่ความหนา 0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว เมื่อ  
ได้รับความดันแตกต่างกัน

| ความดัน<br>(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) | ค่าความปลอดภัย                   |      |       |                                  |      |       |
|--------------------------------|----------------------------------|------|-------|----------------------------------|------|-------|
|                                | โปรแกรมคำนวณ                     |      |       | ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์    |      |       |
|                                | ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง (นิ้ว) |      |       | ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง (นิ้ว) |      |       |
|                                | 0.5                              | 1.0  | 1.5   | 0.5                              | 1.0  | 1.5   |
| 50                             | 3.60                             | 8.89 | 17.33 | 5.46                             | 7.16 | 11.45 |
| 100                            | 1.80                             | 4.44 | 8.66  | 2.95                             | 5.84 | 10.81 |
| 150                            | 1.20                             | 2.96 | 5.78  | 1.96                             | 4.58 | 9.45  |
| 200                            | 0.90                             | 2.22 | 4.33  | 1.29                             | 3.46 | 7.68  |
| 250                            | 0.72                             | 1.78 | 3.47  | 0.93                             | 2.53 | 5.98  |
| 300                            | 0.60                             | 1.48 | 2.89  | 0.72                             | 1.85 | 4.38  |
| 350                            | 0.51                             | 1.27 | 2.48  | 0.59                             | 1.42 | 3.06  |
| 400                            | 0.45                             | 1.11 | 2.17  | 0.50                             | 1.22 | 2.41  |
| 450                            | 0.40                             | 0.99 | 1.93  | 0.45                             | 1.06 | 2.08  |
| 500                            | 0.36                             | 0.89 | 1.73  | 0.40                             | 0.95 | 1.80  |
| 550                            | 0.33                             | 0.81 | 1.58  | 0.37                             | 0.86 | 1.61  |
| 600                            | 0.30                             | 0.74 | 1.44  | 0.33                             | 0.79 | 1.47  |
| 650                            | 0.28                             | 0.68 | 1.33  | 0.30                             | 0.73 | 1.36  |
| 700                            | 0.26                             | 0.63 | 1.24  | 0.28                             | 0.68 | 1.27  |
| 750                            | 0.24                             | 0.59 | 1.16  | 0.26                             | 0.64 | 1.19  |
| 800                            | 0.23                             | 0.56 | 1.08  | 0.25                             | 0.60 | 1.11  |
| 850                            | 0.21                             | 0.52 | 1.02  | 0.23                             | 0.56 | 1.05  |
| 900                            | 0.20                             | 0.49 | 0.96  | 0.22                             | 0.53 | 1.00  |
| 950                            | 0.19                             | 0.47 | 0.91  | 0.21                             | 0.50 | 0.94  |
| 1000                           | 0.18                             | 0.44 | 0.87  | 0.20                             | 0.48 | 0.90  |
| 1050                           | 0.17                             | 0.42 | 0.83  | 0.19                             | 0.46 | 0.86  |
| 1100                           | 0.16                             | 0.40 | 0.79  | 0.18                             | 0.44 | 0.82  |

## ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 ค่าความเค้นที่ยอมรับได้ของวัสดุที่รับแรงดึง (Basic Allowable Stresses in Tension for Metals) [23]

| Material                         | Spec. No. | Type/Grade | Min. Temp., °F | Specific Min. Strength, ksi |       | Basic Allowable Stress, S, ksi (1), at Metal Temperature, °F |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |     |      |      |      |
|----------------------------------|-----------|------------|----------------|-----------------------------|-------|--|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|
|                                  |           |            |                | Tensile                     | Yield | Min Temp.  | To 100 | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 650  | 700  | 750  | 800  | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
|                                  |           |            |                |                             |       |  | 20.0   | 20.0 | 20.0 | 19.9 | 19.0 | 17.9 | 17.3 | 16.7 | 13.9 | 11.4 | 8.7 | 5.9 | 4.0 | 2.5  | 1.6  | 1.0  |
| Carbon Steel, pipe and Tubes (2) | A106      | B          | B              | 60                          | 35    | 20.0   | 20.0   | 20.0 | 19.9 | 19.0 | 17.9 | 17.3 | 16.7 | 13.9 | 11.4 | 8.7  | 5.9 | 4.0 | 2.5 | 1.6  | 1.0  |      |
| Plate, Bars, Shapes, and Sheets  | A516      | 70         | B              | 70                          | 38    | 23.3   | 23.2   | 22.4 | 21.6 | 20.6 | 19.4 | 18.8 | 18.1 | 14.8 | 12.0 | 9.3  | -   | -   | -   | -    | -    | -    |

ตารางที่ ค-2 ค่าความเค้นที่ยอมรับได้ของเหล็กอัลลอย โครเมียม-โมลิบดีนัม (Stress Allowance of Alloy Steel Cr-Mo) [24]

| Nominal Composition | Product Form | Spec. No. | Type/Grade | Min. Temp., °F | Specific Min. Strength, ksi |       | Basic Allowable Stress, S, ksi (1), at Metal Temperature, °F |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|--------------|-----------|------------|----------------|-----------------------------|-------|--|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     |              |           |            |                | Tensile                     | Yield | Min Temp.  | To 100 | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 650  | 700  | 750  | 800  | 850  | 900  | 905  | 1000 | 1050 | 1100 |
|                     |              |           |            |                |                             |       |  | 125    | 105  | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 21.0 | 17.0 | 12.5 | 8.5  |
| Alloy Steel, Cr-Mo  | Bolt         | A193      | B7         | -55            | 125                         | 105   | 25.0   | 25.0   | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 21.0 | 17.0 | 12.5 | 8.5  | 4.5  | 2.4  | -    |      |

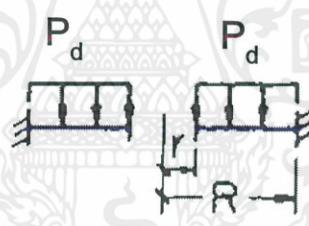
ตารางที่ ค-3 ตารางแสดงค่ามาตรฐานของท่อ (Pipe Schedules) [25]

| Nominal<br>Pipe Size<br>(in.) | Outside<br>Diameter<br>(in.) | Schedule<br>5s<br>Wall | Schedule<br>10s<br>Wall | Schedule<br>40s<br>Wall | Schedule<br>80s<br>Wall |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 2"                            | 2.375                        | 0.065                  | 0.109                   | 0.154                   | 0.218                   |
| 4"                            | 4.500                        | 0.083                  | 0.120                   | 0.237                   | 0.337                   |
| 6"                            | 6.625                        | 0.109                  | 0.134                   | 0.280                   | 0.432                   |
| 8"                            | 8.625                        | 0.109                  | 0.148                   | 0.322                   | 0.500                   |
| 10"                           | 10.750                       | 0.134                  | 0.165                   | 0.365                   | 0.500                   |

ตารางที่ ค-4 ตารางแสดงพื้นที่ของสลักเกลียว [26]

| Stud Size (in.)          | 5/8   | 3/4   | 7/8   |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| Area (in. <sup>2</sup> ) | 0.202 | 0.302 | 0.419 |

ตารางที่ ค-5 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ K [15]



R/r

| 1.25      | 1.5       | 2         | 3         | 4         | 5        |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| K = 0.105 | K = 0.259 | K = 0.481 | K = 0.654 | K = 0.708 | K = 0.73 |

หมายเหตุ: R คือ รัศมีนอกของแผ่นปิด (End Plate)  
r คือ รัศมีในของแผ่นปิด (End Plate)  
 $P_d$  คือ ความดันที่กระทำต่อแผ่นปิด (End Plate)

โปรแกรมออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดันโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์  
Optimum Design Program for Stop-Leaking Clamp of Pressure Pipeline Repairs  
Using Finite Element Method

นายนิติพงษ์ คุ่มเที่ยง รหัส 56010679 , นางสาวปวีณา แซ่ลิ้ม รหัส 56010735  
และนายวรยุทธ กลิ่งเนียม รหัส 56011065

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปริญญานิพนธ์  
(รศ.ดร. จำลอง ปราบแก้ว)

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างโปรแกรมหาขนาดของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดันของบริษัท ซีอาร์ เอเชีย (ประเทศไทย) จำกัด ให้มีความเหมาะสม ที่ใช้ในการซ่อมบำรุงระบบท่อในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีหรือโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า คณะผู้จัดทำจึงศึกษาสมการความเค้นที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์นี้ แล้วเขียนลงในโปรแกรม MS Excel 2016 พร้อมทั้งวิเคราะห์ความเค้นของอุปกรณ์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SolidWorks Simulation 2016 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ พร้อมทั้งปรับปรุงโปรแกรมให้ใกล้เคียงกัน โดยหาขนาดของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วที่เหมาะสมสำหรับท่อตรงที่มีขนาด 2 4 6 และ 8 นิ้ว ความดันภายในท่อไม่เกิน 1100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิไม่เกิน 1100 องศาฟาเรนไฮต์ และมีค่าความปลอดภัยตั้งแต่ 1 สำหรับสลักเกลียว ค่าความปลอดภัยตั้งแต่ 2 สำหรับผนังท่อ แผ่นยึดด้านข้าง และแผ่นปิด จากการดำเนินงาน เมื่อเลือกขนาดชิ้นส่วนแต่ละชิ้นสำหรับท่อรั่วมาขนาดหนึ่ง แล้วนำมาวิเคราะห์ความเค้นด้วยโปรแกรมและระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า มีค่าความเค้นที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถนำโปรแกรมที่ได้ปรับปรุงไปสร้างตารางการออกแบบอุปกรณ์ได้.....

**คำหลัก:** อุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อ; การวิเคราะห์ความเค้น; ไฟไนต์เอลิเมนต์

**Abstract**

The object of this research is programming to calculate the optimum stop-leaking clamp in petrochemical industry or power plant pipelines repair for CR-Asia (Thailand) Co., Ltd. In this research collected the stress equations which design these clamps and insert into MS Excel 2016. Including use finite element methods (FEM) by SolidWorks Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2016 to analysis stress on each component of clamps. And then, compare the result from two methods and improve this program to output result which be similar to result from finite element method. These repair clamps were designed for 2 4 6 and 8 inch diameters, pressure and temperature not more than 1100 pounds per square inch and 1100 degrees Fahrenheit, respectively of leaking pipeline. Safety factor, not less than 1 for studs and not less than 2 for shell walls, ear plates and end plates. In process, dimensions each part of clamp was selected and was analyzed by program and FEM. And the results from two methods were nearly. Hence, this program is abled to create the repair clamp designed catalogues.

**Keyword:** repair clamp; stress analysis, FEM.

## 1. บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในบางครั้งการกัดกร่อน การสึกกร่อน การสั่นสะเทือนหรือความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ อาจเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการรั่วไหลของระบบท่อ การรั่วไหลอาจเกิดขึ้นได้ทุกที่ไม่ว่าจะเป็น ท่อตรง ข้อต่อ ข้อต่อสามทาง หน้าแปลน วาล์ว หรือท่อตัดโค้ง ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งในบางกรณีสามารถยับยั้งการรั่วไหลได้ชั่วคราวโดยใช้ไฟเบอร์กลาส (Fiber Glass) หรือ คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber) ในการเสริมความแข็งแรงและใช้อุปกรณ์ร่วมกับปะเก็น (Gasket) และอุปกรณ์ยึดท่อ (Pipe Clamp) จนกระทั่งสามารถทำการซ่อมแซมแบบถาวรได้



รูปที่ 1.1 ท่อตรงที่เสื่อมสภาพ และเกิดการรั่วขึ้น

(CR Asia(Thailand),2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่บางครั้งในท่อที่มีความดันและอุณหภูมิสูง การแข็งตัวของอีพอกซีใช้เวลานานหรือความเสียหายของท่อสูงมากจนอาจจะเกิดการระเบิดได้ ในกรณีนี้การซ่อมแซมที่มีระยะเวลาในการใช้งานนานและน่าไว้วางใจกว่าจำเป็นต้องนำมาใช้ นั่นคือ อุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อ (Stop-Leaking Clamp) ดังนั้นโครงการนี้จึงได้นำเสนอการหาขนาดอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อที่เหมาะสมสำหรับท่อรั่วที่มีลักษณะเป็นท่อตรงขนาด 2 ถึง 8 นิ้ว

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ออกแบบโปรแกรมหาขนาดอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดันที่เหมาะสมสำหรับท่อรั่วที่มีลักษณะเป็นท่อตรงขนาด 2 4 6 และ 8 นิ้ว
2. สร้างตารางออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. เขียนแบบที่ใช้ในการตรวจสอบค่าความแข็งแรงของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันบริเวณท่อตรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2, 4, 6 และ 8 นิ้ว ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทำอุปกรณ์ปิดรอยรั่ว ได้แก่ A106 Grade B สำหรับผนังท่อ (Shell Walls), A516 Grade 70 สำหรับแผ่นยึดด้านข้าง (Ear Plates) และแผ่นปิด (End Plates), A193 Grade B7 สำหรับสลักเกลียว (Studs) และ A194 Grade 2H สำหรับหมุดเกลียว (Nuts)

2. กำหนดขนาดของชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่แผ่นปิดหนา 1 นิ้ว ผนังท่อนหนา 5s, 10s, 40s และ 80s แผ่นยึดด้านข้างหนา 0.5, 1.0 และ 1.5 นิ้ว สลักเกลียวขนาด 5/8, 3/4 และ 7/8 นิ้ว สลักเกลียวจำนวน 4, 6, 8 และ 10

2. สร้างโปรแกรมคำนวณหาความเค้นของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันโดยโปรแกรม MS Excel 2016

3. วิเคราะห์ความเค้นของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม SolidWorks Simulation 2016

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจในการซ่อมแซมระบบท่อ
2. อำนวยความสะดวกในการออกแบบเพื่อนำไปสร้างอุปกรณ์ปิดรอยรั่ว

### 2. งานวิจัยและเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Abdulaziz K. Al-oriar (2008)<sup>[1]</sup> ได้คิดค้นอุปกรณ์ปิดรอยรั่วที่ประกอบด้วย แผ่นเหล็กตามแนวยาวเพื่อยึดสลักเกลียวเข้ากับชิ้นและชิ้นล่าง เชื่อมติดเข้ากับชิ้นที่มีลักษณะทรงกระบอกกลางแบ่งครึ่งตามแนวยาวและภายในแบ่งเป็นช่องจำนวนสามช่องโดยสองช่องด้านข้างเปิดออก ซึ่งหนึ่งในช่องด้านข้างดังกล่าวมีรูสำหรับอัดสารกันรั่วเข้าไปภายใน ส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนคือแผ่นปิดปลายทั้งสองด้านของอุปกรณ์ซึ่งมีร่องสำหรับขันสลักเกลียวยึดเข้ากับชิ้นทรงกระบอกทั้งบนและล่าง เพื่อปิดช่องสำหรับอัดสารกันรั่ว และยังมีวาล์วที่ตำแหน่งช่องกลางของชิ้นล่างของส่วนที่เป็นทรงกระบอกกลางสำหรับระบายสารที่รั่วไหลขณะทำการติดตั้ง และรูปบริเวณช่องใดช่องหนึ่งของส่วนปลายของอุปกรณ์เพื่อติดตั้งวาล์วสำหรับอัดสารกันรั่วเข้าสู่อุปกรณ์

Luke P. Djukic, Wei Siang Sum, K.H. Leong, Timothy W. Eccleshall และ Alan Y.L. Leong. (2015) <sup>[2]</sup> ได้ทำการศึกษาการออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วโดยสร้างจากวัสดุผสมสองชนิด ความดันออกแบบ 10.5 เมกะปาสคาล โดยการทดลองตัวแปรต่าง ๆ คือ ความหนาของอุปกรณ์ ช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับท่อที่รั่ว ความแข็งแรงของสารกันรั่ว และอุณหภูมิใช้งาน ชั้นแรกทดลองโดยใช้ต้นแบบอุปกรณ์ความหนาของผนังท่อ 20 มิลลิเมตร ความหนาของแผ่นยึดสลักเกลียวด้านข้าง 42 มิลลิเมตร และช่องว่างระหว่าง

อุปกรณ์กับท่อที่รั่วเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ปรากฏว่า อุปกรณ์เสียหายที่ความดัน 13.4 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้อง ชั้นที่สองทดลองโดยใช้ต้นแบบ อุปกรณ์ความหนาของผนังท่อ 35 มิลลิเมตร ความหนาของแผ่นยึดสลักเกลียวด้านข้าง 56 มิลลิเมตร และช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับท่อที่รั่วเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ผลแสดงให้เห็นว่าความดันที่ทนได้สามารถผ่านค่าความดันออกแบบที่มีค่า 10.5 เมกะปาสคาล ได้อย่างแน่นอน ส่วนเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสและ 80 องศาเซลเซียส ได้ค่าความดันที่เสียหายเท่ากับ 19.2 องศาเซลเซียสและ 22.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้สารกันรั่วที่มีความแข็งตามมาตรฐาน สรุปผลการทดลองว่า ความหนาของอุปกรณ์ (ผนังท่อและแผ่นยึดสลักเกลียวด้านข้าง) ช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับท่อที่รั่ว รวมทั้งความแข็งของสารกันรั่ว ล้วนเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์ ดังนั้นแล้ว ความสามารถในการยับยั้งการรั่วไหลของอุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของอุปกรณ์และเพิ่มค่าความแข็งแรงของสารกันรั่ว และลดช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับท่อที่รั่ว

## 2.2 เนื้อหาที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 หลักการพื้นฐานที่ใช้พิจารณาในการออกแบบ [3]

คำนึงถึงความดันออกแบบ อุณหภูมิ ออกแบบ ชนิดวัสดุของท่อ ความหนาท่อ ค่าการกัดกร่อนที่ยอมรับได้ ชนิดของของไหลภายในท่อ และอีกหลากหลายข้อจำกัดอื่นที่เกี่ยวข้องกับการซ่อมแซม

ขั้นตอนต่อไปจะทำการคำนวณขนาดของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วเพื่อให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการรั่วได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งตำแหน่งของรอยเชื่อม รอยต่อเล็ก ๆ จุดรองรับท่อหรือสิ่งกีดขวางอื่น ๆ ก็มีผลต่อการออกแบบ สามารถแก้ปัญหาได้โดยการลงสำรวจความเสียหายในพื้นที่จริงเพื่อประเมินตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการติดตั้ง

ส่วนใหญ่อุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อสร้างขึ้นมาโดยท่อทรงกระบอกหรือแผ่นเหล็กม้วน ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนออกแบบตามตาราง ASME B31.3 (หรือค่าอื่น ๆ ที่เหมาะสม) ตัวอุปกรณ์จะแบ่งตามแนวระนาบเป็นสองฝา มีแผ่นสำหรับยึดสลักเกลียว (Bolting Bars or Flanges) ติดตั้งตามแนวรอยตัดตั้งแต่ขอบหนึ่งไปยังอีกขอบหนึ่ง สลักเกลียว (Bolts) ใช้ยึดทั้งสองฝาประกบเข้าด้วยกัน โดยต้องออกแบบให้สามารถยับยั้งความดันที่กระทำบนระนาบ

การยึดด้วยสลักเกลียวต้องออกแบบให้สามารถรับแรงที่เกิดจากความดันของท่อได้อย่างเหมาะสมเพื่อซ่อมแซมรอยรั่วได้อย่างแน่นอน

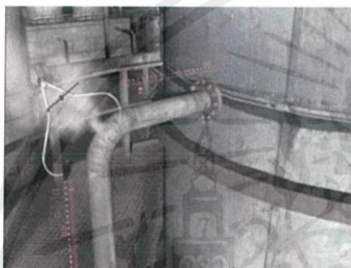
### 2.2.2 วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ปิดรอยรั่วโดยทั่วไป [4]

เมื่อท่อเกิดการรั่วขึ้นจะมีการลงพื้นที่ตรวจวัดขนาดของท่อ รอยรั่ว ความแข็งแรง ระยะความยาว เพื่อการออกแบบและคำนวณ (รูปที่ 2.1) หลังจากนั้นจึงสร้างอุปกรณ์สำหรับปิดรอยรั่วขึ้น โดยใช้เครื่องมือแปรรูปทางกลต่าง ๆ สร้างอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่ขึ้นมา และนำมาเชื่อมประกอบกัน (รูปที่ 2.2) นำอุปกรณ์ติดตั้งท่อที่รั่วพร้อมใส่สลักเกลียว และหมุดเกลียว ต่อวาล์ว

สำหรับการอัดผลิตภัณฑ์ (Injection Valve) กับรูที่เจาะไว้ (รูปที่ 2.3) พร้อมกับประกอบกระบอกที่ใช้สำหรับอัดความดัน (Injection gun) กับปั๊มโยก (Pneumatic pump) เริ่มอัดผลิตภัณฑ์อุดรอยรั่ว (Sealant) เข้าไปจนเต็มร่อง (รูปที่ 2.4) เป็นอัดเสริมวิธีการปิดรอยรั่ว



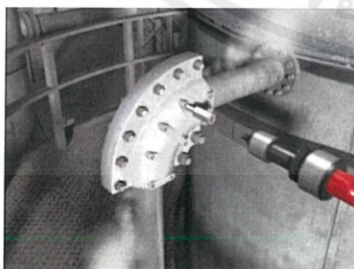
รูปที่ 2.4 อัดผลิตภัณฑ์จนเต็มร่อง  
(The Colt Group, 2012)



รูปที่ 2.1 ท่อที่รั่ว และวัดขนาดเพื่อใช้ในการ  
ออกแบบ  
(The Colt Group, 2012)



รูปที่ 2.2 สร้างอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน  
(The Colt Group, 2012)



รูปที่ 2.3 ต่อดำกับกระบอกที่ใช้สำหรับอัด  
ผลิตภัณฑ์ (The Colt Group, 2012)

### 2.2.3 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อ

จากการศึกษาค้นคว้าลักษณะของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อตรงรูปแบบต่าง ๆ พบว่ารูปแบบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อค่อนข้างคล้ายคลึงกัน คณะผู้จัดเลือกแบบของบริษัท ซีอาร์ เอเซีย (ประเทศไทย) จำกัด โดยมีส่วนประกอบดังรูปที่ 2.5

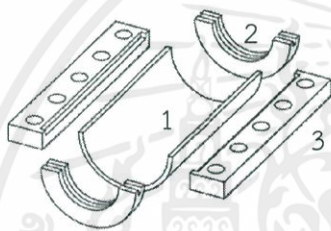
หมายเลข 1 - ผนังท่อ (Shell Walls) ใช้ท่อที่มีขนาดใหญ่กว่าท่อที่รั่ว ทำการผ่าครึ่งตามแนวยาว และกัดร่องสำหรับอัดผลิตภัณฑ์สำหรับการหยุดการรั่วไหล (Sealant)

หมายเลข 2 - แผ่นปิด (End Plates) ใช้เหล็กแผ่นตัดเป็นวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของผนังท่อ (หมายเลข 1) เจาะรูตรงกลางให้มีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของท่อที่รั่วนำไปตัดแบ่งเป็นสองส่วน และกัดร่องสำหรับอัดผลิตภัณฑ์สำหรับการหยุดการรั่วไหล (Sealant) จากนั้นนำไปเชื่อมติดกับตัวผนังท่อและแผ่นยึดด้านข้าง

หมายเลข 3 - แผ่นยึดด้านข้าง (Ear Plates) ใช้เหล็กแผ่น ตัดให้มีความยาวเท่ากับ

ความยาวของผนังท่อรวมกับความหนาของแผ่นปิด เจาะรูเพื่อใส่สลักเกลียว นำมาเชื่อมติดกับผนังท่อ

สุดท้ายนำสลักเกลียว และหมุดเกลียว (Studs and Nuts) มาสวมที่รูของแผ่นยึดด้ายข้าง เพื่อยึดอุปกรณ์ปิดรอยรั่วทั้งสองเข้าด้วยกันกับบริเวณท่อที่รั่ว



รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วสำหรับท่อตรง

#### 2.2.4 ความดันที่ใช้ออกแบบ (Design Pressure) <sup>[5]</sup>

อุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดันทำหน้าที่เพียงครอบท่อเท่านั้น ซึ่งสิ่งที่ยับยั้งการรั่วไหลได้นั้นคือ ผลิตภัณฑ์อุดรอยรั่ว (Sealant) โดยสารนี้จะถูกฉีดเข้าไปในช่องว่างระหว่างอุปกรณ์และท่อด้วยความดันจากกระบอกฉีดความดัน (Injection gun) และปั๊มที่มีค่าประมาณ 1.1-1.3 เท่าของความดันภายในท่อ ซึ่งทางทฤษฎีต้องพิจารณาถึงขีดจำกัดของความดัน โดยความแตกต่างระหว่างความดันภายในท่อและความดันที่ใช้ในการฉีดสารจะต้องไม่เกินความดันวิกฤติของท่อ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียรูปของท่อนั้น ๆ

#### 2.2.5 ผลิตภัณฑ์อุดรอยรั่ว (Sealants) <sup>[5]</sup>

ผลิตภัณฑ์อุดรอยรั่วถูกออกแบบให้มีการไหลแบบพลาสติก โดยองค์ประกอบหลักของ

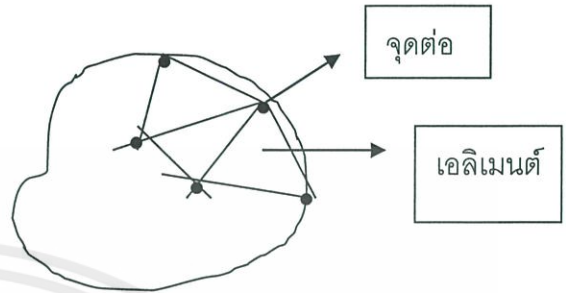
สาร คือ ยางเทอร์โมพลาสติก (Thermosetting Rubbers), ยางเสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Rubber), เทฟลอน (Polytetrafluoroethylene), เรซิน และ เส้นใยผสม (Fiber/Graphite mixture) ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกสารให้เหมาะสมมีดังนี้

1. สามารถรักษาอุณหภูมิภายในท่อและรูปทรงของท่อให้คงเดิมอีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีต้องสามารถเข้ากันได้กับกระบวนการไหลของของไหลนั้นด้วย
2. ไม่เสื่อมสภาพเนื่องจากผลกระทบจากอุณหภูมิภายในท่อ ซึ่งโดยปกติองค์ประกอบของสารสามารถรองรับอุณหภูมิได้ถึง 1100 F
3. ไม่ทำปฏิกิริยากับสารภายในท่อ
4. สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนมากับสารจะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนท่อ มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดความเสียหาย ดังนั้นควรใช้สารที่มีความบริสุทธิ์ หรือ มีปริมาณในระดับที่ยอมรับได้ คือ คลอไรด์, ซัลเฟอร์ และฟลูออไรด์ ต้องต่ำกว่า 0.1 ppm
5. อายุของสารถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิภายในท่อ ดังนั้นต้องมีการประเมินคุณภาพของสารที่สามารถรองรับเงื่อนไขดังกล่าวได้

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อุดรอยรั่ว: CS200<sup>[6]</sup>

ชื่อผลิตภัณฑ์: CS200 Sealant, มีคุณสมบัติทนความดันและอุณหภูมิของไอน้ำและเคมีภัณฑ์ได้สูง เหมาะสำหรับปะเก็นหน้าแปลนและงานซ่อมแซมท่อ ใช้งานที่อุณหภูมิห้อง ถึง 1000 องศาฟาเรนไฮต์ และความดันใช้งานได้ถึง 6000

ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีความความเป็นกรดเบส pH 3-12 มีส่วนประกอบเป็นไฟเบอร์(Fibers) กราไฟต์(Graphite) และ สารเติมแต่งอื่น ๆ มีกลิ่นไฮโดรคาร์บอน(Aromatic Hydrocarbon) และมีความถ่วงจำเพาะ: 1.12-1.13 กรัมต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 2.6 แสดงการแบ่งรูปร่างของปัญหา

ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย

### 2.2.6 วัสดุที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อความดัน (Materials)

วัสดุที่นิยมใช้ และมีจำหน่ายภายในประเทศ สำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และโรงไฟฟ้าจะใช้วัสดุดังนี้ ท่อ (Pipe) ใช้ A106 Grade B, แผ่นยึดด้านข้าง (Ear Plate) และแผ่นปิด (End Plate) ใช้ A516 Grade 70, สลักเกลียว (Studs) ใช้ A193 Grade B7 และ หมุดเกลียว (Nuts) ใช้ A194 Grade 2H ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1: ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็ก

|                                     | ASTM        |            |                             |
|-------------------------------------|-------------|------------|-----------------------------|
|                                     | A516 Gr. 70 | A106 Gr. B | A193 Gr. B7/<br>A194 Gr. 2H |
| Elastic Modulus (ksi)               | 29000       | 29000      | 27500                       |
| Poisson's Ratio                     | 0.29        | -          | 0.27                        |
| Shear Modulus (ksi)                 | 11600       | -          | 11600                       |
| Mass Density (lb./in <sup>3</sup> ) | 0.2818      | 0.2836     | 0.2836                      |
| Tensile Strength (ksi)              | 70.34       | 60.19      | 94.99                       |
| Yield Strength (ksi)                | 37.71       | 34.81      | 60.19                       |

### 2.2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [7]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหนึ่งในหลายวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง

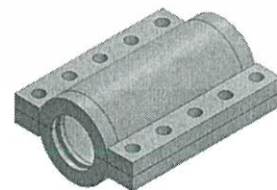
หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การแบ่งสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ (Domain) ออกเป็นส่วนย่อย เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมักจะอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ที่จุดตัดของกรอบเอลิเมนต์เรียกว่า จุดต่อ (Node) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการสร้างฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบที่จุดต่อเหล่านั้นพร้อม ๆ กันโดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆไปที่ไม่ซับซ้อน เราจะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใดๆของชิ้นส่วน โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่า ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งต่างๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอ และบางบริเวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของภาระอย่างฉับพลัน หรือใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equations) หรือสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ได้ ฉะนั้นจึงต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะไม่วิเคราะห์ปัญหาที่เดียวทั้งระบบเช่นวิธีต่างๆไป แต่เราจะวิเคราะห์หาค่าที่แต่ละเอลิเมนต์แล้วนำมารวมเข้ากันเป็นผลเฉลยของระบบ เช่น การหาความเค้นของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างของระบบ ในปัจจุบันระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เข้ามามีบทบาทต่อการทำงานของวิศวกรเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมได้มีการ

นำไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์เข้ามาใช้เพื่อทำนายปรากฏการณ์ต่าง ๆที่เกิดขึ้นเสมือนการใช้งานจริงได้โดยตรงทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ จึงไม่ต้องมีการลองผิดลองถูก ซึ่งทำให้ลดเวลาและปริมาณในการทำงาน ลดปริมาณวัสดุที่ใช้ รวมทั้งหลีกเลี่ยงการทดลองที่ไม่จำเป็น และยังทำให้ชิ้นงานที่ถูกออกแบบมามีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการทำงาน

ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามส่วนของโปรแกรมซึ่งมี 3 ขั้นตอนดังนี้ [8] [9]

1. Pre-Processing คือ ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลเพื่อคำนวณ ประกอบด้วยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 3 มิติ การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ การกำหนดการยึดจับ การกำหนดจุดเชื่อมต่อ การกำหนดแรงกระทำ การแบ่งแบบจำลองคำนวณ
  2. Solve-Processing คือ ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลย
  3. Post-Processing คือ การแสดงผลจากการวิเคราะห์
3. การคำนวณความเค้นที่กระทำต่ออุปกรณ์ปิดรอยรั่วที่ความดันสำหรับท่อตรง



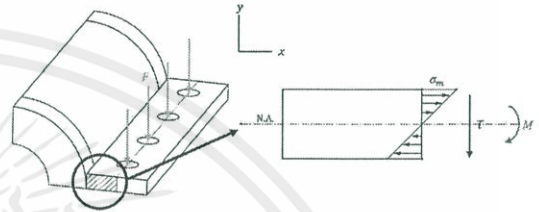
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ปิดรอยรั่วสำหรับท่อตรง

- $\sigma$  Stress on each Components
- $\sigma_{all}$  Stress Allowance
- $\sigma_m$  Bending Stress

- $\tau$  Shear Stress
- $A_p$  Projection Area
- $A_s$  Tensile Stress Area of Stud
- $D_{nw}$  Nominal Diameter of Shell Wall
- $D_{ow}$  Outer Diameter of Shell Wall
- $D_l$  Diameter of Leaking Pipe
- $H$  Thickness of Ear Plate
- $K$  Coefficients for Length Ratio
- $L_w$  Length of Shell Wall
- $L_{ear}$  Length between stud holes center line to edge of ear plate
- $N_s$  Number of Stud
- $P$  Pressure of Leaking Pipe
- $P_d$  Design Pressure
- $R$  Inner radius
- $T$  Temperature of Leaking Pipe
- $t_{end}$  Thickness of End Plate
- $t_w$  Thickness of Shell Wall
- $W$  Length of Ear Plate

$$\sigma = \frac{P_d(R + 0.6t_w)}{t_w} \quad (2-1)$$

### 3.2 ความเค้นบริเวณแผ่นยึดด้านข้าง (Ear Plate) [11]



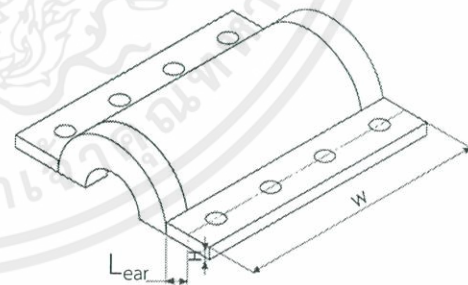
รูปที่ 3.3 ความเค้นรวมที่เกิดขึ้นบนแผ่นยึดด้านข้าง

#### Combined Stress

$$\sigma = \frac{\sigma_m}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (2-2)$$

$$\sigma_m = \frac{(P_d \times A_p \times L_{ear})(H/2)}{\frac{1}{12} \times W \times H^2} \quad (2-3)$$

$$\tau = \frac{P_d \times A_p}{W \times H} \quad (2-4)$$



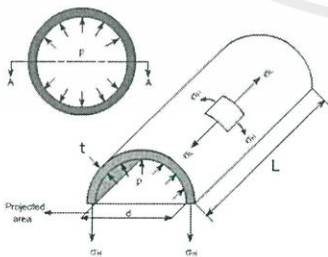
รูปที่ 3.4 ขนาดของแผ่นยึดด้านข้าง

### 3.3 ความเค้นบริเวณแผ่นปิด (End Plate) [12]

[12]

$$\sigma = \frac{KP_d R^2}{t_e^2} \quad (2-5)$$

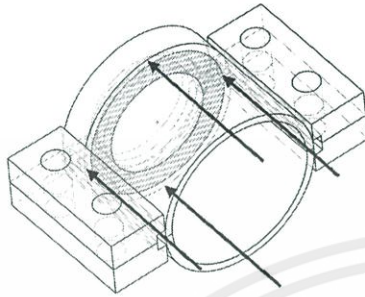
### 3.1 ความเค้นที่เกิดบริเวณผนังท่อ (Shell Wall) [10]



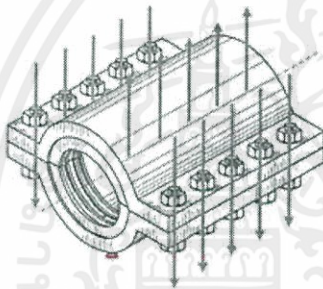
รูปที่ 3.2 แสดงทิศทางของแรงเนื่องจากความดันที่กระทำต่อผนังท่อ

(Prof. SATISH C. SHARMA, Retrieved from

<https://goo.gl/4nVb6A>)



รูปที่ 3.5 แสดงพื้นที่รับแรงภายในบริเวณแผ่นปิด  
3.4 ความเค้นบริเวณสลักเกลียว (Studs) [11]



รูปที่ 3.6 แสดงทิศของแรงที่กระทำต่อสลัก  
เกลียว

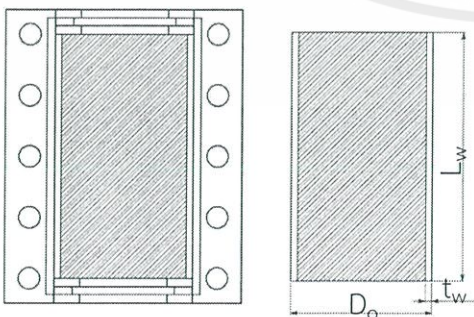
(Laurence S. Smith, Jr., 2001)

แรงภายในท่อ = แรงที่สลักเกลียวต้าน

$$P \times A_p = \sigma \times (N_s \times A_s) \quad (2-6)$$

$$\sigma = \frac{P_d \times A_p}{N_s \times A_s} \quad (2-7)$$

พื้นที่รับแรงดันภายในท่อ



รูปที่ 3.7 แสดงพื้นที่รับแรงภายในอุปกรณ์

$$A_p = (D_{ow} - (2 \times t_w)) \times L_w \quad (2-8)$$

#### 4. การดำเนินงาน

การสร้างโปรแกรมคำนวณความเค้น เพื่อหาขนาดอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันที่เหมาะสม สำหรับท่อรั่วขนาด 2, 4, 6 และ 8 นิ้ว ทำได้โดยการกำหนดขนาดของอุปกรณ์ตัวอย่าง และทำการปรับเปลี่ยนขนาดของแต่ละชิ้นส่วนซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กรณี จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความเค้นด้วยโปรแกรมคำนวณที่สร้างขึ้นจาก MS Excel 2016 พร้อมทั้งวิเคราะห์ค่าความเค้นด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดย SolidWorks Simulation 2016 และนำค่าที่ได้จากจากการทั้งสองมาเปรียบเทียบ เพื่อปรับปรุงโปรแกรมคำนวณให้สามารถใช้งานในกรณีอื่น ๆ และนำผลที่ได้ไปสร้างตารางการออกแบบ

#### 4.1 ตัวอย่างขนาดของอุปกรณ์เพื่อใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ค่าความเค้น

กรณีที่ 1 ขนาดต้นแบบ

ขนาดของท่อที่รั่ว NPS 8 และยาว 10

นิ้ว

ผนังท่อ NPS 10 และความหนา 40s

ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 1 นิ้ว

ความหนาของแผ่นปิด 1 นิ้ว

ขนาดของสลักเกลียว 5/8

จำนวนของสลักเกลียว 10 ตัว

กรณีที่ 2 เปลี่ยนความหนาของผนังท่อ 4 ขนาด

ขนาดของท่อที่รั่ว NPS8 และยาว 10

นิ้ว

ผนังท่อ NPS 10 และความหนา 5s,

10s, 40s และ 80s

ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 1 นิ้ว,  
ความหนาของแผ่นปิด 1 นิ้ว  
ขนาดของสลักเกลียว 5/8 นิ้ว  
จำนวนของสลักเกลียว 10 ตัว

กรณีที่ 3 เปลี่ยนความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 3  
ขนาด

ขนาดของท่อที่รั่ว NPS8 และยาว 10  
นิ้ว  
ผนังท่อ NPS 10 และความหนา 40s  
ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 0.5, 1.0  
และ 1.5 นิ้ว

ความหนาของแผ่นปิด 1 นิ้ว  
ขนาดของสลักเกลียว 5/8 นิ้ว  
จำนวนของสลักเกลียว 10 ตัว

กรณีที่ 4 เปลี่ยนขนาดของสลักเกลียว 3 ขนาด  
และ 4 จำนวน

ขนาดของท่อที่รั่ว NPS8 และยาว 10  
นิ้ว

ผนังท่อ NPS 10 และความหนา 40s  
ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 1 นิ้ว  
ความหนาของแผ่นปิด 1 นิ้ว

ขนาดของสลักเกลียว 5/8, 3/4 และ  
7/8 นิ้ว แต่ละขนาดมีจำนวน 4, 6, 8 และ 10  
ตัว

#### 4.2 การสร้างโปรแกรมคำนวณหาค่าความเค้น ของอุปกรณ์

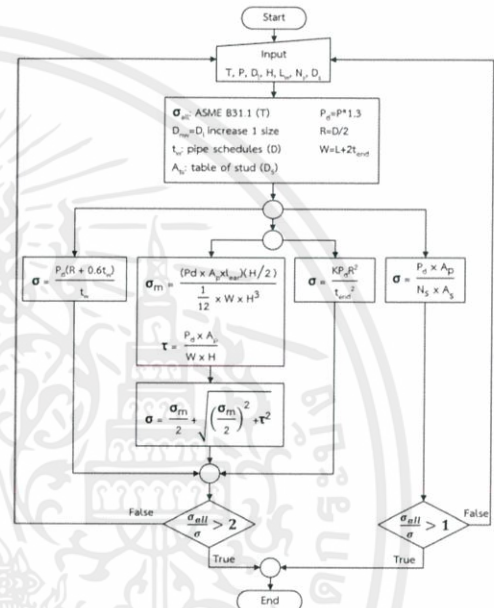
การเขียนโปรแกรมคำนวณความเค้นที่

เกิดขึ้นบนแต่ละชิ้นส่วนของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้น สามารถทำได้โดยนำสมการจากบทที่ 2  
ป้อนเข้าโปรแกรม MS Excel 2016

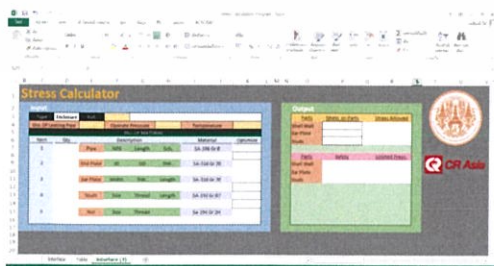
#### 4.2.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรมคำนวณ (Flow Chart)



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม MS  
Excel 2016

#### 4.2.2 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมคำนวณ

1. พิมพ์คำบรรยายตัวแปรที่ต้องการ  
ป้อนข้อมูล (Input) และคำบรรยายค่าผลลัพธ์ที่  
ต้องการ (Output) รวมทั้งคำบรรยายตัวแปรที่  
เกี่ยวข้องลงในโปรแกรม MS Excel 2016



รูปที่ 4.2 การพิมพ์คำบรรยายตัวแปรต่าง ๆ ลง  
ในโปรแกรม

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. ป้อนสมการ (2-1), (2-2), (2-3), (2-4), (2-5), (2-6), (2-7) และ (2-8) ลงในโปรแกรม MS Excel 2016 โดยกำหนดให้ผนังท่อและแผ่นยึดด้านข้างมีค่าความปลอดภัย 2 และสลักเกลียวมีค่าความปลอดภัย 1



รูปที่ 4.3 การพิมพ์ค่าบรรยายตัวแปร ลงในโปรแกรม

#### 4.2.3 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมการคำนวณ

เริ่มจากการป้อนค่าความดันทำงาน 385 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิทำงาน 500 องศาฟาเรนไฮต์และท่อรั้วขนาด 8 นิ้ว จากนั้นกำหนดค่าความยาวของอุปกรณ์ที่ 10 นิ้ว เลือกความหนาของผนังท่อแบบ 40s ความหนาของแผ่นยึดด้านข้าง 1.0 นิ้ว สลักเกลียวขนาด 5/8 นิ้ว จำนวน 10 ตัว ดังรูปที่ 3.5

| Input            |           |   |          |          |                  |         |             |        |  |
|------------------|-----------|---|----------|----------|------------------|---------|-------------|--------|--|
| Type             | Enclosure | FoS                                     | 1        |          | Operate Pressure | 385 psi | Temperature | 500 °F |  |
| BILL OF MATERIAL |           |   |          |          |                  |         |             |        |  |
| Item             | Qty       | Description                             | Material | Optimize |                  |         |             |        |  |
| 1                | 1         | Pipe NPS Length Sch. SA-106 Gr B        |          |          |                  |         |             |        |  |
|                  |           | 10 8 40s                                |          | 10s      |                  |         |             |        |  |
| 2                | 2         | End Plate ID OD THK SA-516 Gr 70        |          |          |                  |         |             |        |  |
|                  |           | 8.625 10.75 1                           |          |          |                  |         |             |        |  |
| 3                | 4         | Ear Plate Width THK Length SA-516 Gr 70 |          |          |                  |         |             |        |  |
|                  |           | 10 2 1 10                               |          | 1.5      |                  |         |             |        |  |
| 4                | 10        | Studs Size Thread Length SA-193 Gr B7   |          |          |                  |         |             |        |  |
|                  |           | 5/8 11 5                                |          | 10       |                  |         |             |        |  |
| 5                | 20        | Nut Size Thread SA-194 Gr 2H            |          |          |                  |         |             |        |  |
|                  |           | 5/8 11                                  |          |          |                  |         |             |        |  |

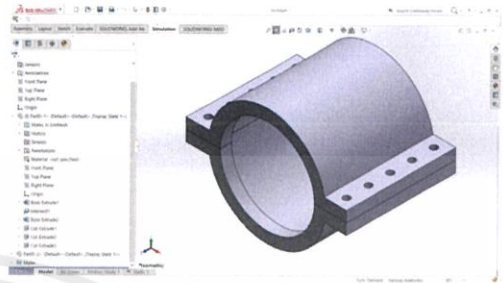
รูปที่ 4.4 หน้าต่างแสดงการป้อนข้อมูล

#### 4.3 การวิเคราะห์ความเค้นของอุปกรณ์โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1. การสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ 3 มิติ

โดยโปรแกรม SolidWorks Simulation2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



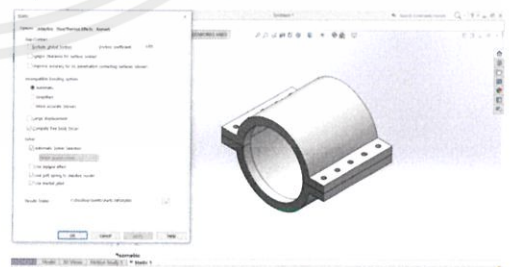
รูปที่ 4.5 แบบจำลองอุปกรณ์ 3 มิติ

2. การกำหนดคุณสมบัติโดยเลือกวัสดุ A106 Grade B ที่ได้ทำการเพิ่มเข้าไป



รูปที่ 4.6 กำหนดการตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้และเลือกชนิดของวัสดุ

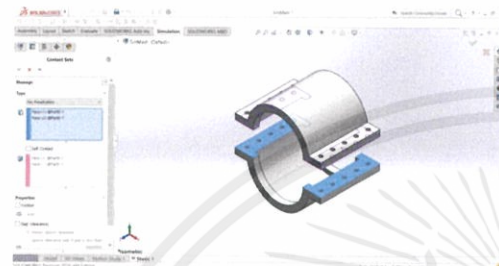
3. กำหนดการยึดจับ เลือกการยึดจับแบบยึดหยุ่น(Use soft spring to stabilize model) และ เลือกค่าชดเชยความเฉื่อย(Use inertial relief) เนื่องจากชิ้นงานได้รับแรงแบบสมมาตรและสามารถขยายตัวได้ทุกทิศทาง จึงไม่มีจุดจับยึดที่ตรึงไว้กับที่



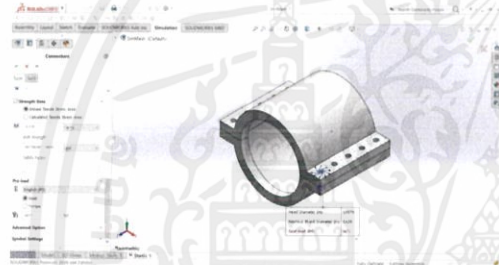
รูปที่ 4.7 กำหนดการตั้งค่าจุดจับยึด

4. การกำหนดจุดเชื่อมต่อ สำหรับการกำหนดผิวสัมผัสระหว่างอุปกรณ์ชิ้นบนและอุปกรณ์ชิ้นล่างเป็นแบบสัมผัสกัน (No

Penetration) และกำหนดการยึดจับด้วยสลักเกลียวโดยการกำหนดค่าความแข็งแรงของสลักเกลียว และค่าแรงขั้นต่ำเริ่มต้น



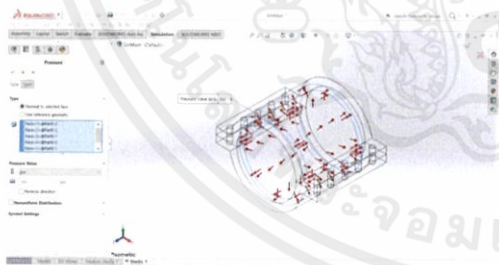
รูปที่ 4.8 กำหนดผิวสัมผัส เลือกแบบสัมผัสกัน



รูปที่ 4.9 กำหนดการยึดจับด้วยสลัก

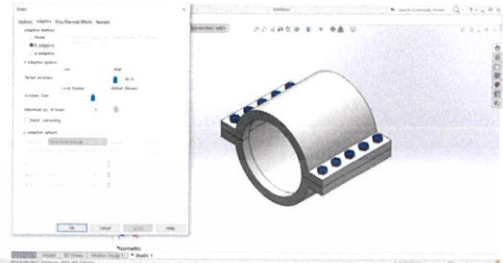
5. การกำหนดขนาดและทิศทางของแรง

ที่กระทำต่ออุปกรณ์

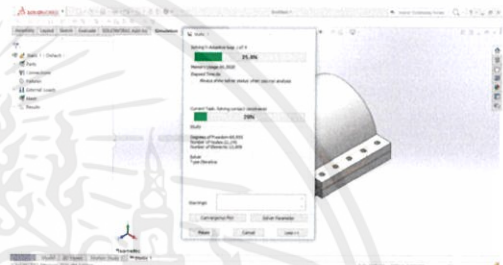


รูปที่ 4.10 กำหนดภาระภายนอกที่กระทำ

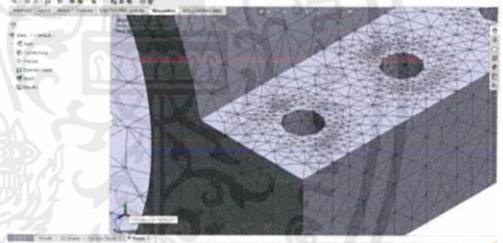
6. การแบ่งเอลิเมนต์ เลือกใช้วิธี h-adaptive เพื่อให้โปรแกรมปรับขนาดเอลิเมนต์ให้อัตโนมัติ ซึ่งโปรแกรมจะหยุดเมื่อค่าความผิดพลาดของพลังงานความเครียดครั้งก่อนหน้าและครั้งปัจจุบันไม่เกิน 2% ดังรูปที่ 4.11 และเมื่อโปรแกรมประมวลผลดังรูปที่ 4.12 จะได้ขนาดเอลิเมนต์ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.11 กำหนดการแบ่งเอลิเมนต์



รูปที่ 4.12 การประมวลผลของโปรแกรม



รูปที่ 4.13 แสดงเอลิเมนต์ของชิ้นงาน

5 ผลการดำเนินงาน

5.1 ผลจากโปรแกรมการคำนวณ

โปรแกรมจะแสดงขนาดต่างๆของแต่ละชิ้นส่วนดังรูปที่ 5.1 และแสดงค่าความปลอดภัยดังรูปที่ 5.2 จะได้ว่าของสลักเกลียวมีค่าความปลอดภัยน้อยกว่า 1

| CALCULATION             |            |                    |                 |        |          |         |
|-------------------------|------------|--------------------|-----------------|--------|----------|---------|
| DESIGN PRESS.           |            | 550.05             | DESIGN TEMP.    |        | 500      |         |
| CALCULATION OF STRESSES |            |                    |                 |        |          |         |
| PARTS                   | SHELL WALL | Pd                 | DESIGN PRESS.   | 551    | STRESS   | 7887.19 |
|                         |            | R                  | INNER RADIUS    | 5.01   |          |         |
|                         |            | ts                 | SHELL THICKNESS | 0.365  |          |         |
| EAR PLATE               | le         | EAR EXTENSION      | 1               | STRESS | 23195.51 |         |
|                         | M          | EAR MOMENT         | 23673.65        |        |          |         |
|                         | H          | THICKNESS OF EAR   | 1               |        |          |         |
|                         | W          | LENGTH OF EAR      | 10.00           |        |          |         |
|                         | C          | H/2                | 0.5             |        |          |         |
|                         | I          | MOMENT OF INERTIA  | 0.83            |        |          |         |
|                         | Om         | BENDING STRESS     | 14204.19        |        |          |         |
|                         | T          | SHEAR STRESS       | 2367.365        |        |          |         |
| STUDS                   | F          | Pd * Ap            | 47347           | STRESS | 23439.26 |         |
|                         | Ap         | PROJECTION AREA    | 86              |        |          |         |
|                         | Ns         | NUMBER OF STUDS    | 10              |        |          |         |
|                         | As         | AREA OF EACH STUDS | 0.202           |        |          |         |

รูปที่ 5.1 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้เชิงพาณิชย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 4/2559

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

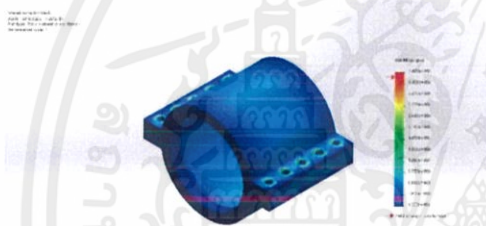
| Parts      | Stress on Parts | Stress Allowed |
|------------|-----------------|----------------|
| Shell Wall | 7887 psi        | 19000 psi      |
| Ear Plate  | 23196 psi       | 20600 psi      |
| Studs      | 23439 psi       | 25000 psi      |

| Parts      | Safety | Limited Press. |
|------------|--------|----------------|
| Shell Wall | 2.40   | 341.92         |
| Ear Plate  | 0.88   |                |
| Studs      | 1.06   |                |

รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่าความเค้นและ ค่า  
ความปลอดภัย (Factor of Safety)

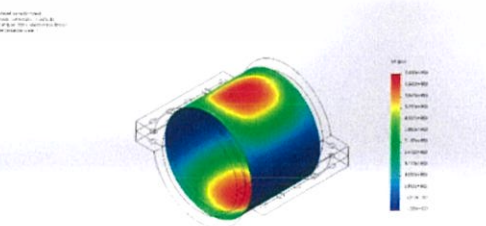
5.2 ผลจากจำลองแรงกระทำต่ออุปกรณ์



รูปที่ 5.3 ความเค้น (Von Mises Stress) บน  
อุปกรณ์



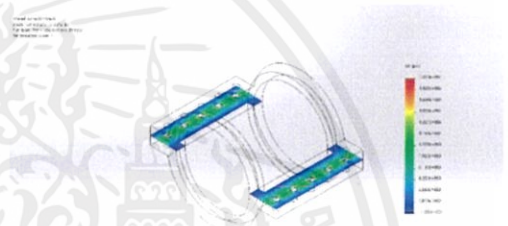
รูปที่ 5.4 ค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์ (FoS)



รูปที่ 5.5 ความเค้นปกติ (Normal Stress) บน  
ผนังท่อ



รูปที่ 5.6 แรงแนวแกน (Axial Force) บนสลัก  
เกลียว



รูปที่ 5.7 ความเค้นปกติ (Normal Stress) บน  
แผ่นยึดด้านข้าง



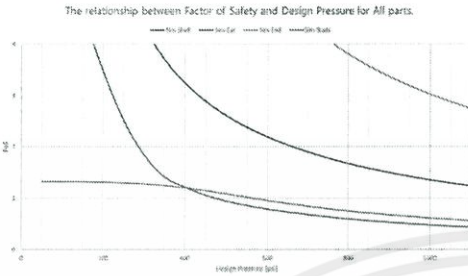
รูปที่ 5.8 ความเค้นปกติ (Normal Stress) บน  
แผ่นปิด

เมื่อความดันกระทำ 500 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว ค่าความปลอดภัยของผนังท่อ แผ่นยึด ด้านข้าง แผ่นปิด และสลักเกลียว คือ 2.0118, 1.3624, 5.04519 และ 0.9921 ตามลำดับ ดังรูป ที่ 5.9

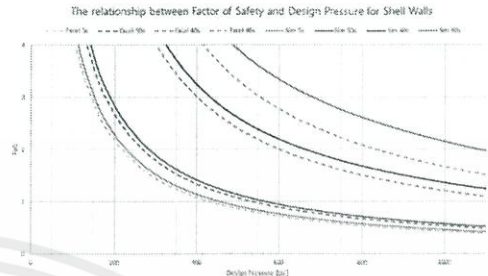
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 4/2559

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

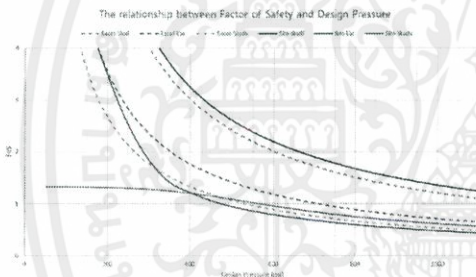


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัยแต่ละชิ้นส่วนของอุปกรณ์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

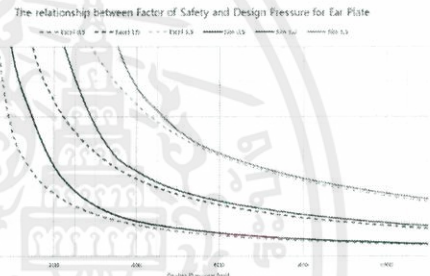


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัย สำหรับผนังท่อแต่ละความหนาด้วยทั้งสองวิธี

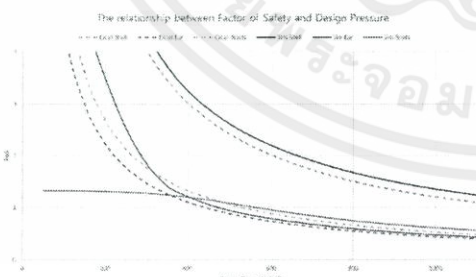
5.3 เปรียบเทียบผลจากโปรแกรมการคำนวณและผลจากจำลองแรงกระทำต่ออุปกรณ์



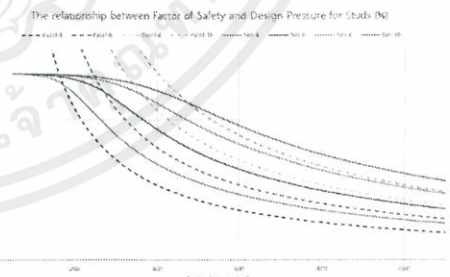
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัย สำหรับแต่ละชิ้นส่วนของอุปกรณ์ด้วยทั้งสองวิธีก่อนปรับปรุง



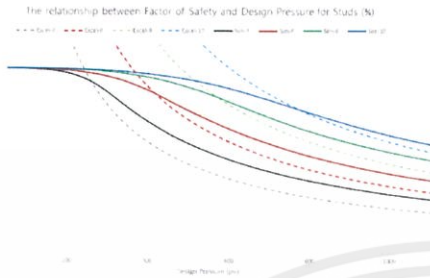
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัย สำหรับแผ่นยึดด้านข้างความหนา 0.5 นิ้ว 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้วด้วยทั้งสองวิธี



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัย สำหรับแต่ละชิ้นส่วนของอุปกรณ์ด้วยทั้งสองวิธีหลังปรับปรุง



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัย สำหรับสลักเกลียวขนาด 5/8 นิ้ว ด้วยทั้งสองวิธี



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัย สำหรับสลักเกลียวขนาด 3/4 นิ้ว ด้วยทั้งสองวิธี



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความปลอดภัย สำหรับสลักเกลียวขนาด 7/8 นิ้ว ด้วยทั้งสองวิธี

| NPS8 | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|      | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| 50   | 54          | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54   | 54   | 54   |
| 100  | 54          | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54   | 54   | 54   |
| 150  | 54          | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54  | 54   | 54   | 54   |
| 200  | 104         | 104 | 104 | 104 | 104 | 104 | 104 | 104 | 104 | 104 | 104 | 104 | 104 | 104  | 104  | 104  |
| 250  | 404         | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404  | 404  | 404  |
| 300  | 404         | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404  | 404  | 404  |
| 350  | 404         | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404  | 404  | 404  |
| 400  | 404         | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404  | 404  | 404  |
| 450  | 404         | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404  | 404  | 404  |
| 500  | 804         | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804  | 804  | 804  |
| 550  | 804         | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804  | 804  | 804  |
| 600  | 804         | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804  | 804  | 804  |
| 650  | 804         | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804 | 804  | 804  | 804  |
| 700  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 750  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 800  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 850  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

รูปที่ 5.17 ตารางสำหรับการเลือกความหนาท่อสำหรับท่อ NPS8 ความยาว 10 นิ้ว

| NPS8      | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|-----------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|           | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| Length 10 | 0.5         | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
| 50        | 1.8         | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8  | 1.8  | 1.8  |
| 100       | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
| 150       | 1.0         | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0  |
| 200       | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
| 250       | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
| 300       | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
| 350       | 1.5         | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5  | 1.5  | 1.5  |
| 400       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 450       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 500       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 550       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 600       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 650       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 700       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 750       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 800       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 850       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000      |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050      |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100      |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

รูปที่ 5.18 ตารางสำหรับการเลือกความหนาแผ่นยึดด้านข้าง สำหรับท่อ NPS8 ความยาว 10 นิ้ว

| NPS8 | Temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|      | 100         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 |
| 50   | 40%         | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40%  | 40%  | 40%  |
| 100  | 40%         | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40%  | 40%  | 40%  |
| 150  | 40%         | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40%  | 40%  | 40%  |
| 200  | 40%         | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40%  | 40%  | 40%  |
| 250  | 40%         | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40%  | 40%  | 40%  |
| 300  | 40%         | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40%  | 40%  | 40%  |
| 350  | 40%         | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40%  | 40%  | 40%  |
| 400  | 40%         | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40%  | 40%  | 40%  |
| 450  | 40%         | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40% | 40%  | 40%  | 40%  |
| 500  | 80%         | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80%  | 80%  | 80%  |
| 550  | 80%         | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80%  | 80%  | 80%  |
| 600  | 80%         | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80%  | 80%  | 80%  |
| 650  | 80%         | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80% | 80%  | 80%  | 80%  |
| 700  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 750  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 800  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 850  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 900  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 950  |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1000 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1050 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| 1100 |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |

รูปที่ 5.19 ตารางสำหรับการเลือกจำนวนสลักเกลียว สำหรับท่อ NPS8 ความยาว 10 นิ้ว

### 6. สรุปผลการดำเนินงาน

จากการวิเคราะห์ความเค้นของอุปกรณ์ปิดรอยรั่วต่อความดันโดยโปรแกรมคำนวณและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และยังมีลำดับการเสียหายของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเหมือนกัน คือ สลักเกลียวและแผ่นยึดด้านข้างเกิดความเค้นสูงมากและมีแนวโน้มที่จะเสียหายเป็นอันดับแรก รองลงมาคือผนังท่อ และส่วนที่มีแนวโน้มที่จะเสียหายน้อยสุดคือ แผ่นปิด ซึ่งที่ความหนาขนาด 1 นิ้ว เพียงพอต่อการออกแบบที่ความดันไม่เกิน 1100 psi และอุณหภูมิไม่เกิน 1100 องศา ฟาเรนไฮต์ ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงไม่นำมาพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์

ถึงแม้ว่าวิธีการทั้งสองจะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่ความเค้นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสูงกว่า อันเนื่องมาจาก

อุปกรณ์มีลักษณะเฉพาะทำให้เกิดอันตรกิริยา (Interaction) จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงโปรแกรมคำนวณเพื่อให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยมีตัวคุมปรับแก้สำหรับแผ่นยึดด้านข้าง 1.59 และ 1.78 สำหรับความหนา 1.0 นิ้ว และ 1.5 นิ้ว ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถใช้โปรแกรมคำนวณความเค้นเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมและมีความปลอดภัยต่อการใช้งานที่ความดันและขนาดต่าง ๆ ของท่อที่รั่ว ซึ่งทำให้ได้ตารางการออกแบบ

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Abdulaziz K. Al-Oriar. SPLIT SLEEVE CLAMP ASSEMBLY, US 7,617,843 B1, United States Patent, 2009.
- [2] Luke P. Djukic, Wei Siang Sum, K.H. Leong, Timothy W. Eccleshall and Alan Y.L. Leong. Development of a fibre reinforced polymer clamp for metallic pipeline repairs [online], 2015, available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306915000047> [2016, December 25]
- [3] Midwest Pipe Repair. On-Line Leak Repair 101 [Online], 2013, Available from: [http://www.midwestpipe-repair.com/Leak\\_Repair.html](http://www.midwestpipe-repair.com/Leak_Repair.html) [2016, November 02]
- [4] The Colt Group. New Pressure Seal Enclosures [Online], 2012, Available from: <http://www.youtube.com/watch?v=PynOAJ2pYsU> [2016, October 10].
- [5] Escoe, A.K. Piping and pipelines assessment guide. 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA: Elsevier Inc., 2006.
- [6] Colt services. Material Safety Data Sheet. LaPorte, Indiana, USA. 2006
- [7] ปราโมทย์ เตชะอำไพ, หน้า 7, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 4, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2550, อังโน ศุภวัฒน์ ฟุ้งเกียรติ ไพบูลย์, การออกแบบหาขนาดรูปร่างที่เหมาะสมของชิ้นส่วนแผ่นรับน้ำหนักเครื่องยนต์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ป ร ิ ญ ญา น ิ พ ญ ์ , ส ำ ข าว ิ ษ า วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [8] Dassault Systemes SolidWorks Corporation. SolidWorks Simulation 2014. 324/36 Bangna Residence, 3<sup>rd</sup> Floor, Room 307-309, Sanphawut Road, Bangna, Bangkok 10260, Thailand: DETI Co.Ltd.

- [9] รศ.ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี และ สถาพร ว่างฉาย. SolidWorks/COSMOSWorks ขั้นพื้นฐาน (วิเคราะห์ความแข็งแรง). 5-7, ซอย สุขุมวิท, แขวงคลองเตยเหนือ, เขตวัฒนา, กรุงเทพฯ, 10110:สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2549.
- [10] ASME Section VIII, Division 1, UG-27, Thickness of Shells under Internal Pressure. American Society of Mechanical Engineering.
- [11] Beer, F.P., Johnston E.R., Dewolf J.T., and Mazurek D.F. Mechanic of Materials Sixth Edition. 1221 Avenue of the Americas, New York, NY: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2012.
- [12] AVALLONE, E.A., BAUMEISTER, T.III, and SADEGH, A.M. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2007.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Mercury MENA. Oil & Gas [Online], 2014, Available from: <http://mercurymena.com/Projects/Oil%20Gas/Tobruk%20Oil%20Refinery.aspx> [2017, May 22]
- [2] James W. Wells and Loyd A. Watts. REPAIR DEVICE FOR PIPES. Patent Number 4111234, United States Patent, 1976.
- [3] George R. Guyatt and Gregory R. Markley. PIPE REPAIR ASSEMBLIES TO REPAIR PIPE WHEN FLUID THEREIN ARE UNDER HIGH PRESSURE. Patent Number 4 7 5 6 3 3 3 8, United States Patent, 1987.
- [4] Abdulaziz K. Al-Oriar. SPLIT SLEEVE CLAMP ASSEMBLY. Patent Number 7617843 B1, United States Patent, 2009.
- [5] Luke P. Djukic, Wei Siang Sum, K.H. Leong, Timothy W. Eccleshall and Alan Y.L. Leong. Development of a fiber reinforced polymer clamp for metallic pipeline repairs [online], 2015.
- [6] Midwest Pipe Repair. On-Line Leak Repair 101 [Online], 2013, Available from: [http://www.midwestpiperepair.com/Leak\\_Repair.html](http://www.midwestpiperepair.com/Leak_Repair.html) [2016, November 02]
- [7] AEA Technology Consulting. Temporary/permanent pipe repair – Guidelines. Norwich: Her Majesty’s Stationery Office, 2001.
- [8] The Colt Group. New Pressure Seal Enclosures [Online], 2012, Available from: <http://www.youtube.com/watch?v=PynOAJ2pYsU> [2016, October 10].
- [9] Escoe, A.K. Piping and pipelines assessment guide. 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA: Elsevier Inc., 2006.
- [10] Colt services. Material Safety Data Sheet. LaPorte, Indiana, USA. 2006
- [11] Kannappan, S. Pipe Stress Analysis. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [12] ASME Section VIII, Division 1, UG-27, Thickness of Shells under Internal Pressure. American Society of Mechanical Engineering.
- [13] Prof. SATISH C. SHARMA circumferential stress [Online], Available from: <http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IITROORKEE/strength%20of%20materials/homepage.htm> [2016, October 10]

- [14] Beer, F.P., Johnston E.R., Dewolf J.T., and Mazurek D.F. Mechanic of Materials Sixth Edition. 1221 Avenue of the Americas, New York, NY: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2012.
- [15] AVALLONE, E.A., BAUMEISTER, T.III, and SADEGH, A.M. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2007.
- [16] Laurence S. Smith, Jr. PIPE REPAIR CLAMP. Patent Number 6305719 B1, United States Patent, 2001.
- [17] Theeraporn Teja. การวิเคราะห์ผลลัพธ์ CAE เรื่อง Failure Criterion #1 [Online], 2016, Available from: <https://goo.gl/vid7g8S> [2016, December 31]
- [18] ภาณุฤทธิ์ ยุกตะทัด. การออกแบบเครื่องจักรกล 1. มินบุรี, กรุงเทพมหานคร: บริษัท สำนักพิมพ์ ท้อป จำกัด, 2552
- [19] รศ.ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี และ สถาพร วังฉาย. SolidWorks/COSMOSWorks ขั้นพื้นฐาน (วิเคราะห์ความแข็งแรง). 5-7, ซอยสุขุมวิท, แขวงคลองเตยเหนือ, เขตวัฒนา, กรุงเทพฯ, 10110:สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2549.
- [20] Kannappan, S. Introduction to Pipe Stress Analysis. United States of America: John Wiley & Sons. 1986.
- [21] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, หน้า 7, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 4, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2550, อ้างใน ศุภวัฒน์ ฟุ้งเกียรติไพบูลย์, การออกแบบหาขนาดรูปร่างที่เหมาะสมของชิ้นส่วนแผ่นรับน้ำหนักเครื่องยนต์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ปริญญาทิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [22] Dassault Systems SolidWorks Corporation. SolidWorks Simulation 2014. 324/36 Bangna Residence, 3<sup>rd</sup> Floor, Room 307-309, Sanphawut Road, Bangna, Bangkok 10260, Thailand: DETI Co.Ltd.
- [23] ASME B31.3, Basic Allowable Stresses in Tension for Metals (Cont'd). American Society of Mechanical Engineering.
- [24] ASME B31.3, Design Stress Values for Bolting Materials. American Society of Mechanical Engineering.
- [25] Van Leeuwen Buizen. Pipe components Edition September 2002. Foxit Software Company, 2008.

- [26] Budynas, R.G., and Nisbett, J.K. Shigley's Mechanical Engineering Design Ninth Edition. 1221 Avenue of the Americas, New York, NY: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้