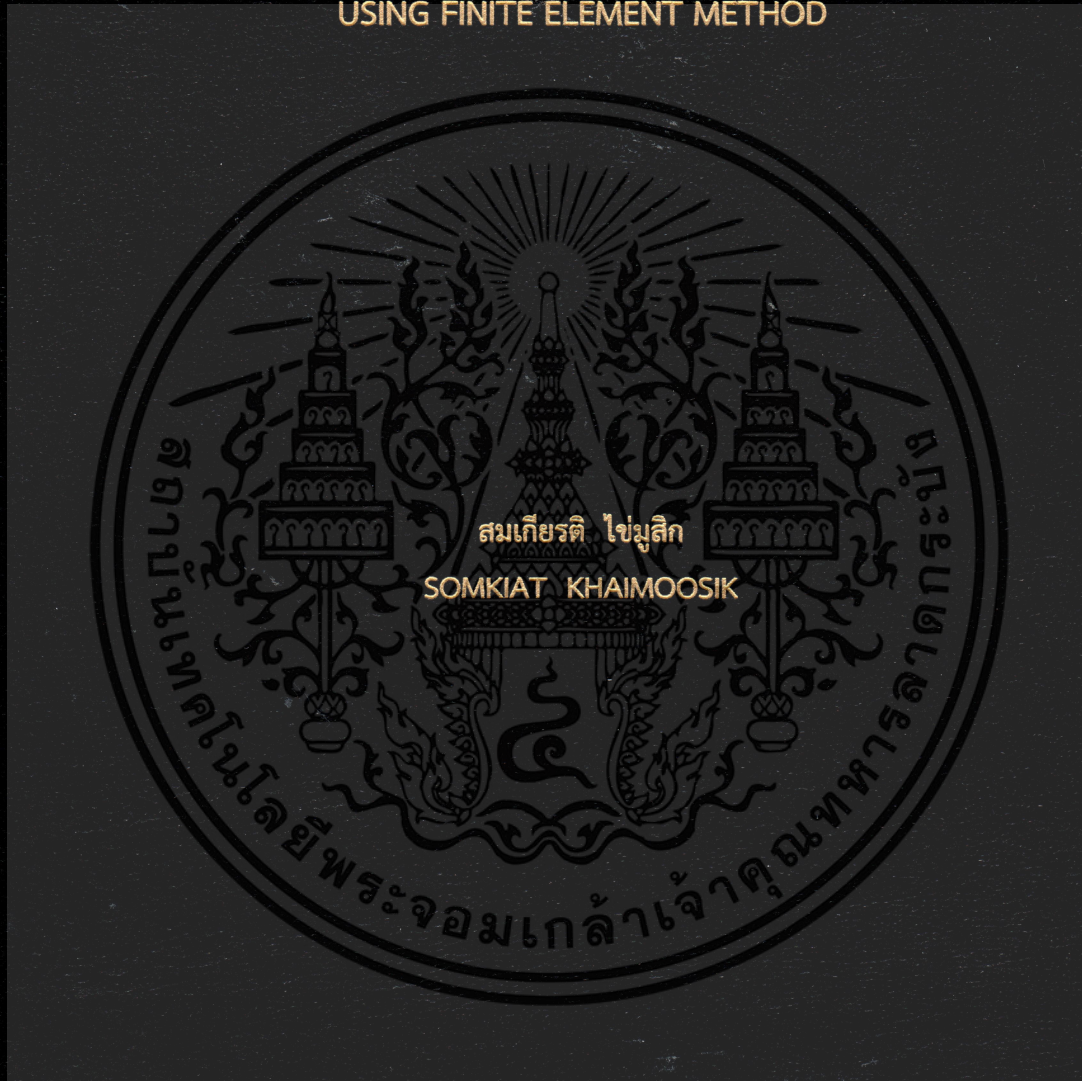


การวิเคราะห์หาค่าความเค้นดัดของแอ็กซ์แพนชันลูปในระบบท่อร้อน
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

BENDING STRESS ANALYSIS OF EXPANSION LOOP IN THERMAL PIPE
USING FINITE ELEMENT METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-030-092

การวิเคราะห์หาค่าความเค้นดัดของแอ็กซ์แพนชันลูปในระบบท่อร้อน
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

BENDING STRESS ANALYSIS OF EXPANSION LOOP IN THERMAL PIPE
USING FINITE ELEMENT METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-M-030-092

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BENDING STRESS ANALYSIS OF EXPANSION LOOP IN THERMAL PIPE
USING FINITE ELEMENT METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL 2018-EN-M-030-092

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์หาค่าความเค้นดัดของแอ็กซ์แพนชั้นลูป ในระบบท่อร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
นักศึกษา	นายสมเกียรติ ไข่มุก
รหัสนักศึกษา	576101167
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. จำลอง ปราบแก้ว

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบท่อที่ใช้งานในสภาวะอุณหภูมิและความดันสูงอย่างเช่น ท่อไอน้ำในโรงงานผลิตไฟฟ้า ท่อจะขยายตัวเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงและจะหดตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง ถ้าปลายท่อถูกจับยึดทั้งสองข้าง การขยายตัวและการหดตัวอาจทำให้ระบบท่อพังเสียหายเนื่องจากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงเกินกว่าค่าความเค้นอนุญาตของวัสดุที่ใช้ทำท่อได้ ซึ่งการแก้ปัญหาการขยายตัวของระบบท่อดังกล่าวสามารถใช้ข้อต่อแบบขยายตัว (Expansion joints) หรือการติดตั้งท่อโค้งได้แก่ ท่อรูปตัว L-shaped, รูปตัว Z-shaped และแอ็กซ์แพนชั้นลูป (Expansion Loops) เพื่อรองรับการขยายตัวและการหดตัวของท่อได้ การใช้แอ็กซ์แพนชั้นลูปราคาจะถูกกว่าการใช้ข้อต่อแบบขยายตัว การออกแบบหาขนาดของแอ็กซ์แพนชั้นลูปจะถูกกำหนดอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน ASME B31.1 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบท่อไอน้ำที่ใช้ในโรงงานผลิตไฟฟ้า ก่อนหน้านี้ได้มีผู้นำเสนอวิธีการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นในแอ็กซ์แพนชั้นลูปหลายวิธีอย่างเช่น วิธี Tube turns วิธี Grinnell และวิธี Kellogg และต่อมาได้มีผู้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาใช้ในการคำนวณหาขนาดของแอ็กซ์แพนชั้นลูปหลายรายอย่างเช่น โปรแกรม CAESAR II สำหรับบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าความเค้นและแรงที่เกิดจากการขยายตัวของท่อรูปแอ็กซ์แพนชั้นลูป (Expansion Loops) ด้วยวิธีของKellogg โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและขนาดความหนาของท่อ และคำนวณผลเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS WORKBENCH ผลที่ได้จากคำนวณกันสอดคล้องกันตามข้อกำหนด ASME B31.1 ที่ใช้การออกแบบระบบท่อ และนำผลลัพธ์ค่าความเค้นจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาสร้างเป็นฐานข้อมูลเป็นโปรแกรมการคำนวณแบบสเปรดชีต ซึ่งทำให้คำนวณแอ็กซ์แพนชั้นลูปได้รวดเร็วและสะดวกมากยิ่งขึ้น และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดท่อขนาดอื่นๆได้

Thesis Title	Bending Stress Analysis of Expansion Loop in Thermal Pipe Using Finite Element Method
Student	Mr. Somkiat Khaimoosik
Student ID.	576101167
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Chamlong Prabkeao

ABSTRACT

Designing of piping which they are operating in extreme high temperature and pressure condition such as steam pipes in power plants. Pipes can expand when temperatures have raised in high and will shrink when the temperature drops. If the pipe is clamped and fixed on either side. The expansion and contraction can cause pipeline damage due to the stresses exceed the allowable stress of the material used to make pipes. The solution to the expansion of the pipeline system can be used an Expansion joints or be installing a pipe L-shaped, Z-shaped and Expansion Loops to support the expansion and the shrinkage of the pipeline. By using the expansion loops are cost cheaper than using expansion joints. The designing of the expansion loop must be designed within provisions of the standard ASME B31.1, which is the standard used in the design of steam pipes in power plants. Previously, a presenter shows how to calculate the stresses in the expansion loops in several ways. Such as Tube turns method and Grinnell method, and Kellogg method. And later, computer developers have developed several programs which were used to calculate the size of expansion loops, such as CAESAR II. This article presents a method of how to calculate the stress and force reacting on the pipe with the method of calculation of Kellogg method by the study from the Expansion Loops from modifying the temperature and pipe size. As the results of the studied were used to compare with Finite Element by program ANSYS WORKBENCH, which results are consistent along together and the results of the finite element method are developed to Spreadsheet program, which faster and convenient to calculate the expansion loop and it can be used to develop other pipe sizes and other material.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว และอาจารย์ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำชี้แนะรวมถึงการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความรู้ในด้านต่าง ๆ และคำชี้แนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอบคุณ บริษัททีทีซีแอลจำกัดมหาชน ที่ให้การสนับสนุนงานข้อมูลสำหรับงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ซึ่งเป็นแรงใจและเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนทุกเรื่อง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สมเกียรติ ไชมุสิก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สัญลักษณ์ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 แอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop).....	1
1.2 แอ็กซ์แพนชันจอยท์ (Expansion Joint).....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีการคำนวณหาค่าความเค้นต่อร้อนรูปแอ็กซ์แพนชันลูปด้วยวิธีของ Kellogg.....	19
3.1 แนวคิดในการออกแบบระบบท่อ.....	19
3.2 มาตรฐานเกี่ยวกับการออกแบบระบบท่อ.....	20
3.3 ขนาดท่อ.....	21
3.4 หลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบท่อในการออกแบบระบบท่อ.....	23
3.5 การยืดหยุ่นของท่อ (Pipe Flexibility).....	24
3.4.1 การคำนวณค่าความยืดหยุ่นของท่อ (Pipe Flexibility Analysis Equations).....	24
3.6 สิ่งที่ต้องคำนึงถึงการออกแบบแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop).....	27
3.7 การคำนวณหาค่าความเค้นของแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop).....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.8 ขั้นตอนการคำนวณท่อร้อนแอกซ์แพนชันลูป (Expansion Loop).....	34
3.9 ตัวอย่างการคำนวณการคำนวณด้วยวิธี Kellogg	34
บทที่ 4 การคำนวณและผลการคำนวณหาขนาดแอกซ์แพนชันลูป ด้วย ANSYS Workbench.....	41
4.1 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	42
4.2 วิธีการคำนวณด้วย ANSYS Workbench.....	44
4.3 การทวนสอบโมเดลรูปแบบการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench.....	51
4.4 ผลลัพธ์จากการคำนวณจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench.....	53
บทที่ 5 ฐานข้อมูลแอกซ์แพนชันลูปด้วยโปรแกรม Excel.....	61
5.1 การคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys Workbench.....	62
5.2 แผนภูมิการทำงานฐานข้อมูล Excel	62
5.3 หลักการทำงานและวิธีการใช้เครื่องมือ Excel.....	64
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	75
ภาคผนวก ค.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อในระบบ DN และ NPS.....	22
3.2 ผลการคำนวณความยาว Loop ที่ต้องการจากวิธีของ Kellogg.....	37
3.3 ตารางค่าความเค้นดัด (Bending Stress) จากการคำนวณด้วยวิธี Kellogg.....	38
3.4 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณของค่าความเค้นดัด (Bending Stress).....	39
4.1 ผลลัพธ์จากโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิท่อ 150°F กรณี H=W.....	54
4.2 ผลลัพธ์จากโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิท่อ 300°F กรณี H=W.....	54
4.3 ผลลัพธ์จากโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิท่อ 450°F กรณี H=W.....	55
4.4 ผลลัพธ์จากโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิท่อ 150°F กรณี H=2W.....	57
4.5 ผลลัพธ์จากโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิท่อ 300°F กรณี H=2W.....	58
4.6 ผลลัพธ์จากโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิท่อ 450°F กรณี H=2W.....	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงระบบท่อที่พบได้ในอุตสาหกรรม.....	1
1.2 แสดงลักษณะของแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop).....	2
1.3 แสดงลักษณะของแอ็กซ์แพนชันจอยท์ (Expansion Joint).....	3
2.1 แสดงอ้างอิงทดสอบความล้าตามทฤษฎี Markl ของทดสอบท่อ 4” SCH 40 ทำจากวัสดุ SA 106 GR.B Class 600 Flanges โดยเชื่อมต่อท่อแบบสามทาง และพบว่าเกิดความเสียหายที่ต่ำกว่าหมื่นรอบของการโยกไป-กลับ.....	5
2.2 แสดงการทดสอบแบบ 2 มิติ ที่ทดสอบด้วยโปรแกรม ANSYS.....	5
2.3 กราฟแสดงการผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ B31 ได้จากการวิเคราะห์ด้วย CAESAR II และจากการวิเคราะห์ FEA โดยใช้ ANSYS.....	6
2.4 แสดงรูปแบบการคำนวณหาค่าตัวประกอบความยืดหยุ่น (Flexibility Factors) ในข้อโค้ง (Bend) ขนาด 72 นิ้ว ต่อกับท่อตรง (Trunnion) ขนาด 48 นิ้ว (ความยาวตรง = 2.5D) ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ABAQUS.....	7
2.5 แสดงรูปแบบการหาค่าความเค้นหนาแน่น (Stress Intensification Factors) ในข้อโค้ง (Bend) ขนาด 56 นิ้ว ต่อกับท่อตรง (Trunnion) ขนาด 48 นิ้ว ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ABAQUS.....	7
2.6 แสดงรูปทดสอบ 3 มิติแบบ Shell S4 หาค่าแรงที่จุดยึดด้วย ABAQUS.....	8
2.7 กราฟแสดงค่าแรงที่จุดยึด(Anchor) เทียบกับระยะห่างระหว่างจุดยึด(Anchor) แรงดันภายในท่อเท่ากับ 0 MPa และ 32 MPa.....	8
2.8 แสดงรูปทดสอบ 3 มิติแบบ ShellS4 หาค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Value of Huber-Mises stress) ที่เกิดขึ้นกันท่อ Expansion Loop ด้วย ABAQUS.....	9
2.9 กราฟแสดงหาความเค้นสูงสุด (Maximum Value of Huber-Mises stress) เทียบกับ ระยะห่างระหว่างจุดยึด(Anchor) แรงดันภายในท่อเท่ากับ 0 MPa และ 32 MPa.....	9
2.10 (a) แสดงลักษณะการเคลื่อนที่อิสระ ในระนาบ (b) แสดงลักษณะการเคลื่อนที่อิสระ นอกระนาบ.....	10
2.11 (a) แสดงลักษณะของเอลิเมนต์ที่ถูกพัฒนาจากโปรแกรม COSMOS (b) แสดงลักษณะของการขยายตัวที่อุณหภูมิ 200 °C และ 400 °C ด้วยโปรแกรม COSMOS.....	10
2.12 แสดงภาพตัดขวางของการขยายตัวของท่อตัดขวางที่มีการพัฒนาเชิงตัวเลข (Numerical) และ ด้วยโปรแกรม COSMOS.....	11

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.13 (a) แสดงลักษณะของแอ็กซ์แพนชันลูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งที่สอง (b) แสดงการกำหนดเอลิเมนต์ย่อย ๆ เท่ากับ 66 เอลิเมนต์ และแสดงขอบเขตเงื่อนไขการวิเคราะห์จากโปรแกรม COSMOS.....	9
2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ครั้งที่สองที่ได้จากการพัฒนาเชิงตัวเลข (Numerical) และ ด้วยโปรแกรม COSMOS โดย U คือการขยายตัวเป็นวง และ W คือการขยายตัวตามแนวระนาบ.....	12
2.15 (a) แสดงลักษณะของแอ็กซ์แพนชันลูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งที่สาม (b) แสดงการกำหนดเอลิเมนต์ย่อย ๆ เท่ากับ 66 เอลิเมนต์ และแสดงขอบเขตเงื่อนไขการวิเคราะห์จากโปรแกรม COSMOS.....	12
2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ครั้งที่สองที่ได้จากการพัฒนาเชิงตัวเลข (Numerical) และ ด้วยโปรแกรม COSMOS โดย U คือการขยายตัวเป็นวง และ W คือการขยายตัวตามแนวระนาบ.....	13
2.17 (a) แสดงลักษณะของแอ็กซ์แพนชันลูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งที่สี่ (b) แสดงการกำหนดเอลิเมนต์ย่อย ๆ เท่ากับ 66 เอลิเมนต์ และแสดงขอบเขตเงื่อนไขการวิเคราะห์จากโปรแกรม COSMOS.....	14
2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ครั้งที่สี่ที่ได้จากการพัฒนาเชิงตัวเลข (Numerical) และ ด้วยโปรแกรม COSMOS โดย U คือการขยายตัวตามแนววงกลม และ W คือการขยายตัวตามแนวระนาบ.....	14
2.19 แสดง Free Body Diagram ของแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่จุดจูดยึด(Anchor) จากการขยายตัวของแอ็กซ์แพนชันลูป.....	15
2.20 แสดงลักษณะของแอ็กซ์แพนชันลูป ที่ทำการทดลอง.....	15
2.21 แสดงกราฟผลการศึกษาทดลองคำนวณหาค่าแรงและค่าโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุดโดยที่ปรับเปลี่ยนระยะความยาวด้าน L2.....	16
2.22 แสดงกราฟผลการศึกษาทดลองคำนวณหาค่าแรงและค่าโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุดโดยที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิภายในท่อ.....	17
2.23 แสดงกราฟผลการศึกษาทดลองคำนวณหาค่าแรงและค่าโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุดโดยที่ปรับเปลี่ยนความหนาของท่อ.....	18
2.24 แสดงกราฟผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความยาวท่อและอุณหภูมิ ของท่อขนาด 8, 10, 12 และ 14 นิ้ว คือเมื่ออุณหภูมิภายในท่อเพิ่มขึ้น ท่อมีขนาดและความยาวท่อจะลดลง.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ  อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงองค์ประกอบแนวคิดในการออกแบบระบบท่อ.....	19
3.2 แสดงขั้นตอนในการออกแบบและการทดสอบค่าความเค้นของระบบท่อ.....	23
3.3 แสดงการขยายตัวทางความร้อนของท่อ.....	25
3.4 แสดงโมเมนต์ และโมเมนต์แรงบิด ที่เกิดขึ้นกับท่อโค้ง.....	26
3.5 แสดงแอกซ์แพนชั่นลูปแบบสมมาตร (symmetrical Loop).....	27
3.6 แสดงแอกซ์แพนชั่นลูปแบบไม่สมมาตร (Nonsymmetrical Loop).....	27
3.7 แสดงการเดินระบบท่อแอกซ์แพนชั่นลูป (Expansion Loop) บนชั้นวางท่อ (pipe rack).....	28
3.8 แสดงการขยายตัวท่อแอกซ์แพนชั่นลูป (Expansion Loop) ที่มีจุดยึด G_1 และ G_2	28
3.9 แสดงการระยะห่างท่อ Spacing บนชั้นวางท่อ (pipe rack).....	29
3.10 แสดงรูปแบบ Symmetrical loop ($H=W$).....	30
3.11 แสดง Free Body Diagram ของแอกซ์แพนชั่นลูป.....	30
3.12 Nomograph chart จากวิธีของ Kellogg.....	31
3.13 กราฟใช้สำหรับหาค่าคงที่ A_1 และ A_2 เพื่อหาค่าแรงด้วยวิธีของ Kellogg.....	32
3.14 กราฟใช้สำหรับหาค่าความเค้น Expansion Loop จากวิธีของ Kellogg.....	33
3.15 แสดงขนาด ของท่อ Expansion Loop Symmetrical shaped ในตัวอย่างการ คำนวณ.....	34
3.16 ตัวอย่างตารางการคำนวณโดยใช้ โปรแกรม Excel เป็นเครื่องมือ.....	35
3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวแอกซ์แพนชั่นลูป (L_2) กับขนาดท่อ	38
3.18 ความสัมพันธ์ของความเค้นดัด (Bending Stress) ที่เกิดจากการขยายตัว ของท่อร้อน กับ Moment Inertia จากวิธีของ Kellogg.....	39
3.19 ความสัมพันธ์ของความเค้นดัด (Bending Stress) ที่เกิดจากการขยายตัว ของท่อร้อน กับ Moment Inertia จากวิธีอื่นๆ หนังสือ Introduction to Pipe Stress Analysis [9] เทียบกับจากวิธีของ Kellogg.....	40
4.1 แสดงลักษณะการขยายตัวทางความร้อนท่อ.....	41
4.2 เอลิเมนต์เชิงเส้นตรงหนึ่งมิติ.....	42
4.3 เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมเชิงเส้นตรง.....	42
4.4 เอลิเมนต์ทรงเหลี่ยมสี่หน้าเชิงเส้นตรง.....	43
4.5 โปรแกรม ANSYS Workbench 16.0.....	44
4.6 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ANSYS Workbench.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของท่อเหล็ก คาร์บอน ในโปรแกรม ANSYS Workbench.....	46
4.9 แสดงการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench Version 16.0 แบบ Static Structural.....	47
4.10 แสดงตัวอย่างท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop- Symmetrical shaped สร้างแบบจำลอง (Creating Geometry) เป็น Line Body ในโปรแกรม ANSYS Workbench.....	47
4.11 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะของเอลิเมนต์เชิงเส้นตรงหนึ่งมิติ ในรูปแบบ Edge Sizing.....	48
4.12 แสดงตัวอย่างลักษณะของเอลิเมนต์แบบ Edge Sizing ของท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop- Symmetrical shaped ประกอบด้วย 9,241 จุดต่อ (Node) และ 4,620 เอลิเมนต์.....	48
4.13 แสดงตัวอย่างการกำหนดเงื่อนไข Input Controls ของท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop- Symmetrical shaped ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench.....	49
4.14 แสดงตัวอย่างการนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์ค่าแรงของท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop- Symmetrical shaped ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench.....	50
4.15 แสดงตัวอย่างการนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์ค่าความเค้นของท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop- Symmetrical shaped ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench.....	50
4.16 แสดงตัวอย่างการนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์ค่าแรงของท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop- Symmetrical shaped ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench.....	51
4.17 แสดงขนาด ของท่อ Expansion Loop Symmetrical shaped เพื่อการทดสอบผลคำนวณจาก ANSYS Workbench.....	51
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นของท่อ Expansion Loop Symmetrical shaped จากวิธี Kellogg เทียบกับโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิท่อ 450°F.....	52
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นของท่อ Expansion Loop Symmetrical shaped จากวิธีอื่นๆ เทียบกับโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิท่อ 450°F.....	52
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวแอ็กซ์แพนชั่นลูป (L2) กับขนาดท่อ.....	53
4.21 แสดงรูปแบบ Symmetrical loop (H=W).....	53
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวแกน (F_x) กับ moment inertia กรณี H=W.....	55
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดสูงสุดกับ moment inertia กรณี H=W.....	56
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะขยายตัวของท่อ (Deformation) กับ moment inertia กรณีH=W.....	56
4.25. แสดงรูปแบบ Symmetrical loop (H=2W).....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวแกน (Axial Reacting Force, F_x) กับ moment inertia กรณี $H=2W$	59
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดสูงสุด (Bending Stress) กับ moment inertia กรณี $H=2W$	59
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะขยายตัวของท่อ (Deformation) กับ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment inertia) กรณี $H=2W$	60
5.1 แผนผังการทำงานของฐานข้อมูลแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop).....	62
5.2 หน้าต่างเครื่องมือฐานโปรแกรม Excel ที่ใช้แสดงผลการคำนวณแอ็กซ์แพนชันลูป.....	63
5.3 ตัวอย่างการใช้เครื่องมือฐานข้อมูลบน Excel.....	65
ก.1 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012.....	70
ก.2 ตารางแสดงค่าความเค้นสูงสุด(Maximum Allowable Stress) ของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012.....	71
ก.3 ตารางแสดงค่าการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Data) ของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012.....	72
ก.4 ตารางแสดงค่าการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Data) ของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012 (ต่อ).....	73
ก.5 ตารางแสดงค่าการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Data, SI) ของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012.....	73
ก.6 ตารางแสดงค่าการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Data, SI) ของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012 (ต่อ).....	74
ก.7 ตารางแสดงค่าความยืดหยุ่นและความเค้นหนาแน่นของท่อ อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012.....	74
ข.1 แสดงหน้าต่าง LOOP FORCES AND STRESS TYPICAL DATA SHEET.....	76
ข.2 แสดงหน้าต่าง ตารางฐานข้อมูล.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ **xi** อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์ละคำย่อ

สัญลักษณ์

D_o	ความหนาภายนอกท่อ
E_h	โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุที่อุณหภูมิใช้งาน
F	แรงจุด Anchor
I	โมเมนต์เฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด
L_{A-A}	ความยาวท่อ Anchor- Anchor
L_{G-G}	ความยาวท่อ Guide - Guide
S_h	ค่าความเค้นอนุญาตที่อุณหภูมิที่ใช้ออกแบบท่อ
S_b	ความเค้นดัด (Bending Stress)
S_c	ความเค้นเค้นอนุญาตที่อุณหภูมิการติดตั้ง
S_E	ค่าความเค้นจากการขยายตัว
S_t	ความเค้นบิด (Torsion stress)
S_h	ความเค้นอนุญาตที่อุณหภูมิใช้งาน
T	อุณหภูมิใช้งาน
α	สัมประสิทธิ์การขยายความร้อนของท่อ
Δ	ระยะยึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบท่อเป็นระบบสำคัญในงานทางวิศวกรรมทุกชนิด และพบระบบท่อชนิดต่างๆ ในโรงงาน อุตสาหกรรม อาคาร เครื่องยนต์ เครื่องจักร รวมไปถึงในร่างกายของสิ่งมีชีวิต หน้าที่หลักของระบบท่อคือการส่งของเหลวจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ซึ่งในบางครั้งของเหลวอาจมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการขนส่ง เช่น การส่งพลังงานความร้อนผ่านทางน้ำ หรือ ไอน้ำ หรือ การส่งพลังงานกลผ่านทางอากาศอัด เป็นต้น ระบบท่อเป็นระบบที่มีมูลค่าประมาณ 7 - 8% ของมูลค่าการก่อสร้างโรงงานทั่วไป และอาจมีมูลค่ามากถึง 30% ในกรณีของเรือเดินสมุทรบางชนิด ระบบท่อมีผลอย่างมากต่อการใช้พลังงาน อาคารและโรงงานซึ่งจะเป็นค่าใช้จ่ายสะสมตลอดอายุการใช้งาน ดังนั้นการออกแบบระบบท่ออย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาที่ทำให้เกิดความเสียหายกับท่อได้จากหลายปัจจัย อาทิเช่น ปัญหาจากการสั่นของอุปกรณ์หรือเครื่องจักร ปัญหาจากลม และปัญหาจากการขยายตัวจากความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง เช่นท่อไอน้ำในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าหรือท่อที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจะทำให้ท่อขยายตัว ส่งผลให้แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับท่อมีค่าสูงขึ้นจนอาจเป็นสาเหตุทำให้ท่อเกิดความเสียหายได้ เช่น ท่อบิดโค้งงอ, ฉนวนหุ้มท่อฉีกขาดหรือจุดจับยึดท่อพังเสียหายซึ่งการแก้ไขปัญหาจากการขยายตัวของท่อด้วยการออกแบบให้ระบบท่อมีความยืดหยุ่นซึ่งมีหลักอยู่สองประการคือทำท่อโค้งรองรับการขยายตัวแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion loop) หรือติดตั้งข้อต่อแบบขยายตัวแอ็กซ์แพนชันจอยท์ (Expansion joint) หรือถ้าเป็นการวางท่อในแนวตั้งก็อาจติดตั้งสปริง (Spring support) รองรับการขยายตัวของท่อได้ การติดตั้งท่อโค้งรองรับการขยายตัวของท่อแอ็กซ์แพนชันลูปได้รับความนิยมในหมุ่่นักออกแบบเป็นอย่างมากเพราะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าการติดตั้งข้อต่อรองรับการขยายตัว การออกแบบท่อแอ็กซ์แพนชันลูปให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับการขยายตัวของท่อได้

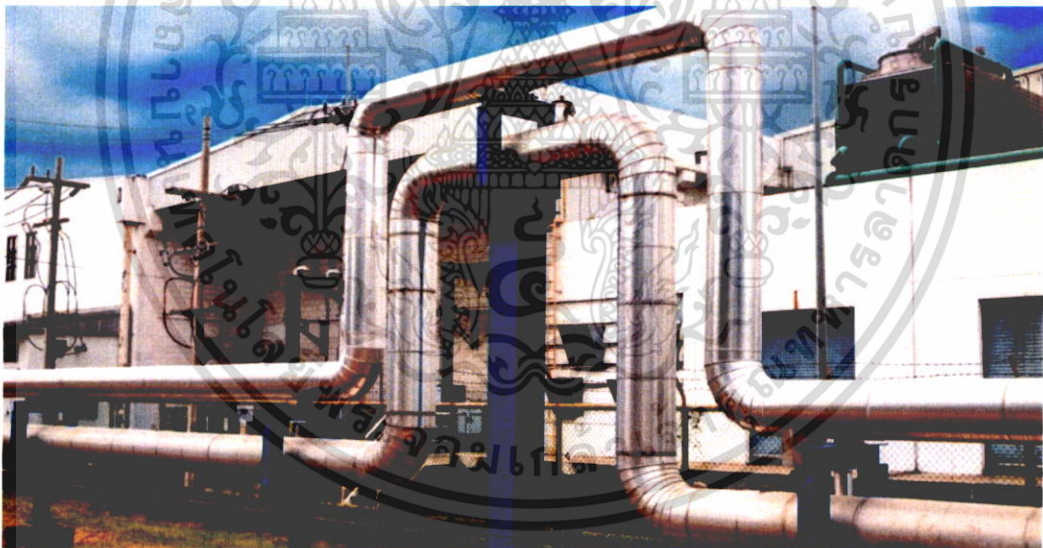


รูปที่ 1.1 แสดงระบบท่อที่พบได้ในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 แอ็กส์แพนชันลูป (Expansion Loop)

แอ็กส์แพนชันลูป (Expansion Loop) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยยืดหดตัวของท่อที่อยู่ในท่อเป็นของไหลที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิมากๆ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal Expansion) หรือการทรุดตัวของดินที่ฐานจุดยึดทำให้ท่อถูกดึงรั้งไปที่ละน้อยจนก่อให้เกิดความเสียหายแตกหัก จะเป็นการยากมากที่จะวิเคราะห์หาความแข็งแรงของท่อที่เหลืออยู่ ว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยหรือไม่ ดังนั้น แนวคิดเรื่องการติดตั้ง Expansion Loop จึงสามารถตอบโจทย์ปัญหานี้ได้ การออกแบบแอ็กส์แพนชันลูป เพื่อรองรับปัญหาเกิดยึดหดตัวของท่อจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการทรุดตัวของดิน โดยในการออกแบบจะใช้พื้นฐานการคำนวณการโก่งตัวของคาน และนำมาประยุกต์ เข้ากับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASME B31.1 และ ASME B31.3 นอกจากนี้ ในปัจจุบันในวิศวกรรมนิยมใช้ Expansion Loop ในการเดินท่อที่มีอุณหภูมิสูงๆและท่อระยะไกลมากขึ้น เพราะจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย รวมทั้งมีความแข็งแรงและอายุการใช้งานได้มากกว่าติดตั้ง Expansion Joint และมีการพัฒนา Software สำหรับการคำนวณ Pipe Stress Analysis โดยเฉพาะ ซึ่งทำให้การ ออกแบบ แอ็กส์แพนชันลูปมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น โดยแอ็กส์แพนชันลูปมีรูปร่างลักษณะหลายแบบ ตัวอย่างเช่น Three dimension Horizontal Loop และ Horizontal Loop เป็นต้น

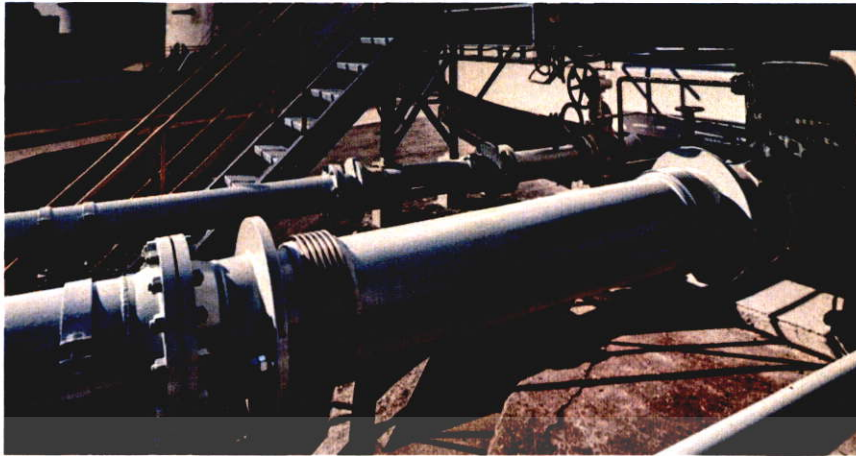


รูปที่ 1.2 แสดงลักษณะของแอ็กส์แพนชันลูป(Expansion Loop)

1.3 แอ็กส์แพนชันจอยท์ (Expansion Joint)

แอ็กส์แพนชันจอยท์ (Expansion Joint) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยยืดหดตัวและสามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับกับแอ็กส์แพนชันลูป (Expansion Loop) โดยทั่วไปไม่นิยมใช้ติดตั้งสำหรับเดินท่อระยะไกลเนื่องจากมีราคาแพง และไม่ทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ และระยะเวลานานได้ แต่ นิยมใช้สำหรับท่อระยะสั้น หรือจุดที่ยึดติดกับอุปกรณ์ เช่น ใช้ต่อระหว่างบีมกับท่อ เพื่อลดการสั่นสะเทือน และใช้ต่อท่อน้ำร้อนของเครื่องยนต์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะของแอ็กซ์แพนชั่นจอยท์ (Expansion Joint)

โดยทั่วไปจากปัญหาที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวของท่อร้อนทำให้วิศวกรผู้ออกแบบระบบท่อจะต้องคำนวณและออกแบบเลือกขนาดท่อเพื่อให้รองรับการขยายตัวและหดตัวของท่อให้ได้ และได้้นำการคำนวณตามวิธีอย่างง่ายเช่น ด้วยวิธีของ Tube turns, วิธี Grinnell, วิธี Kellogg และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CAESAR 2 มาใช้ในการคำนวณหาขนาดของแอ็กซ์แพนชั่นลูป (Expansion Loop)

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ได้แสดงวิธีการคำนวณของ Kellogg ที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดของแอ็กซ์แพนชั่นลูป และหาค่าความเค้นจากการขยายตัวของท่อร้อนในท่อแอ็กซ์แพนชั่นลูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและหาค่าความเค้นจากการขยายตัวของท่อร้อนแบบแอ็กซ์แพนชั่นลูปด้วยวิธีคำนวณของ Kellogg

1.4.1 หาค่าความเค้นจากการขยายตัวของท่อร้อนแบบแอ็กซ์แพนชั่นลูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.2 นำผลลัพธ์ค่าความเค้นจากการขยายตัวของท่อร้อนแบบแอ็กซ์แพนชั่นลูปจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาสร้างเป็นฐานข้อมูลในโปรแกรมสเปรดชีต (Microsoft Excel)

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 คำนวณหาค่าความเค้นจากการขยายตัวในท่อร้อนแบบแอ็กซ์แพนชั่นลูปของวิธี Kellogg

1.5.2 คำนวณท่อเหล็ก Carbon Steel ขนาด 6, 10, 14, 18 และ 24 นิ้ว

1.5.3 คำนวณท่อที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 70°F และอุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 300°F, 400°F และ 450°F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ศึกษาและรวบรวมทฤษฎีมาตรฐาน ASME B31.1, ASME B31.3 และทฤษฎีของ Kellogg ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการหาค่าความเค้นของท่อร้อนแอ็กซ์แพนชันรูป

1.6.2 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับท่อการหาค่าความเค้นของท่อร้อนแบบแอ็กซ์แพนชันรูป

1.6.3 คำนวณค่าความเค้นจากการขยายตัวของท่อร้อนแบบแอ็กซ์แพนชันรูป ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 สามารถนำผลการคำนวณความเค้นดัดสูงสุด (Max. Bending Stress) จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างเป็นฐานข้อมูลในโปรแกรมสเปรดชีต (Microsoft Excel) ไปใช้ในการออกแบบท่อร้อนรูปแอ็กซ์แพนชันรูปได้

1.7.2 สามารถนำไปใช้คำนวณการออกแบบระบบท่อร้อนให้มีความแข็งแรงที่เหมาะสมกับการใช้งานได้

1.7.3 สามารถนำผลลัพธ์จากคำนวณจากไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้ในการออกแบบแอ็กซ์แพนชันรูปเพื่อลดต้นทุนในการออกแบบระบบท่อร้อน

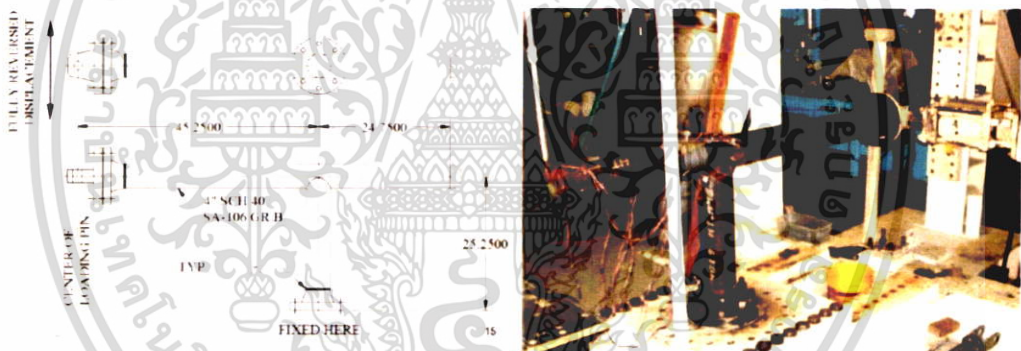
1.7.4 งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมได้

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

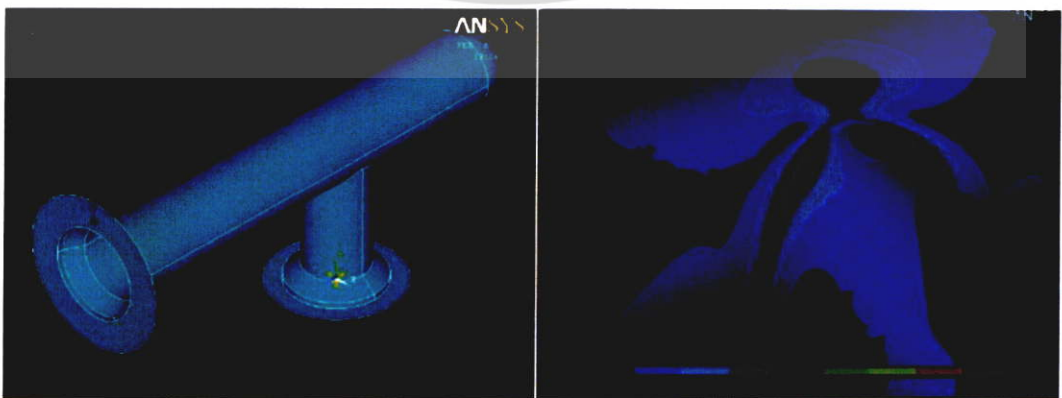
ได้มีผู้ศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดกับท่อเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานเกี่ยวกับงานออกแบบท่อร้อน ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีนักวิจัยหลายท่านพอสรุปได้ดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

Gaurav Bhende และ Girish-Tembhare [1] ในปี ค.ศ. 2013 ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการหาค่าความยืดหยุ่น, ค่าความเค้นหนาแน่นตามสมการที่ระบุไว้ใน ASME B31 และตั้งข้อสังเกตเกี่ยวกับสมการคำนวณหาค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นตาม ASME B31 โดยค่าความเค้นหนาแน่นข้อต่อรูปตัวทีทางทฤษฎีด้วยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CAESAR II และเปรียบเทียบจากการวิเคราะห์แบบจำลองเสมือนจริงโดยทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS

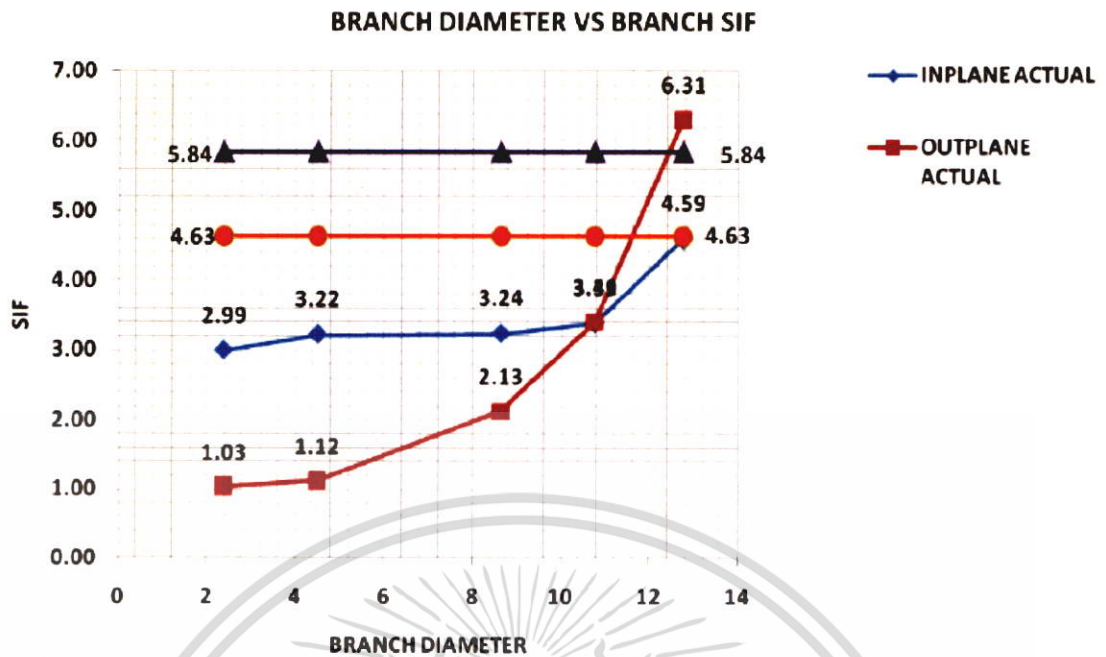


รูปที่ 2.1 แสดงอ้างอิงทดสอบความล้าตามทฤษฎี Markl ของทดสอบท่อ 4” SCH 40 ทำจากวัสดุ SA 106 GR.B Class 600 Flanges โดยเชื่อมต่อท่อแบบสามทาง และพบว่าเกิดความเสียหายที่ต่ำกว่าห้มนรอบของการโยกไป-กลับ [1]



รูปที่ 2.2 แสดงการทดสอบแบบ 2 มิติ ที่ทดสอบด้วยโปรแกรม ANSYS [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงการผลัฟท์ที่ได้จากสมการ B31 ได้จากการวิเคราะห์ด้วย CAESAR II และจากการวิเคราะห์ FEA โดยใช้ ANSYS [1]

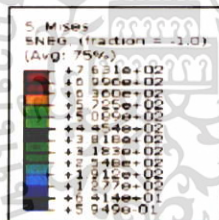
จากผลลัฟท์ที่ได้จากสมการ ASME B31 ได้จากการวิเคราะห์ด้วย CAESAR II และจากการวิเคราะห์ FEA โดยใช้ ANSYS ทั้งสองผลได้รับการวาดภาพกราฟในรูปที่ 2.3 ด้านบนจากทั้งสองวิธี สอดคล้อง และสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของท่อมีผลต่อค่าความยืดหยุ่น และค่าความเค้นหนาแน่นในท่อตามสมการ ASME B31

Daniel Anindya และ Daniel Long[2] ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์ขั้นพื้นฐานในการตรวจสอบค่าความเค้นหนาแน่น (Stress Intensification Factors) และค่าตัวประกอบความยืดหยุ่น (Flexibility Factors) ของข้อโค้ง (Bend) ท่อภายในและภายนอกที่จุดเชื่อมต่อกับท่อเป็นจุดยึด (Trunnion) เทียบกับข้อจำกัดของ ASME B31.3 โดยอธิบายเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นกับส่วนโค้งของท่อว่าสาเหตุเกิดจาก 2 ปัจจัย คือ การเพิ่มขึ้นของความเค้น (Increased Stress) และทำการศึกษาวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบของเซลล์เอลิเมนต์ (Shell Element) ด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยทำการตรวจสอบทดลองกับโค้งงอ ($R=1.5D$) ต่อท่อตรงมีขนาดเท่ากับ 1D, 2.5D, 6D, 10D ตามลำดับ (D หมายถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ) ข้อโค้งงอและท่อตรงทำจากวัสดุเดียวกันความหนาเท่ากัน ปลายด้านหนึ่งของโค้งทั้งถูกยึดและอีกด้านปล่อยอิสระ จากนั้นทดสอบโดยการสันแบบไคเนติก (Kinematic) จากผลการคำนวณพบว่า ค่าความเค้นหนาแน่น (Stress Intensification Factors) และค่าตัวประกอบความยืดหยุ่น (Flexibility Factors) ทั้งภายในและภายนอกของข้อโค้ง(Bend) จากไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าน้อยกว่าผลการคำนวณทางทฤษฎีของ ASME B31.3 มีค่าความแตกต่างประมาณ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการคำนวณหาค่าตัวประกอบความยืดหยุ่น (Flexibility Factors) ในข้อโค้ง (Bend) ขนาด 72 นิ้ว ต่อกับท่อตรง (Trunnion) ขนาด 48 นิ้ว (ความยาวตรง = 2.5D) ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ABAQUS [2]



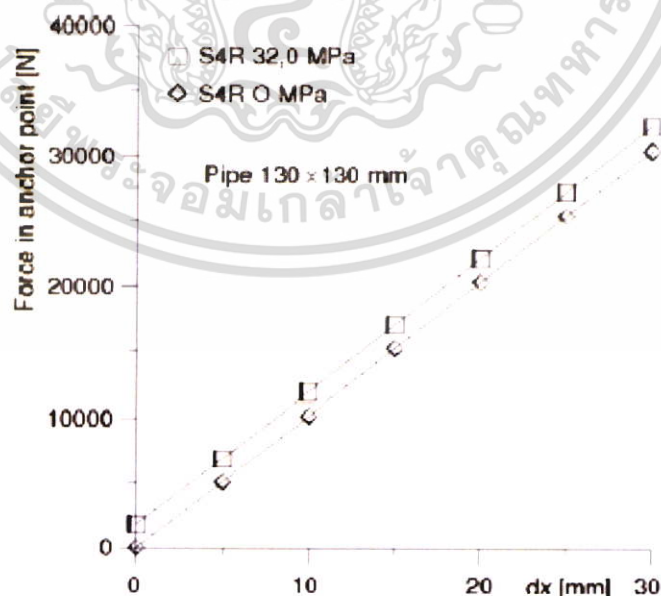
รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบการหาค่าความเค้นหนาแน่น (Stress Intensification Factors) ในข้อโค้ง (Bend) ขนาด 56 นิ้ว ต่อกับท่อตรง (Trunnion) ขนาด 48 นิ้ว ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ABAQUS [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Andrzej Banaszek, Radovan Petrovic และ Bartlomiej Zylinski. [3] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์แอกซ์แพนชันลูป ชนิด “U” เป็นท่อที่ใช้ในระบบไฮดรอลิกความดันสูงบนเรือบรรทุกสินค้า โดยวัสดุท่อทำจากเหล็กคาร์บอน 52.4 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (Nominal diameter) 110 มม. ความยาว 2550 มม. ความยาวท่อโค้ง (Bending Radius) 325 มม. แรงดันท่อสูงสุด 32 MPa โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ABAQUS Ver.6.7 การศึกษาทดลองมี 2 การทดลอง โดยการศึกษาดลองแรกหาค่า แรงที่เกิดขึ้นกับจุดยึด (Anchor Forces) ของ Expansion Loop โดยเทียบกับระยะของการขยายตัวของแอกซ์แพนชันลูป เท่ากับ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 มม. และทดลองที่แรงดันภายในท่อเท่ากับ 0 MPa และ 32 MPa พบว่าเมื่อระยะของการขยายตัวของแอกซ์แพนชันลูป เพิ่มขึ้น แรงที่กระทำกับจุดยึด (Anchor) เพิ่มขึ้นด้วย



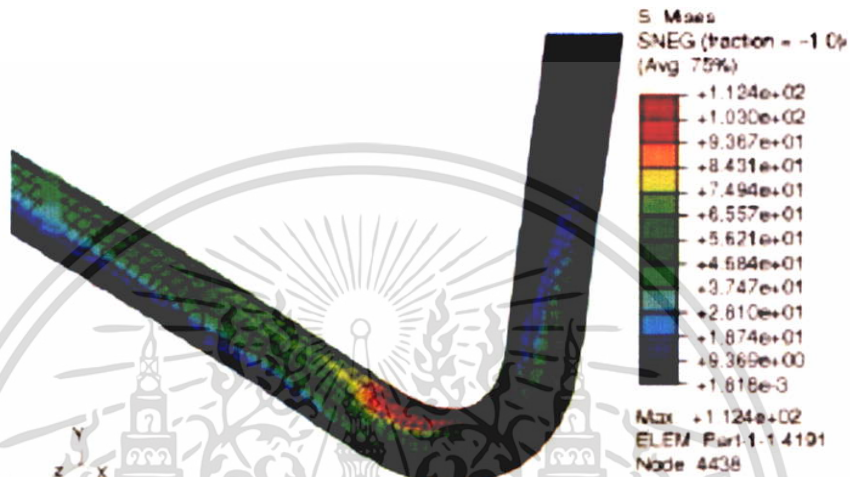
รูปที่ 2.6 แสดงรูปทดสอบ 3 มิติแบบ Shell S4 หาค่าแรงที่จุดยึดด้วย ABAQUS [3]



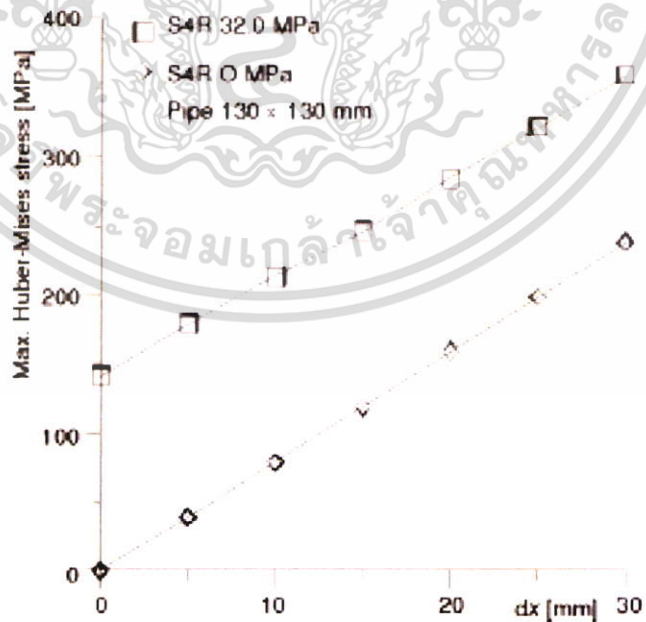
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่าแรงที่จุดยึด (Anchor) เทียบกับระยะห่างระหว่างจุดยึด (Anchor) แรงดันภายในท่อ เท่ากับ 0 MPa และ 32 MPa [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการศึกษาทดลองที่สองหาค่า ความเค้นสูงสุด (Maximum Value of Huber-Mises stress) ที่เกิดขึ้นกับท่อเอ็กซ์แพนชันลูป โดยเทียบกับระยะของการขยายตัวของเอ็กซ์แพนชันลูป เท่ากับ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 มม. และที่แรงดันภายในท่อเท่ากับ 0 MPa และ 32 MPa พบว่าจุดที่เกิดค่าความเค้นสูงสุดคือส่วนที่เป็นท่อโค้ง (Elbow 90) และเมื่อระยะของการขยายตัวของเอ็กซ์แพนชันลูปเพิ่มขึ้น ท่อจะมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นด้วย



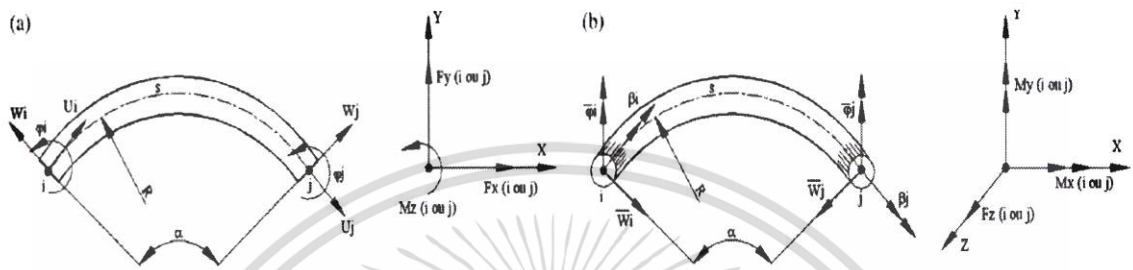
รูปที่ 2.8 แสดงรูปทดสอบ 3 มิติแบบ Shell S4 หาคความเค้นสูงสุด (Maximum Value of Huber-Mises stress) ที่เกิดขึ้นกับท่อเอ็กซ์แพนชันลูปด้วย ABAQUS [3]



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงหาคความเค้นสูงสุด (Maximum Value of Huber-Mises stress) เทียบกับระยะห่างระหว่างจุดยึด (Anchor) แรงดันภายในท่อเท่ากับ 0 MPa และ 32 MPa [3]

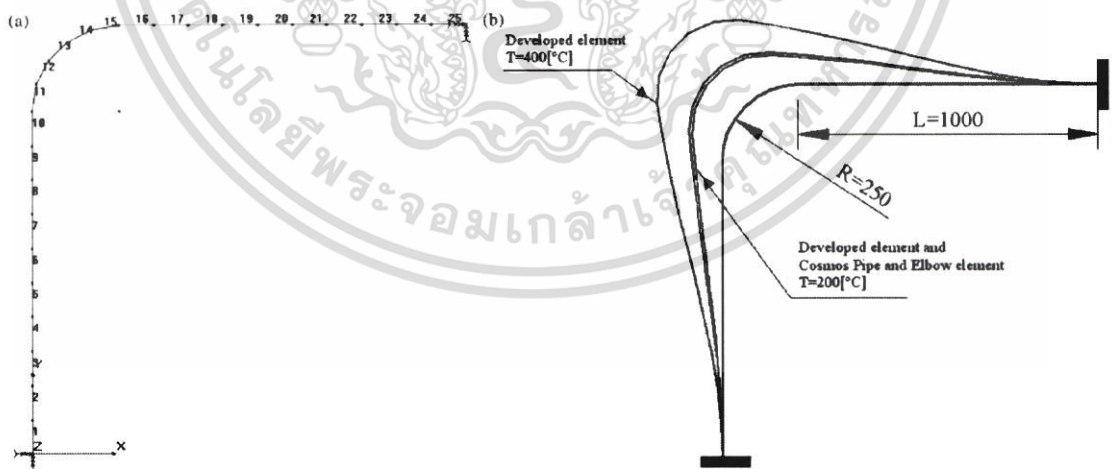
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E.M.M. Fonseca, F.J.M.Q. de Melo และ C.A.M. Oliveira. [4] ได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับพฤติกรรมทางความร้อนและทางกลของระบบท่อเหล็กโครงสร้าง โดยศึกษาการเปลี่ยนรูปและความเค้นจากปัญหาการขยายตัวจากความร้อนในด้านวิศวกรรม ได้นำเสนออัลกอริทึมของไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางความร้อนและทางกลของระบบท่อที่อุณหภูมิสูงและคำนวณผลลัพธ์เชิงตัวเลข (Numerical) เทียบกับการคำนวณด้วยโปรแกรมทางพานิชย์ชื่อว่า COSMOS โดยการวิเคราะห์มีทั้งหมด 4 กรณี



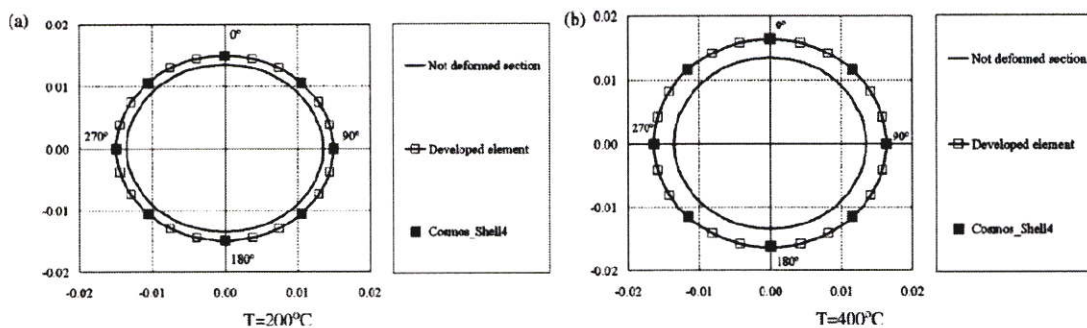
รูปที่ 2.10 (a) แสดงลักษณะการเคลื่อนที่อิสระ ในระนาบ (b) แสดงลักษณะการเคลื่อนที่อิสระ นอกระนาบ [4]

กรณีที่หนึ่ง วิเคราะห์ท่อเหล็กโค้งที่มีรัศมีความโค้งเท่ากับ 0.25 เมตร ค่ารัศมีเฉลี่ย 0.0135 เมตร และความหนา 0.001 เมตร ในรูปที่ 2.10a ระบบท่อ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเป็นค่าคงที่และเท่ากับ $14 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ และ $\nu = 0.3$ รูปที่ 2.10b แสดงให้เห็นการขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และในรูปที่ 2.11 แสดงภาพตัดที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิในท่อตรงที่ 200°C และ 400°C สามารถสังเกตได้ว่าส่วนตัดของท่อมีรัศมีเฉลี่ยขึ้นกับความร้อน การขยายตัว และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับโปรแกรม COSMOS



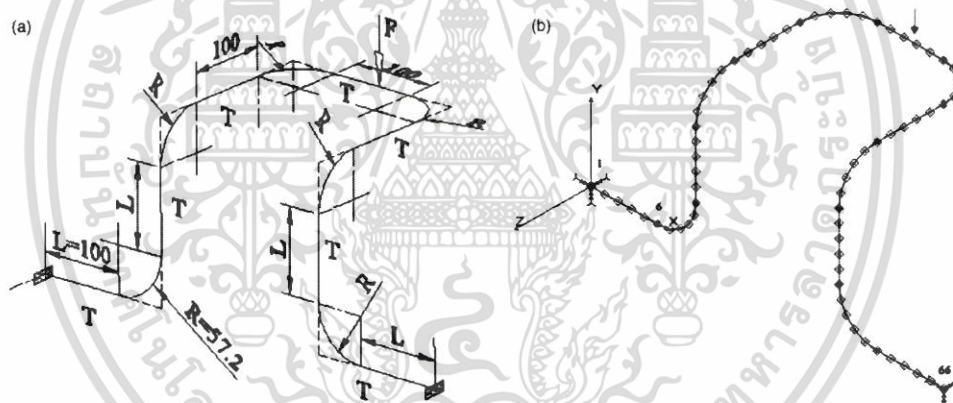
รูปที่ 2.11 (a) แสดงลักษณะของเอลิเมนต์ที่ถูกพัฒนาจากโปรแกรม COSMOS (b) แสดงลักษณะของการขยายตัวที่อุณหภูมิ 200°C และ 400°C ด้วยโปรแกรม COSMOS [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

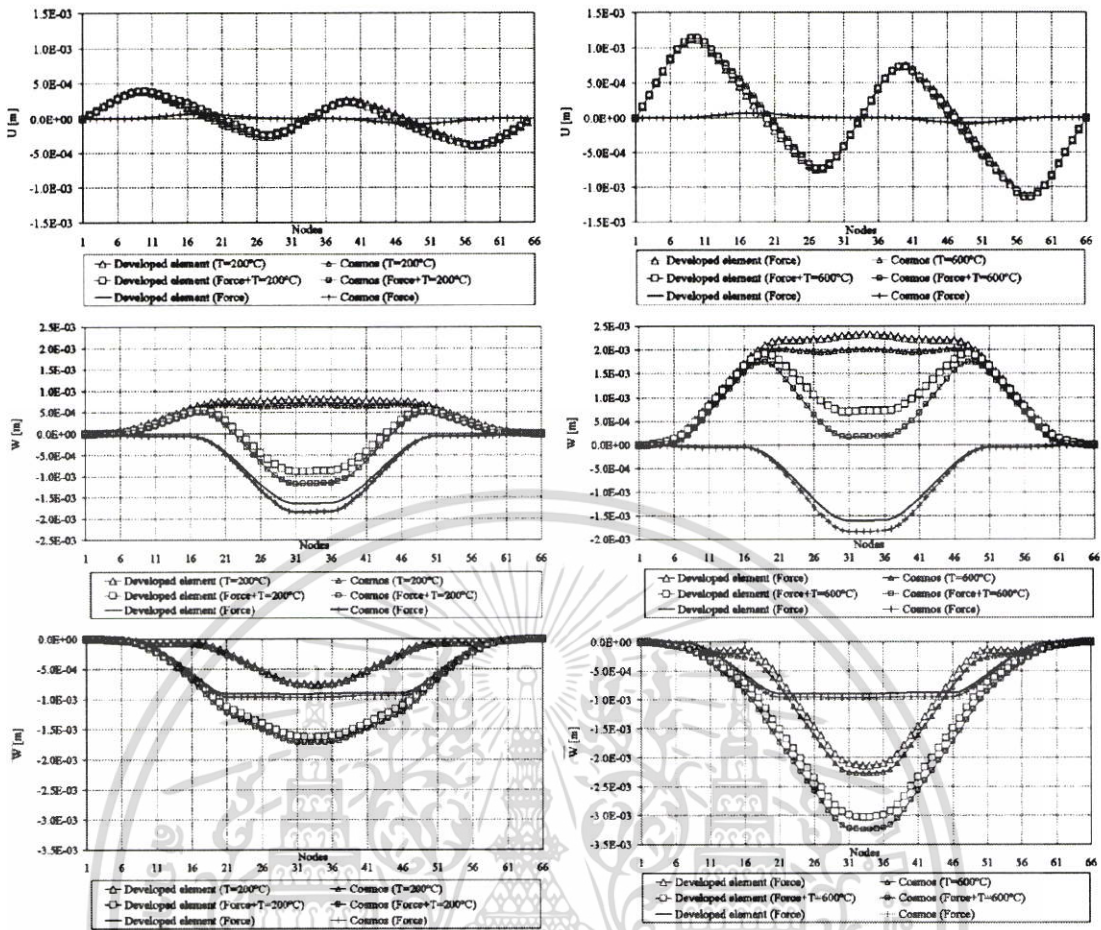


รูปที่ 2.12 แสดงภาพตัดขวางของการขยายตัวของท่อตัดขวางที่มีการพัฒนาเชิงตัวเลข (Numerical) และด้วยโปรแกรม COSMOS [4]

กรณีที่สอง วิเคราะห์เหล็กที่มีลักษณะเป็นแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) ภายใต้อุณหภูมิที่ 200°C และ 600°C และจุดปลายทั้ง 2 ด้านของท่อถูกยึด และเพิ่มแรง F เท่ากับ 3000 นิวตัน ในแนวตั้งที่ตรงกลางของแอ็กซ์แพนชันลูป ดังรูปที่ 2.12 a โดยท่อมีรัศมีเฉลี่ย 0.022 เมตร และความหนา 0.0025 เมตร สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเป็นค่าคงที่และเท่ากับ $14 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ และ $\nu = 0.3$

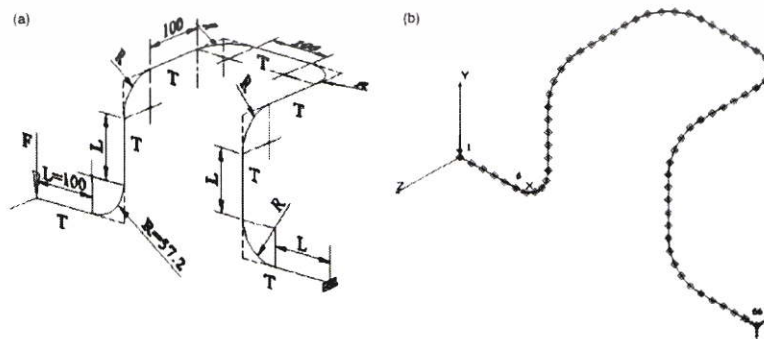


รูปที่ 2.13 (a) แสดงลักษณะของแอ็กซ์แพนชันลูป ที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งที่สอง (b) แสดงการกำหนดเอลิเมนต์ย่อย ๆ เท่ากับ 66 เอลิเมนต์ และแสดงขอบเขตเงื่อนไขการวิเคราะห์จากโปรแกรม COSMOS [4]



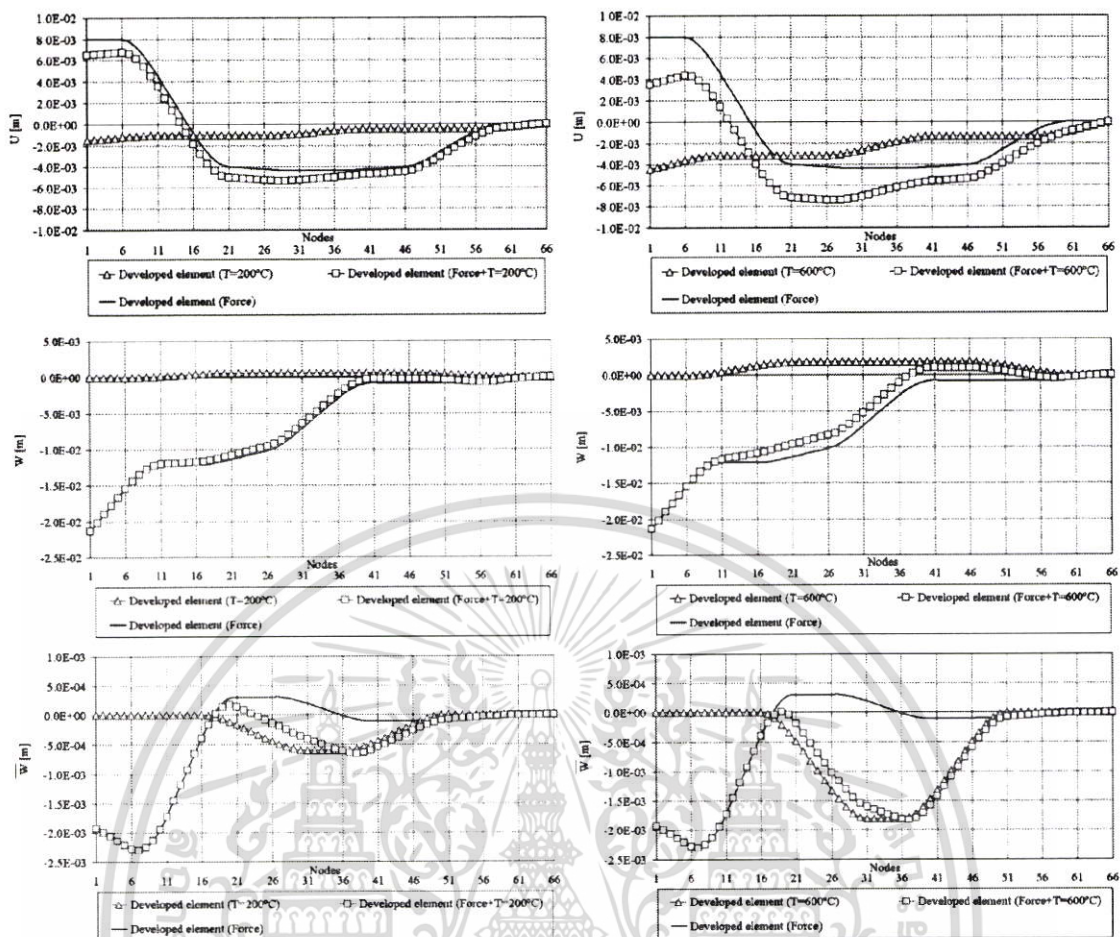
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ครั้งที่สองที่ได้จากการพัฒนาเชิงตัวเลข (Numerical) และ ด้วยโปรแกรม COSMOS โดย U คือการขยายตัวเป็นวง และ W คือการขยายตัวตามแนวระนาบ [4]

กรณีที่สาม วิเคราะห์ท่อเหล็กที่มีลักษณะเป็นแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) ภายใต้ข้อกำหนดเดียวกันกับครั้งที่สอง แต่แรง F เท่ากับ 3000 นิวตัน ในแนวตั้งที่ปลายด้านหนึ่งของแอ็กซ์แพนชันลูป และอีกด้านหนึ่งปล่อยอิสระดังรูปที่ 2.14 a



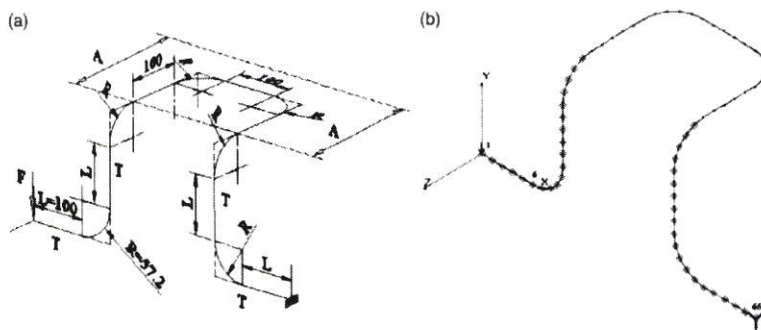
รูปที่ 2.15 (a) แสดงลักษณะของแอ็กซ์แพนชันลูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งที่สาม (b) แสดงการกำหนดเอลิ

เมนต์ย่อย ๆ เท่ากับ 66 เอลิเมนต์ และแสดงขอบเขตเงื่อนไขการวิเคราะห์จากโปรแกรม COSMOS [4] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



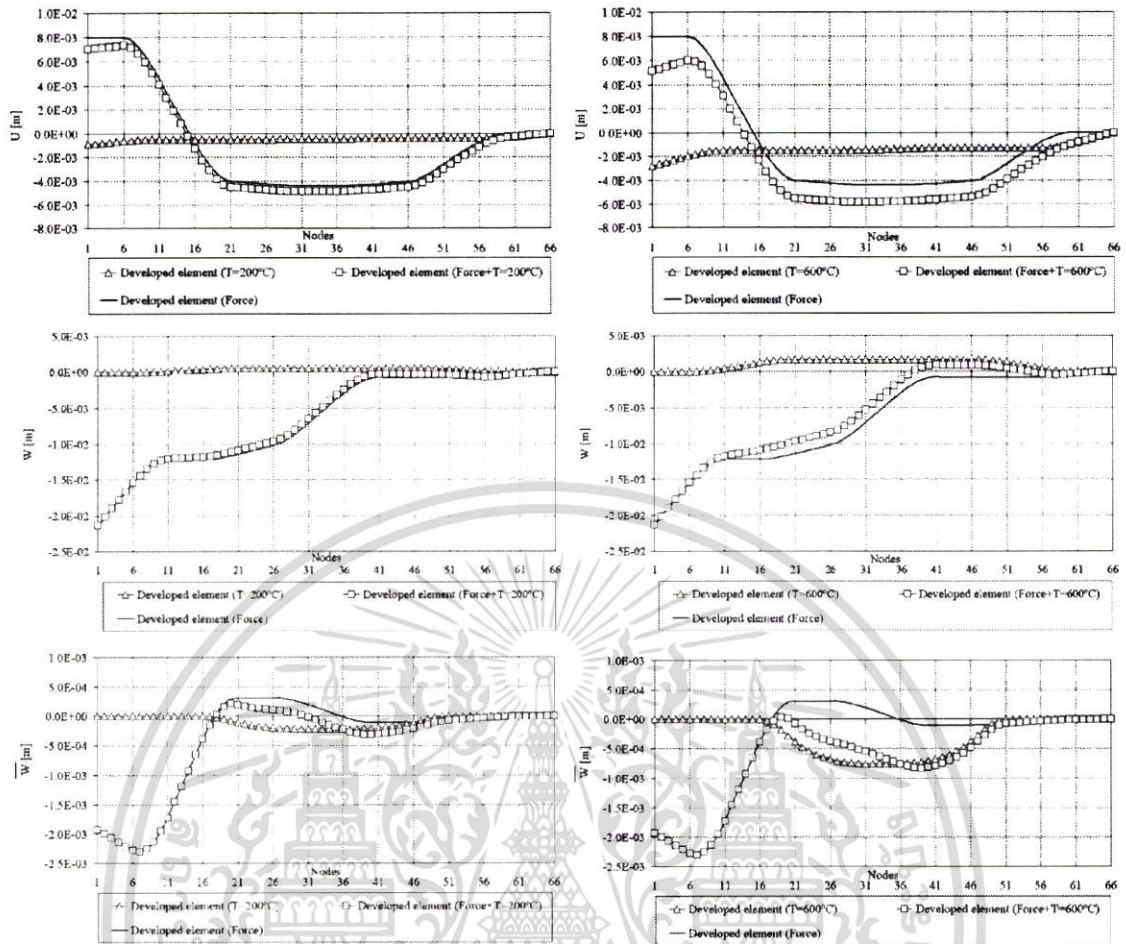
รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ครั้งที่สามที่ได้จากการพัฒนาเชิงตัวเลข (Numerical) และ ด้วยโปรแกรม COSMOS โดย U คือการขยายตัวเป็นวง และ W คือการขยายตัวตามแนวระนาบ [4]

กรณีนี้ที่ วิเคราะห์ท่อเหล็กที่มีลักษณะเป็นแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) ภายใต้ข้อกำหนดเดียวกันกับครั้งที่สาม และแรง F เท่ากับ 3000 นิวตัน ในแนวตั้งที่ปลายด้านหนึ่งของแอ็กซ์แพนชันลูป และอีกด้านหนึ่งปล่อยอิสระ แต่ท่อแอ็กซ์แพนชันลูป ด้านบนมีฉนวนกันความร้อน (AA) ดังรูปที่ 2.16a



รูปที่ 2.17 (a) แสดงลักษณะของแอ็กซ์แพนชันลูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งที่สี่ (b) แสดงการกำหนดเอลิเมนต์

ย่อย ๆ เท่ากับ 66 เอลิเมนต์ และแสดงขอบเขตเงื่อนไขการวิเคราะห์จากโปรแกรม COSMOS [4] เอกสารแนบของเอกสารนี้จะมีรายละเอียดการตั้งค่าโปรแกรม COSMOS ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งผู้เขียนขอสงวนสิทธิ์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

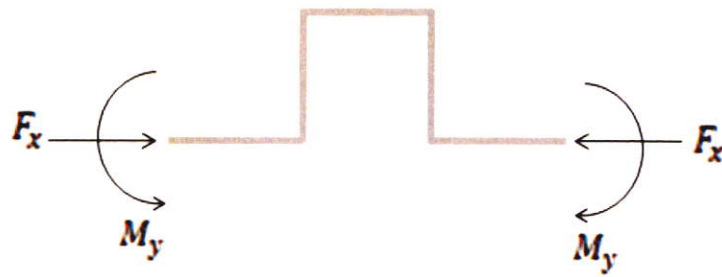


รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการผลัดทิศในการวิเคราะห์ครั้งที่สี่ที่ได้จากการพัฒนาเชิงตัวเลข (Numerical) และ ด้วยโปรแกรม COSMOS โดย U คือการขยายตัวตามแนววงกลม และ W คือการขยายตัวตามแนวระนาบ [4]

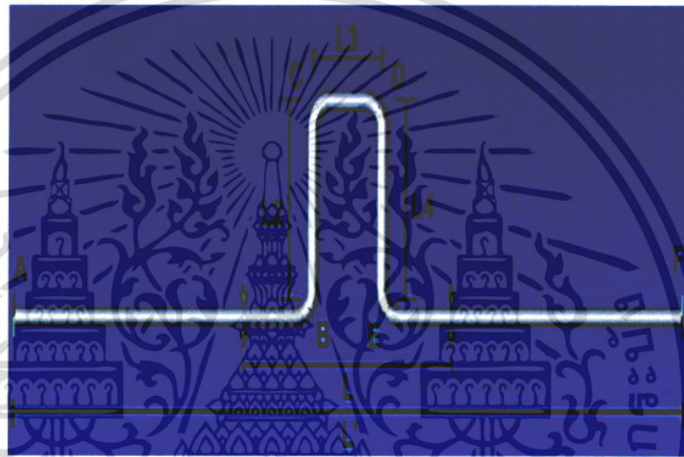
จากการวิเคราะห์ทั้ง 4 กรณีสรุปได้ว่า เมื่อท่อได้รับความร้อนอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะเกิดการขยายตัวและมีระยะขยายตัวเพิ่มขึ้น และ ถ้ามีแรงภายนอกกระทำกับท่อในแนวตั้งที่จุดใด จุดนั้นจะมีระยะการขยายตัวด้วย และการทำท่อลักษณะลูป (Loop) จะมีขยายตัวของท่อและป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับท่อได้ดี

João Pedro Amaral Vidigal da Silva.[5] ได้พัฒนาวิธีการคำนวณในการวิเคราะห์การขยายตัว Expansion Loop เพื่อคำนวณหาค่าแรงและค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับท่อแอกซ์แพนชั่นลูป โดยมีเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิภายในท่อ ระยะห่างระหว่างจุดยึด (Anchor) และขนาดความหนาของท่อ โดยทำการศึกษาทดลองคำนวณหาค่าทั้งหมด 3 การทดลอง จากโปรแกรม CAESAR II ตามหลักทฤษฎีของการออกแบบระบบท่อ ASME B31.1 และ ASME B31.3 เปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณการขยายตัวของความร้อนด้วยวิธีของ Spielvogel และ Grinnell ในการทดลองพบว่าจุดที่เกิดค่าความเค้นสูงสุดคือส่วนที่เป็นท่อโค้ง (Elbow 90) โดยมีรัศมีส่วนโค้งเท่ากับ ($R=3/2D$)

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันวิจัยพลังงานจันทบุรี และอนุญาตให้เผยแพร่เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดง Free Body Diagram ของแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่จุดจุดยึด(Anchor) จากการขยายตัวของแอกซ์แพนชั้นลูป [5]



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะของแอกซ์แพนชั้นลูปที่ทำการทดลอง [5]

การศึกษาทดลองครั้งหนึ่ง ศึกษาคำนวณหาค่าแรงและค่าโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุดโดยที่ปรับเปลี่ยนระยะความยาวด้าน L_2 กำหนดความสัมพันธ์ L_2 เท่ากับ L_4 และ $L_3 = (L_2)/2$ จากผลการศึกษาทดลองคำนวณพบว่า เมื่อความยาว L_2 เพิ่มขึ้น ค่าแรงและโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุด จะลดลงและผลของวิธี Spielvogel และวิธี Grinnell มีความคล้ายคลึงกันความแตกต่างประมาณ 1% สำหรับค่าแรงและค่าโมเมนต์ และแตกต่างประมาณ 2.2% สำหรับค่าความเค้นสูงสุด และผลของสองวิธีมากกว่าผลของซอฟต์แวร์ CAESAR II โดยมีค่าความแตกต่างประมาณ 38% สำหรับค่าแรง 23% สำหรับค่าโมเมนต์ และ 44% สำหรับค่าความเค้นสูงสุด

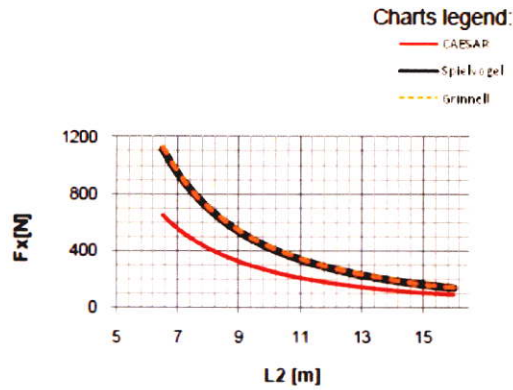


Fig.8 - Chart of F_x vs. L_2

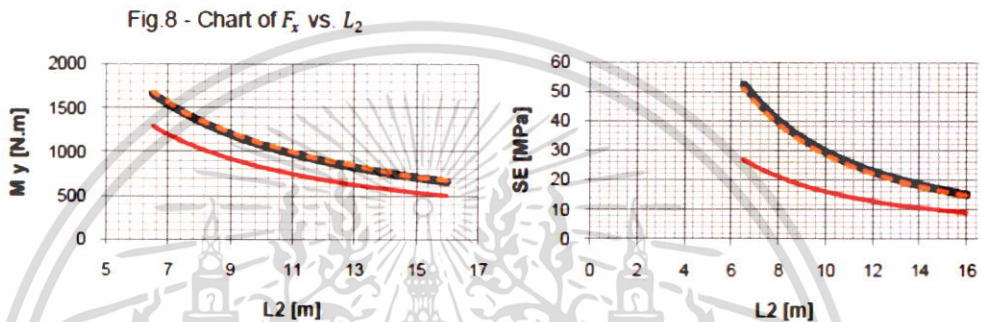
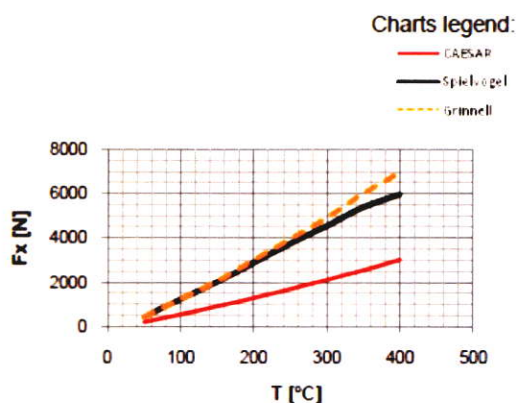
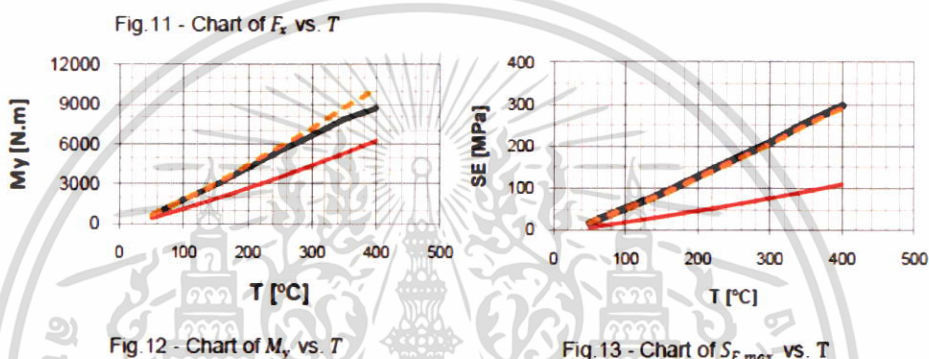


Fig.9 - Chart of M_y vs. L_2

Fig.10 - Chart of $S_{E,max}$ vs. L_2

รูปที่ 2.21 แสดงกราฟผลการศึกษาคำนวณหาค่าแรงและค่าโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุดโดยที่ปรับเปลี่ยนระยะความยาวด้าน L_2 [5]

การศึกษาคำนวณครั้งที่สอง คำนวณหาค่าแรงและค่าโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุดโดยที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และกำหนดความสัมพันธ์ L_2 เท่ากับ L_4 และ $L_3 = (L_2)/2$ จากผลการศึกษาคำนวณพบว่า เมื่ออุณหภูมิภายในท่อเพิ่มขึ้น ค่าแรงและโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุดจะเพิ่มขึ้นและผลของวิธี Spielvogel และวิธี Grinnell มีความคล้ายคลึงกันความแตกต่างประมาณ 1% แต่เพิ่มขึ้น 14% ที่อุณหภูมิ 400 องศา สำหรับค่าแรงและค่าโมเมนต์ และแตกต่างประมาณ 1.7% สำหรับค่าความเค้นสูงสุด และผลของสองวิธีมากกว่าผลของซอฟต์แวร์ CAESAR II โดยมีค่าความแตกต่างประมาณ 54% สำหรับค่าแรง 34% สำหรับค่าโมเมนต์ และ 63% สำหรับค่าความเค้นสูงสุด

Fig.11 - Chart of F_x vs. T 

รูปที่ 2.22 แสดงกราฟผลการศึกษาค้นหาค่าแรงและค่าโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุดโดยที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิภายในท่อ[5]

การศึกษาค้นหาค่าแรงและค่าโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุดโดยที่ปรับเปลี่ยนความหนาของท่อ และกำหนดความสัมพันธ์ L2 เท่ากับ L4 และ L3= (L2)/2 จากผลการศึกษาค้นหาพบว่า เมื่ออุณหภูมิของท่อ เพิ่มขึ้น ค่าแรงและโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) จะเพิ่มขึ้น แต่ค่าความเค้นสูงสุดจะลดลงและผลของวิธี Spielvogel, วิธี Grinnell และ CAESAR II จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาท่อเพิ่มขึ้นสำหรับค่าแรงลดลงจาก 54% เป็น 13% สำหรับค่าโมเมนต์ลดลงจาก 38% เป็น 5.6% และสำหรับค่าความเค้นสูงสุดลดลงจาก 66% เป็น 27%

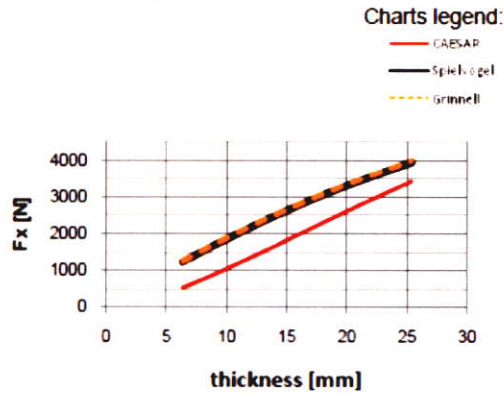


Fig.14 - Chart of F_x vs. thickness

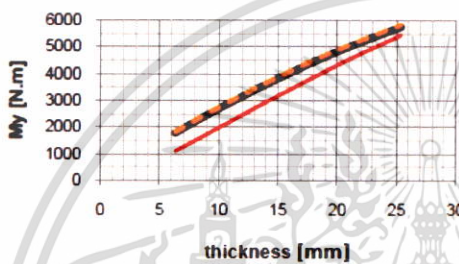


Fig.15 - Chart of M_y vs. thickness

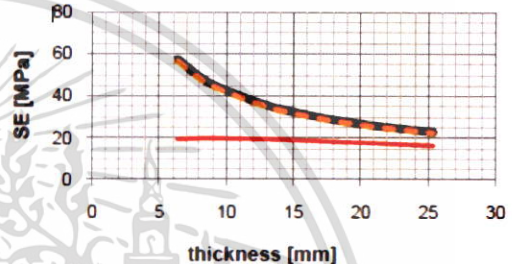


Fig.16 - Chart of $S_{E,max}$ vs. thickness

รูปที่ 2.23 แสดงกราฟผลการศึกษาค่าแรงและค่าโมเมนต์ที่จุดยึด (Anchor) และค่าความเค้นสูงสุดโดยที่ปรับเปลี่ยนความหนาของท่อ[5]

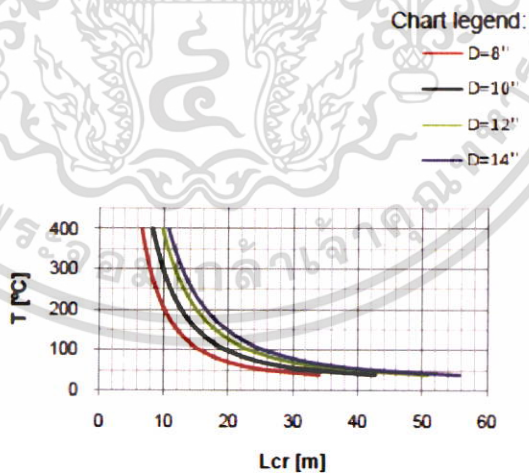


Fig.17 - Chart of temperature vs. L_{cr}

รูปที่ 2.24 แสดงกราฟผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความยาวท่อและอุณหภูมิ ของท่อขนาด 8, 10, 12 และ 14 นิ้ว คือเมื่ออุณหภูมิภายในท่อเพิ่มขึ้น ท่อมีขนาดและความยาวท่อจะลดลง[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

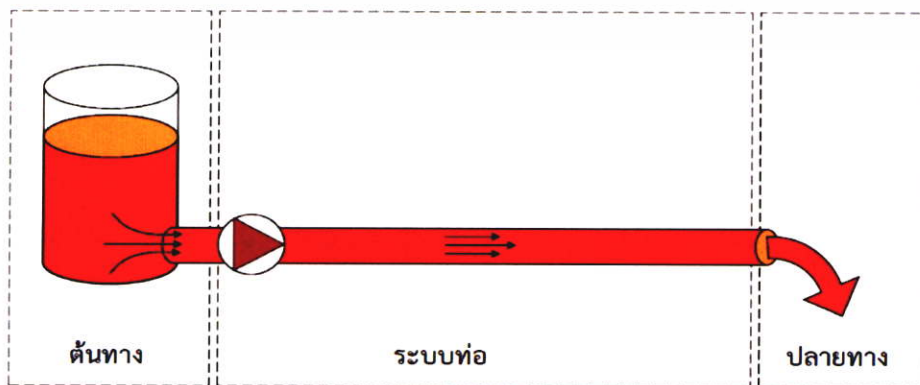
ทฤษฎีการคำนวณหาค่าความเค้นต่อร้อนรูปแอ็กซ์แพนชันลูป ด้วยวิธีของ Kellogg

บทนี้เป็นทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยฉบับนี้ โดยเริ่มลำดับเนื้อหาจากส่วนแรกเป็นแนวคิดในการออกแบบระบบท่อ และต่อเนื้อหาเกี่ยวกับมาตรฐานเกี่ยวกับการออกแบบระบบท่อ ความหมายของการยืดหยุ่นและทฤษฎีพื้นฐานการคำนวณค่าความยืดหยุ่นของท่อ (Pipe Flexibility Analysis Equations) ขั้นตอนการคำนวณหาค่าแรงและค่าความเค้นของท่อร้อนแอ็กซ์แพนชันลูปด้วยวิธี Kellogg และตัวอย่างการคำนวณด้วยวิธีของ Kellogg

3.1 แนวคิดในการออกแบบระบบท่อ

การออกแบบระบบท่อใช้ในการลำเลียงของไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือส่วนแรกที่เป็นต้นทาง เช่น ถังน้ำ ส่วนที่สองเป็นระบบท่อ เช่น ท่อ บีม วาล์ว และอุปกรณ์ต่อท่อ ส่วนที่สามเป็นปลายทางท่อ ในการออกแบบไม่แค่เพียงกำหนดขนาดท่อให้เหมาะสมเท่านั้น แต่ยังประกอบด้วย การเลือกชนิดของท่อ และอุปกรณ์ประกอบกำหนดเส้นทางการเดินท่อ และวิธีการติดตั้งที่เหมาะสมด้วย และรวมถึงการวิเคราะห์ความแข็งแรงของท่อได้แก่ การวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในท่อซึ่งจำเป็นมากปัจจุบัน เนื่องจากการพังเสียหายส่วนใหญ่เกิดจากการสั่นสะเทือนการ, ความล้าของวัสดุที่เกิดจากการขยายตัวทางความร้อน, ค้อนไอน้ำหรือน้ำ, ซึ่งข้อเท็จจริงเหล่านี้ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบท่อที่ดี

ในการทำงานจริงการเลือกชนิดขนาดท่อจะต้องอ้างอิงกับมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่นในประเทศไทยก็จะอ้างอิงกับมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย เป็นต้นหัวข้อต่อไปจะแนะนำสถาบันที่เกี่ยวข้องกับการออกมาตรฐานทางด้านระบบท่อ



รูปที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบแนวคิดในการออกแบบระบบท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 มาตรฐานเกี่ยวกับการออกแบบระบบท่อ [6]

ในการออกแบบระบบท่อจำเป็นต้องทำเป็นอย่งที่ผู้ออกแบบจะต้องรับรู้และดำเนินการให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้อง เพราะจะมีผลต่อการรับรองโดยหน่วยงานตรวจสอบต่างสำหรับประเทศไทยมีมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) เป็นแนวทาง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมาตรฐาน วสท. ยังไม่ครอบคลุมระบบท่อทางวิศวกรรมทั้งหมด ดังนั้นผู้ออกแบบจึงอาจต้องอ้างอิงกับมาตรฐานสากล ซึ่งมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบท่อเป็นที่นิยมใช้มีตัวอย่างดังต่อไปนี้



3.2.1 American Society of Mechanical Engineers (ASME)

ASME มีบทบาทในการพัฒนาศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล โดยมีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบท่อที่สำคัญมากคือ มาตรฐานเกี่ยวกับถังแรงดันและหม้อไอน้ำ และมาตรฐานสำหรับการออกแบบท่อความดัน (ASME B31 series) โดยในส่วนของมาตรฐานการออกแบบระบบท่อความดันมีหัวข้อย่อยเช่น

B31.1. Power Piping

B31.2. Fuel Gas Piping

B31.3. Process Piping

B31.4. Pipeline Transportation Systems for Hydrocarbons and Other Liquids

B31.5. Refrigeration Piping

B31.7. Nuclear Power Piping

B31.8. Gas Transmission and Distribution Piping Systems

B31.9. Building Services Piping

B31.11. Slurry Transportation Piping Systems



3.2.2 American National Standard Institute (ANSI)

ANSI เป็นองค์กรเอกชนที่ทำงานด้านการกำหนด พัฒนา และอนุมัติมาตรฐานต่างๆ ทั่วไปของประเทศสหรัฐอเมริกา



3.2.3 American Petroleum Institute (API)

องค์กรนี้มีบทบาทเกี่ยวข้องกับกิจการด้านปิโตรเลียมของประเทศสหรัฐอเมริกา บทบาทของมาตรฐาน API อาทิเช่น การวิจัยพัฒนา การเก็บข้อมูล การออกแบบ มาตรฐานและรับรองมาตรฐาน ซึ่งมาตรฐานส่วนหนึ่ง而出โดย API จะเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับงานท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม



3.2.4 American Society of Testing and Materials (ASTM)

ASTM ทำหน้าที่กำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับวัสดุเป็นหลัก



3.2.5 International Organization for Standardization (ISO)

ISO เป็นเครือข่ายขององค์กรที่รับผิดชอบด้านการกำหนดมาตรฐานของ 162 ประเทศ (ข้อมูลปี 2560) โดยมีศูนย์กลางอยู่ที่ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ISO ทำหน้าที่ประสานงานระหว่างภาครัฐและภาคเอกชนเพื่อกำหนดมาตรฐานการดำเนินกิจกรรมด้านต่างๆ ทั้งมาตรฐานด้านการจัดการ และมาตรฐานของงานทางเทคนิคในสาขาต่างๆ เช่น วิทยาศาสตร์ และวิศวกรรม เป็นต้น ในด้านระบบท่อ ISO ก็มีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องมากมาย เช่น มาตรฐาน ท่อ วาล์ว ป้อน และอุปกรณ์ประกอบท่ออื่นๆ เป็นต้น

3.3 ขนาดท่อ

ในการออกแบบท่อผู้ออกแบบไม่สามารถระบุขนาดได้อย่างอิสระ เนื่องจากผู้ผลิตจะผลิตท่อมาตามขนาดมาตรฐานซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเป็นมาตรฐานที่กำหนดไว้แล้ว ดังรายละเอียดต่อไปนี้เส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของท่อระบบการกำหนดขนาดท่อที่ใช้มาแต่ดั้งเดิมคือระบบ สำหรับกำหนดขนาดท่อเหล็ก (iron pipe size - IPS) ซึ่งระบบนี้กำหนดขนาดท่อตามเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็นหน่วยนิ้ว เช่น IPS 6 คือท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 6 นิ้ว ภายหลังจากการผลิตท่อที่มีความหนาต่างๆกัน ระบบการกำหนดขนาดท่อจึงเปลี่ยนไปอ้างอิงกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก และมีการให้รหัสสำหรับความหนาของท่อเป็น standard (STD), extra strong (XS) or extra heavy (XH). double extra strong (XXS) or double extra heavy (XXH) ซึ่งต่อมาได้มีการผลิตท่อที่มีความหนาหลากหลายชั้นอีกจึงมีการเปลี่ยนระบบการให้ขนาดท่อเป็นขนาดระบุ (nominal pipe size - NPS) และใช้สเกดูล (schedule - SCH) ระบบ NPS ระบุขนาดท่อเป็นขนาดประมาณในหน่วยนิ้ว เช่น NPS 2 คือท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.375 นิ้ว ซึ่งในท่อที่มีขนาดตั้งแต่ NPS 12 ลงไปจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกใหญ่กว่าขนาดระบุ ขณะที่ท่อขนาดตั้งแต่ 14 นิ้วขึ้นไปจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับขนาดระบุ ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจะแปรเปลี่ยนตามความหนาของท่อ ซึ่งท่อที่มีสเกดูลสูงๆหมายถึงท่อที่มีความหนามากก็จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็กกว่าท่อที่มีสเกดูลต่ำ

การระบุขนาดท่อในระบบเมตริก จะระบุเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ (Diameter nominal - DN) โดยเส้นผ่านศูนย์กลางระบุจะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร เช่น DN 50 มีความหมายเหมือน NPS 2. และการระบุความหนาของท่อในปัจจุบันนิยมระบุเป็นสเกดูล โดยเรียงจากบางไปหนาได้ดังนี้ สเกดูล 5, 5S, 10, 10S, 20, 20S, 30, 40, 40S, 60, 80, 80S, 100, 120, 140 และ 160 เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อในระบบ DN และ NPS [6]

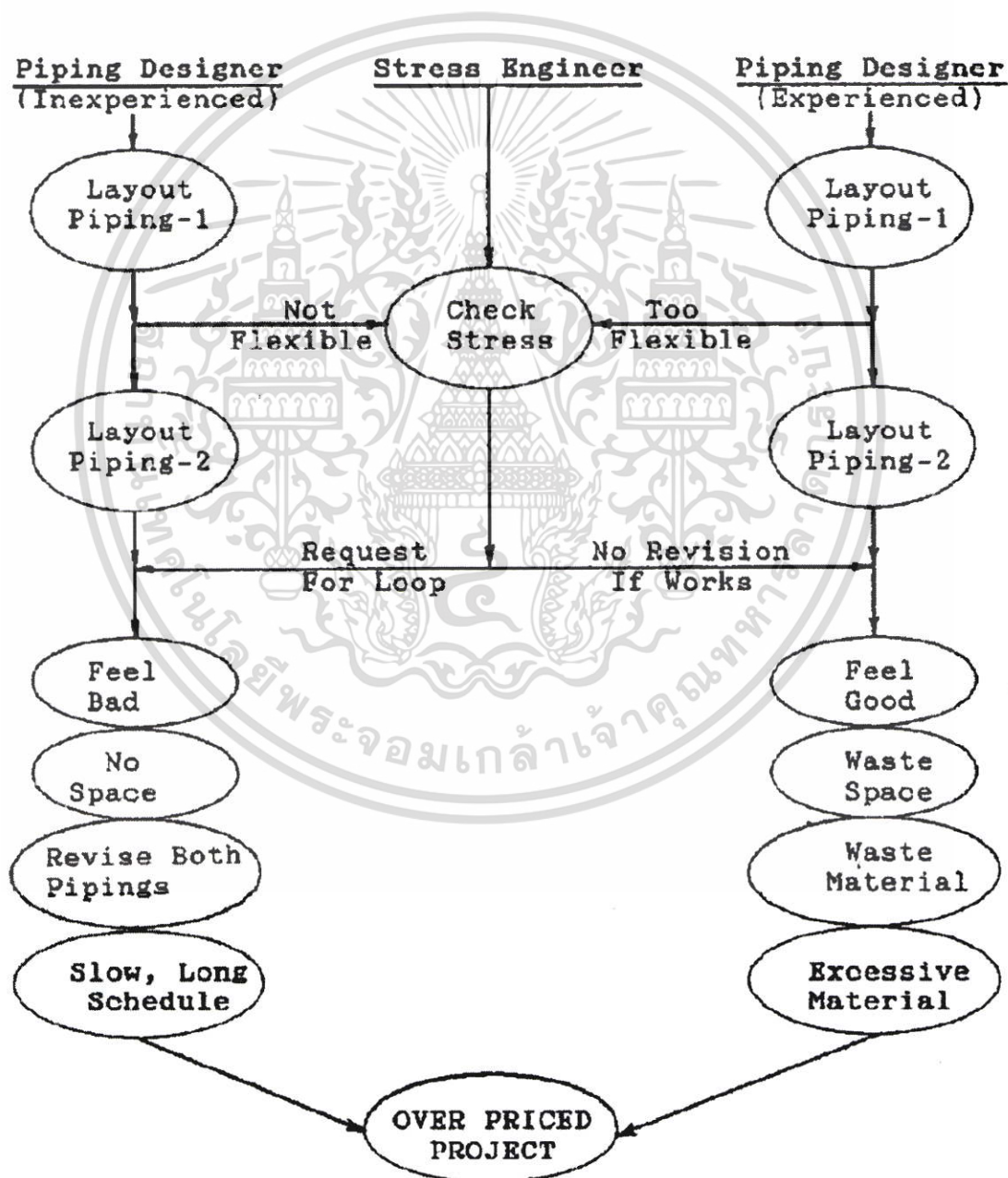
NPS (นิ้ว)	DN (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก (มม.)	NPS (นิ้ว)	DN (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ภายนอก (มม.)
1/8	-	10.3	20	500	508
1/4	6	13.7	22	550	558.8
3/8	10	17.1	24	600	609.6
1/2	15	21.34	26	650	660.4
3/4	20	26.67	28	700	711.2
1	25	33.4	30	750	762
1-1/4	32	42.16	32	800	812.8
1-1/2	40	48.26	34	850	863.6
2	50	60.32	36	900	914.4
2-1/2	65	73.02	40	1000	1016
3	80	88.9	42	1050	
3-1/2	90	101.6	44	1100	
4	100	114.3	46	1200	
5	125	141.3	48	1300	
6	150	168.3	52	1400	
8	200	219.1	56	1500	
10	250	273	60	1600	
12	300	323.9	64	1700	
14	350	355.6	68	1800	
16	400	406.4	72	1900	
18	450	457.2	80	2000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 หลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบระบบท่อ

ในการวางแผนการออกระบบท่อ โดยทั่วไปวิศวกรระบบท่อจะออกแบบตามหลักมาตรฐานสากล โดยแบ่งออกเป็น 3 แผนกดังนี้

1. แผนกออกแบบระบบท่อ (Piping Designer) มีหน้าที่วางแผนงาน และออกแบบทิศทางการเดินทางท่อให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล
2. แผนกวัสดุและอุปกรณ์ท่อ (Piping Material) มีหน้าที่จัดหน้าจัดหาวัสดุท่อ
3. แผนกคำนวณระบบท่อ (Piping Stress) มีหน้าที่คำนวณความแข็งแรงของระบบท่อ เพื่อวิเคราะห์ป้องกันการเสียหายก่อนติดตั้งจริง โดยคำนวณตามมาตรฐานในการออกแบบท่อ



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนในการออกแบบและการทดสอบค่าความเค้นของระบบท่อ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

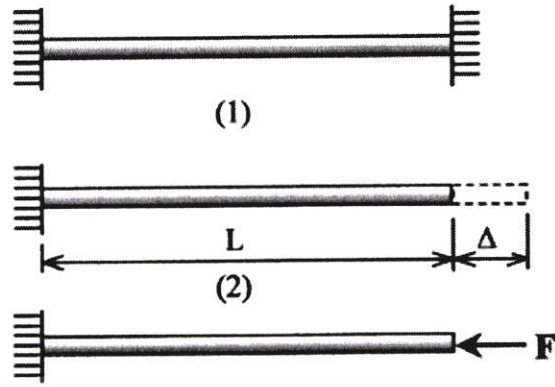
3.5 การยืดหยุ่นของท่อ (Pipe Flexibility) [8]

ความต้องการขั้นพื้นฐานระบบท่อคือ ต้องมีความยืดหยุ่นเพียงพอที่จะป้องกันเมื่อท่อที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากเงื่อนไขการติดตั้งไปสู่สภาวะการทำงานโดยทั่วไปท่อเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิจะเกิดการขยายตัวและการหดตัว เรียกว่าการขยายตัวทางความร้อนเมื่อท่อขยายตัวจะมีศักยภาพในการสร้างแรงและความเครียดมหาศาลในระบบ ถ้าหากท่อมีความยืดหยุ่นเพียงพอการขยายตัวสามารถดูดซับได้โดยไม่ก่อให้เกิดแรงหรือความเค้นเกินควร ให้ความยืดหยุ่นเหมาะสมเป็นหนึ่งในงานสำคัญในการออกแบบระบบท่อ

ท่อจะใช้ในการลำเลียงของไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เห็นได้ชัดว่าระบบท่อที่สั้นจะใช้ค่าใช้จ่ายด้านทุนน้อยและดีกว่าระบบท่อที่ยาวขึ้นและมีข้อต่อส่วนโค้งหลายอัน อาจทำให้เกิดความดันที่มากเกินไปทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน แต่การเดินระบบท่อที่สั้นมากเกินไปอาจทำให้เกิดผลเสียคือ ไม่สามารถดูดซับแรงที่เกิดจากการขยายตัวและหดตัวทางความร้อนได้ ระบบท่อที่ดีต้องได้รับการออกแบบตามรหัสมาตรฐานที่บังคับใช้และต้องเป็นไปตามข้อกำหนดด้านความยืดหยุ่นคือ แรงปฏิกิริยาที่คำนวณได้จะต้องไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างรองรับหรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ของท่อต้องอยู่ในขอบเขตที่พึงประสงค์ตามแนวทางวิศวกรรมที่ดี

3.5.1 การคำนวณค่าความยืดหยุ่นของท่อ (Pipe Flexibility Analysis Equations) [8]

ในการวิเคราะห์ค่าความยืดหยุ่นเป็นการวิเคราะห์เกี่ยวกับภาระโหลดที่ทำให้เกิดความเค้นกับท่อ ได้แก่ ภาระโหลดจากบนจุดยึด (Load on Support), แรงที่กระทำภายในและภายนอกท่อ เป็นต้น โดยหลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับขนาดระบุของท่อ, ปัจจัยข้อโค้งและข้อต่อสามทางมีผลต่อความยืดหยุ่นและความเค้นของท่อโดยพิจารณาจากปัจจัยความยืดหยุ่นและปัจจัยความเค้นด้านความเค้นหนาแน่น ในรูปที่ 3.3(1) แสดงท่อตรงที่เชื่อมต่อกับสองจุดยึด Anchors จะไม่มีการขยับที่จุดปลายทั้ง 2 ด้าน เมื่ออุณหภูมิของท่อเปลี่ยนแปลงจะทำให้ท่อขยายตัวจะเกิดแรงกระทำกับจุดยึด Anchor แต่จุดยึดที่ปลายป้องกันไม่ให้ขยายตัวดังนั้นแรงด้านของตัวยึด Anchors สร้างขึ้นเป็นสะท้อนกลับไปที่ท่อ ในรูปที่ 3.3(2) แสดงให้เห็นว่าเมื่อปลายด้านหนึ่งของท่อไม่มีจุดยึด ท่อมีการขยายตัวอิสระ(สมการที่ 3.1)โดยที่ คืออัตราการขยายตัวทางความร้อนของท่อและ $(T_2 - T_1)$ คือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แรงที่เกิดปลายจะทำให้เกิดแรงสะท้อนกลับที่ด้านปลายอิสระจะเกิดระยงการขยายตัว



รูปที่ 3.3 แสดงการขยายตัวทางความร้อนของท่อ [8]

ขยายตัวทางความร้อนการขยายตัวทางความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta = \alpha(T_2 - T_1)L = eL = \frac{S}{E_h}L = \frac{F}{E_h A}L \quad (3.1)$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์การขยายความร้อนของท่อ

L คือ ความยาวท่อ

E_h คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ

A คือ พื้นที่ตัดขวางของท่อ,

F คือ แรงที่จุดยึด Anchor

S คือ ความเค้นในแนวแกน

แรงที่เกิดขยายตัวทางความร้อนการขยายตัวทางความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.2)

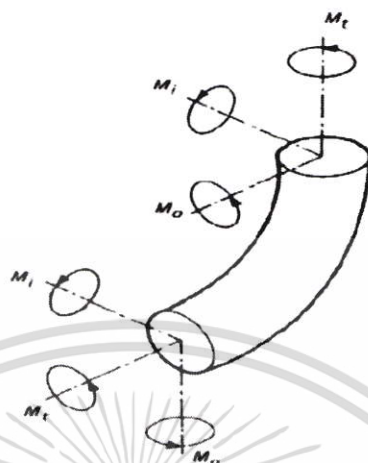
$$F = EA\alpha(T_2 - T_1) \quad (3.2)$$

ความเค้นแนวแกนที่เกิดขยายตัวทางความร้อนการขยายตัวทางความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.3)

$$S = E_h\alpha(T_2 - T_1) \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหลักพื้นฐานการวิเคราะห์หาความเค้นจากการขยายตัวจะพิจารณาเฉพาะโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และโมเมนต์แรงบิด (Torsion Moment) ซึ่งแสดงตัวอย่างที่เกิดขึ้นกับท่อโค้ง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงโมเมนต์ และโมเมนต์แรงบิด ที่เกิดขึ้นกับท่อโค้ง [8]

การวิเคราะห์ความเค้นการขยายตัวจะกระทำโดยการเปรียบเทียบระหว่างผลรวมของความเค้นเฉือนที่เกิดจากแรงบิดและความเค้นดัด

โดยทั่วไปวิศวกรผู้ออกแบบจะต้องคำนวณค่าความเค้นที่เกิดจากการยืดหยุ่นของของท่อจะต้องควบคุมไม่ให้เกินค่าความเค้นอนุญาต (Allowable stress) สามารถคำนวณความเค้นอนุญาตได้จากสมการ (3.7)

$$S_A = f(1.25 S_c + 0.25 S_h) \quad (3.4)$$

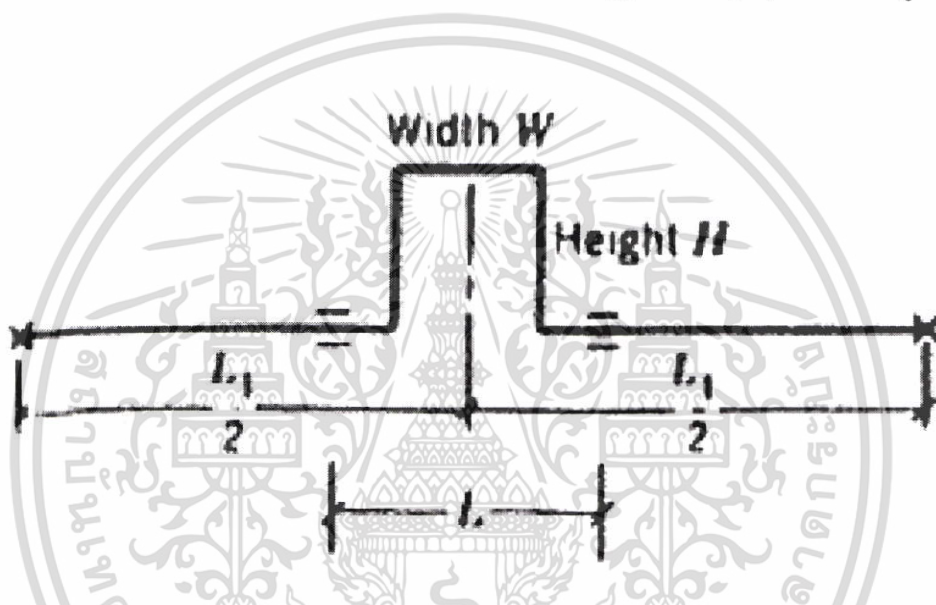
หลักจากคำนวณหาค่าความเค้นเสร็จแล้วจะต้องการตรวจสอบของระบบท่อ คือ เปรียบเทียบค่า Expansion stress กับค่า Allowable stress :

$$S_E < f(1.25 S_c + 0.25 S_h) \quad (3.4)$$

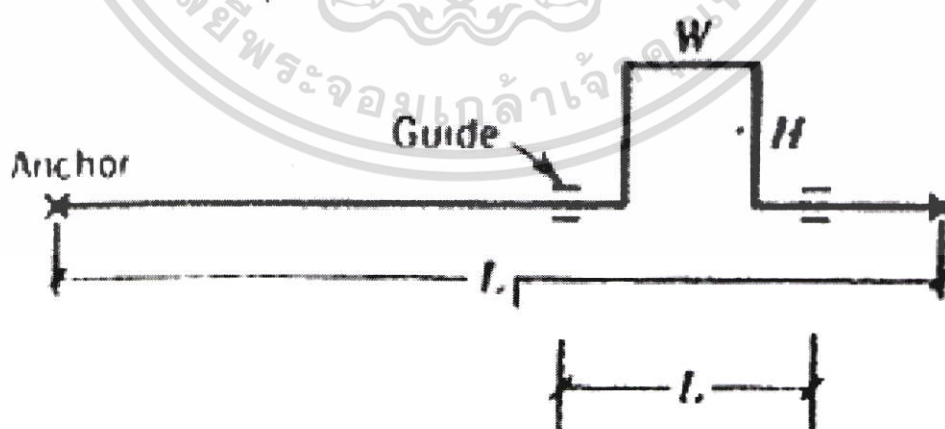
โดยที่ S_c หมายถึง เป็นความเค้นเค้นอนุญาตที่อุณหภูมิการติดตั้ง
 S_h หมายถึง ความเค้นอนุญาตที่อุณหภูมิใช้งาน

3.6 สิ่งที่ต้องคำนึงถึงการออกแบบแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop)

1. การสร้างแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการเพิ่มความยืดหยุ่นของท่ออันเนื่องมาจากความเค้นที่เกิดจากการขยายตัวทางความร้อน แอ็กซ์แพนชันลูปในช่วงระหว่างจุดยึด (Anchors Support) จะมีทั้งที่เป็นแบบสมมาตร (symmetrical Loop) ดังรูปที่ 3.5 และแบบไม่สมมาตร (Nonsymmetrical Loop) ดังรูปที่ 3.6 ในการออกแบบจะนิยมแอ็กซ์แพนชันลูปแบบสมมาตรเนื่องจากจะทำให้ความยาว H การเพิ่มประสิทธิภาพความยืดหยุ่นได้ดี โดยสามารถคำนวณหาขนาดของความยาว L_2 ของแอ็กซ์แพนชันลูป (Loop bend length) ได้ดังสมการที่ 3.5 หรือหาขนาดจากกราฟของ Kellogg (Nomographs) ได้จากรูปที่ 3.12



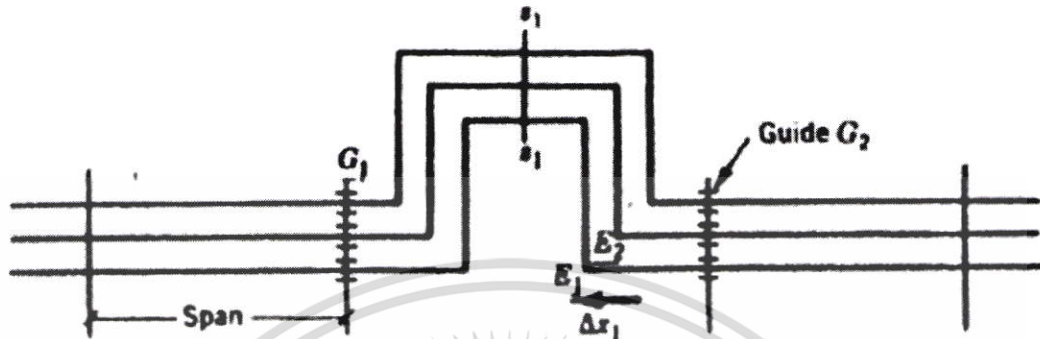
รูปที่ 3.5 แสดงแอ็กซ์แพนชันลูปแบบสมมาตร (symmetrical Loop) [9]



รูปที่ 3.6 แสดงแอ็กซ์แพนชันลูปแบบไม่สมมาตร (Nonsymmetrical Loop) [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

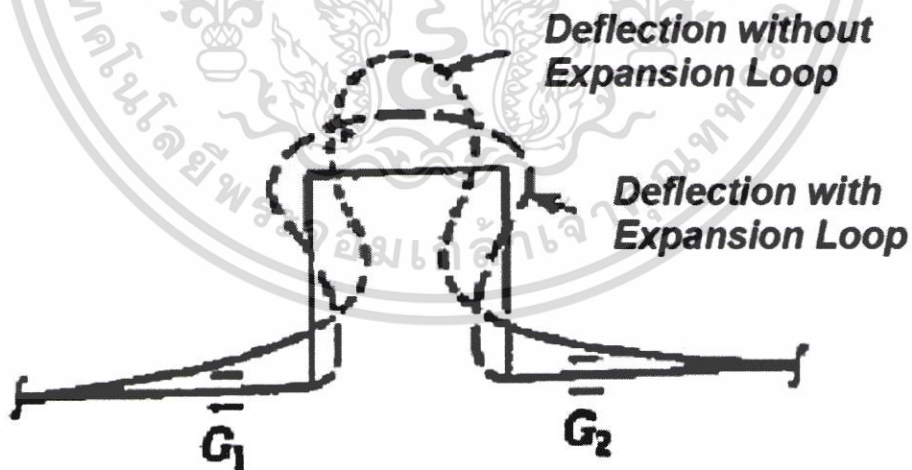
2. ในการออกแบบระบบท่อร้อนในอุตสาหกรรมมักนิยมออกแบบแอ็กซ์แพนชันลูปบนชั้นวางท่อ (pipe rack) โดยออกแบบให้ท่อที่มีร้อนมีแอ็กซ์แพนชันลูป ทุก ๆ 30 เมตร หรือ 60 เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตามเงื่อนไขตามลักษณะหน้างานการก่อสร้างด้วย



รูปที่ 3.7 แสดงการเดินระบบท่อแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) บนชั้นวางท่อ (pipe rack)

[9]

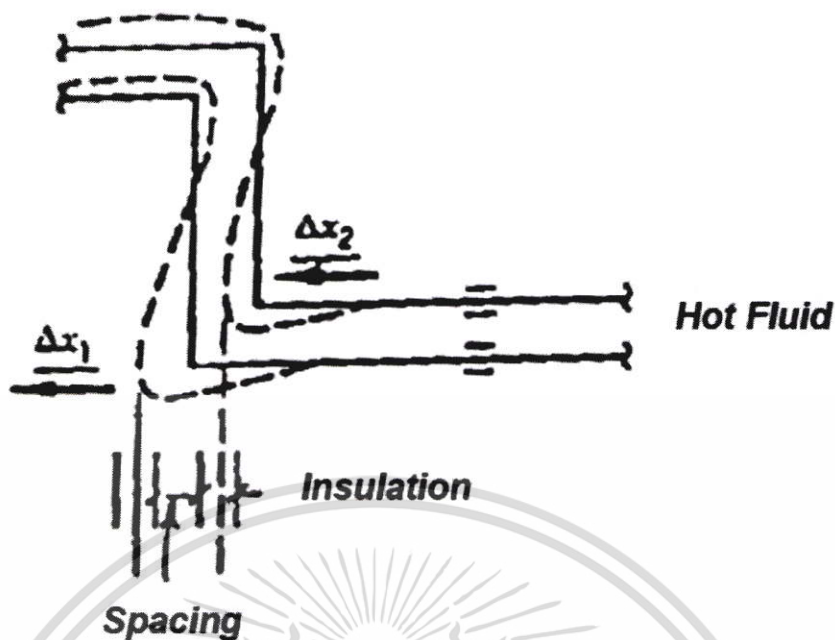
3. ในการออกแบบระบบท่อแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) จะต้องมีจุดยึด (Guides Support) G_1 และ G_2 มีความสำคัญมากจะช่วยบังคับทิศทางของการขยายตัวของท่อในแนวแกนได้ในรูปที่ 3.8 นอกจากนั้นนักออกแบบนิยมออกแบบจุดยึด (Guides Support) สลับตัวเว้นตัวตามระยะห่างของจุดยึด (Span support)



รูปที่ 3.8 แสดงการขยายตัวท่อแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) ที่มีจุดยึด G_1 และ G_2 [9]

4. ในการออกแบบท่อที่มีแอ็กซ์แพนชันลูปมากกว่า 1 ท่อ ในรูปที่ 3.9 ควรต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างท่อเพื่อป้องกันการชนของท่อหลังจากเกิดความร้อนและขยายตัว โดยการคำนวณจากรยะห่าง $Spacing > (\Delta X_2 - \Delta X_1)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



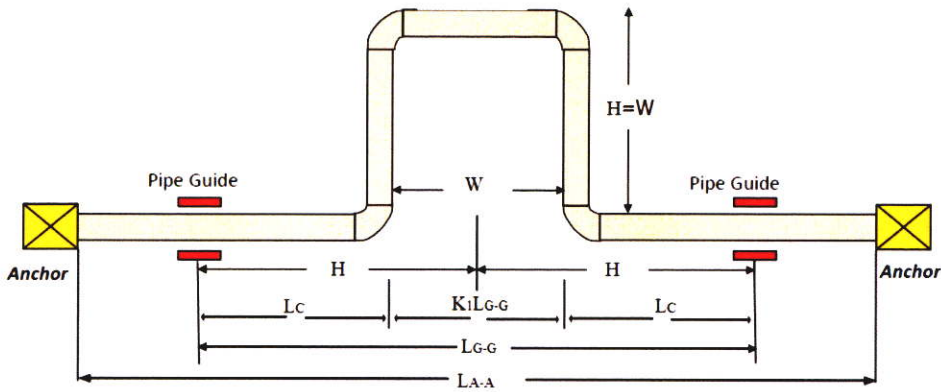
รูปที่ 3.9 แสดงการระยะห่างท่อ Spacing บนชั้นวางท่อ (pipe rack) [9]

นอกจากในการออกแบบท่อที่ดี ควรพิจารณาประเด็นด้านล่างนี้ในระหว่างขั้นตอนทางวิศวกรรมของการออกแบบเอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) คือ

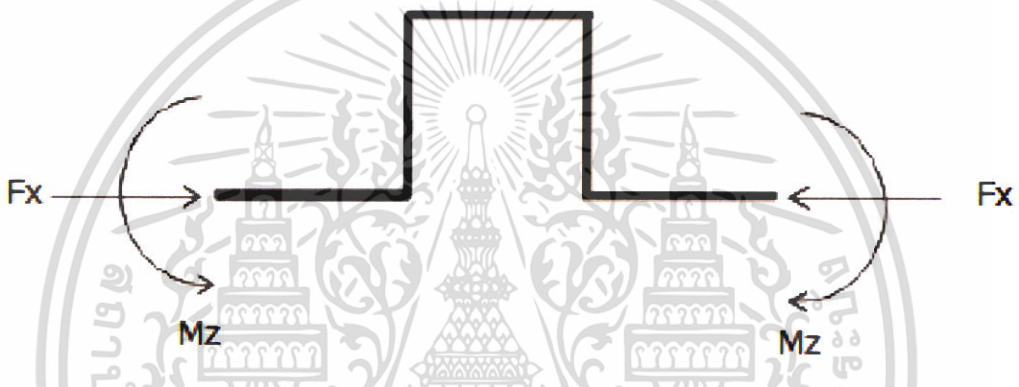
1. ค่าโครงของท่อหลักหลัก (The layout of the main line)
2. เงื่อนไขของกระบวนการผลิตและของไหลในท่อ (Process conditions)
3. มาตรฐานและวิธีการ (Standards & Procedures)
4. ระดับความเครียดของข้อต่อ (Stress level on the fittings)
5. ประมวลผลกฎความปลอดภัย (Process safety rules)
6. วิธีลดต้นทุนที่ชาญฉลาด (Cost-wise approach)

3.7 การคำนวณหาค่าความเค้นของเอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop)

ในการคำนวณขนาดของเอ็กซ์แพนชันลูปมีพื้นฐานตามทฤษฎีของ M.W. Kellogg [9] พิจารณาแรงและค่าความเค้นจากการขยายตัวของท่อเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยท่อมีขนาดความยาวจุดยึดท่อ (Anchors Support) ที่ปลายทั้งสองข้างเท่ากับ L และขนาดความยาวจุดยึดท่อ (Guides Support) เท่ากับ L_2 ดังรูปที่ 3.10 สำหรับกรณีที่ $H=W$



รูปที่ 3.10 แสดงรูปแบบ Symmetrical loop (H=W)



รูปที่ 3.11 แสดง Free Body Diagram ของแอกซ์แพนชันลูป

3.7.1 การพิจารณาขนาดของ Loop bend length

ขนาดของ Loop bend length สามารถคำนวณได้จากสมการของ Guided cantilever method ดังสมการที่ 3.5

$$L_2 = \sqrt{\frac{3E_h D_o \Delta}{S_A}} \quad (3.5)$$

โดยที่ Δ คือ การขยายตัวของความร้อน (Thermal expansion)

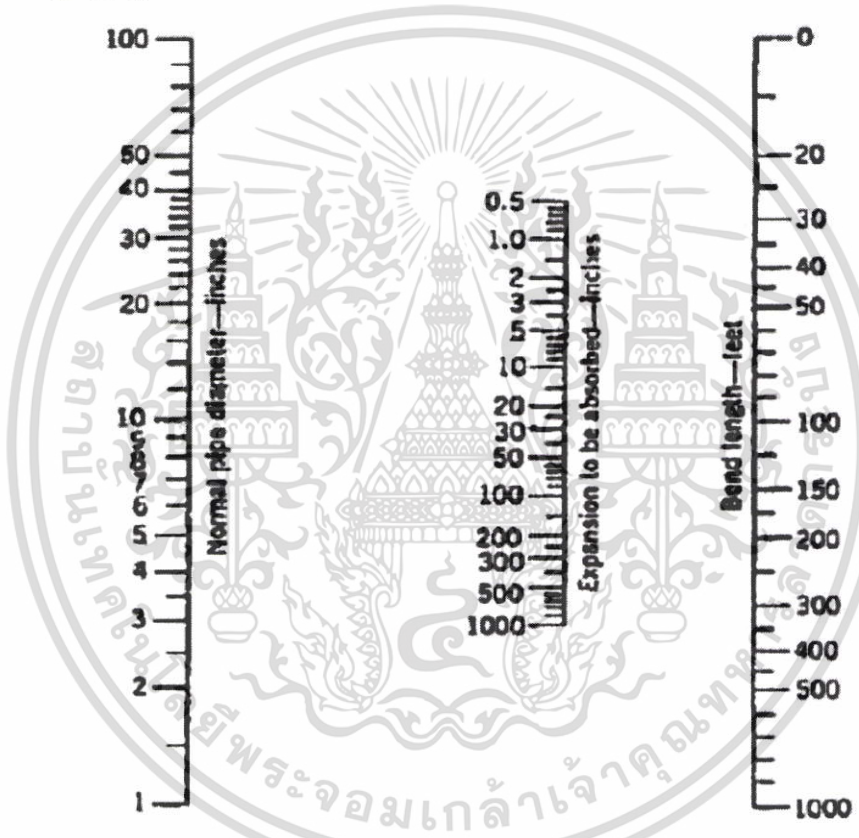
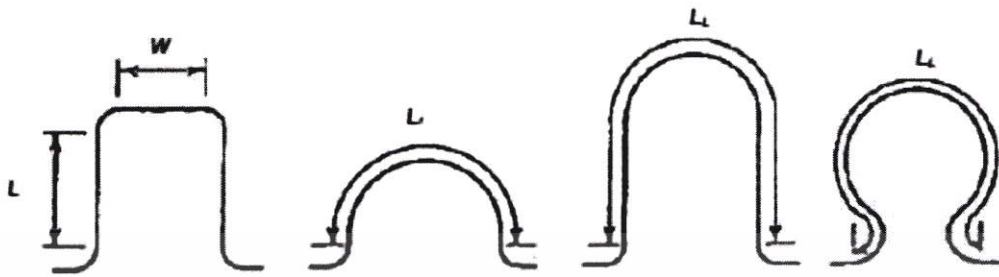
E_h คือ โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ (Elasticity of Modulus)

D_o คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายนอกท่อ

S_A คือ ความเค้นสูงสุด (Maximum allowable material stress)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถคำนวณขนาดของ Loop bend length ได้จาก Nomograp chart จากวิธีของ Kellogg โดยกำหนดให้ Loop bend length เท่ากับสมการที่ 3.6



รูปที่ 3.12 Nomograph chart จากวิธีของ Kellogg

$$L_2 = 2H + W \tag{3.6}$$

ในกรณีที่ 1 $H=W$ จะมีค่า $L_2 = 3W$ (3.7)

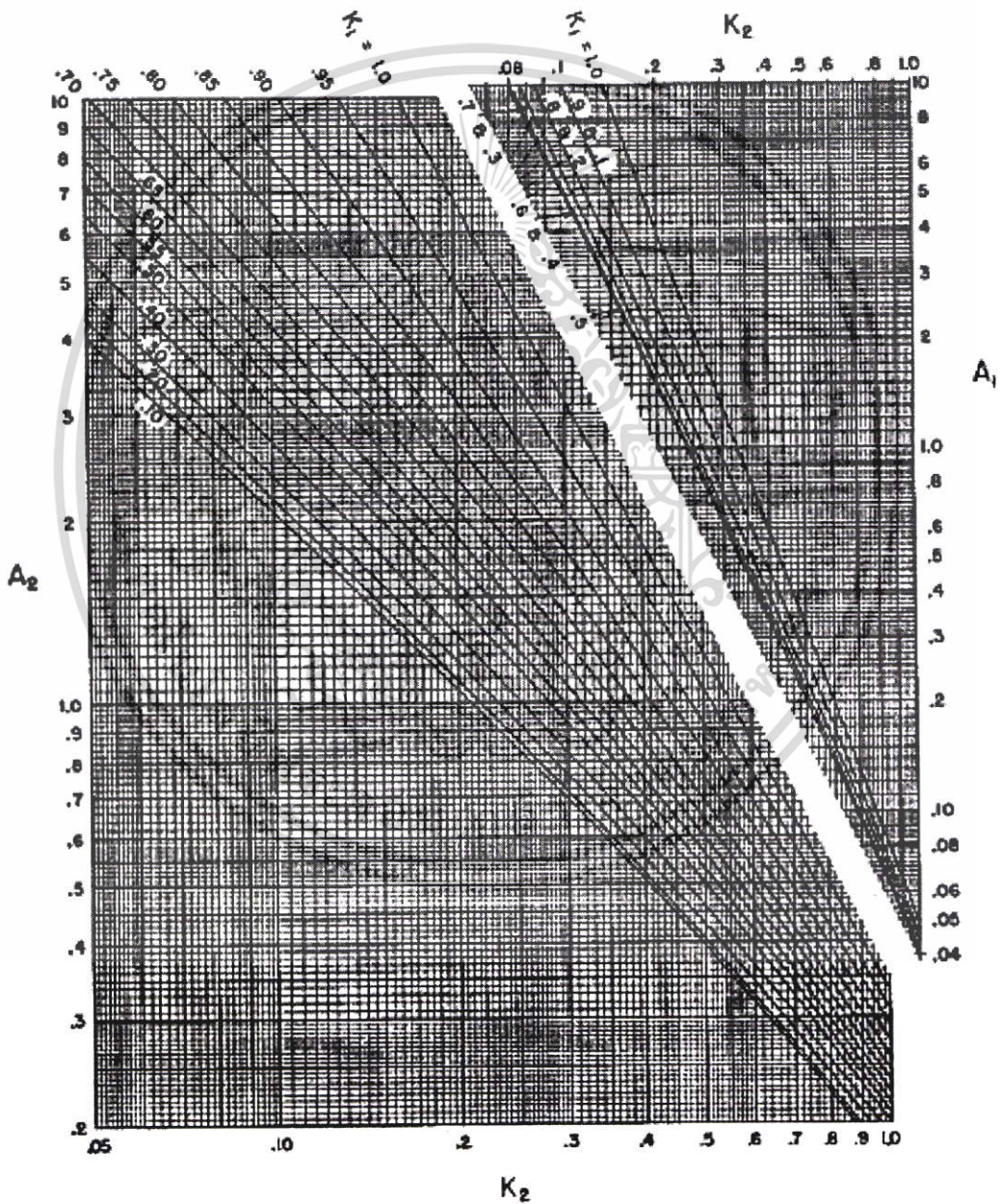
ในกรณีที่ 2 $H=2W$ จะมีค่า $L_2 = 5W$ (3.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การคำนวณหาค่าแรงด้วยวิธีการคำนวณของ M.W. Kellogg

การคำนวณหาค่าแรงในวิธีการคำนวณของ M.W. Kellogg โดยใช้กราฟรูปที่ 3.13 แสดงกราฟใช้ในการคำนวณหาค่าความแรง จากการออกแบบจากทฤษฎี M.W. Kellogg. ประกอบการคำนวณในสมการด้านล่างนี้ [9]

$$F_{xA} = -F_{xA'} = \frac{-10^6 A_1 I \Delta}{L^3} \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.13 กราฟใช้สำหรับหาค่าคงที่ A_1 และ A_2 เพื่อหาค่าแรงด้วยวิธีของ Kellogg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 การคำนวณหาค่าความเค้นจากวิธีของ Kellogg

การคำนวณหาค่าความเค้นจากวิธีของ Kellogg จะใช้กราฟรูปที่ 3.14 แสดงกราฟใช้ในการคำนวณหาค่าความเค้น จากการออกแบบจากทฤษฎี M.W. Kellogg ประกอบการคำนวณในสมการด้านล่างนี้

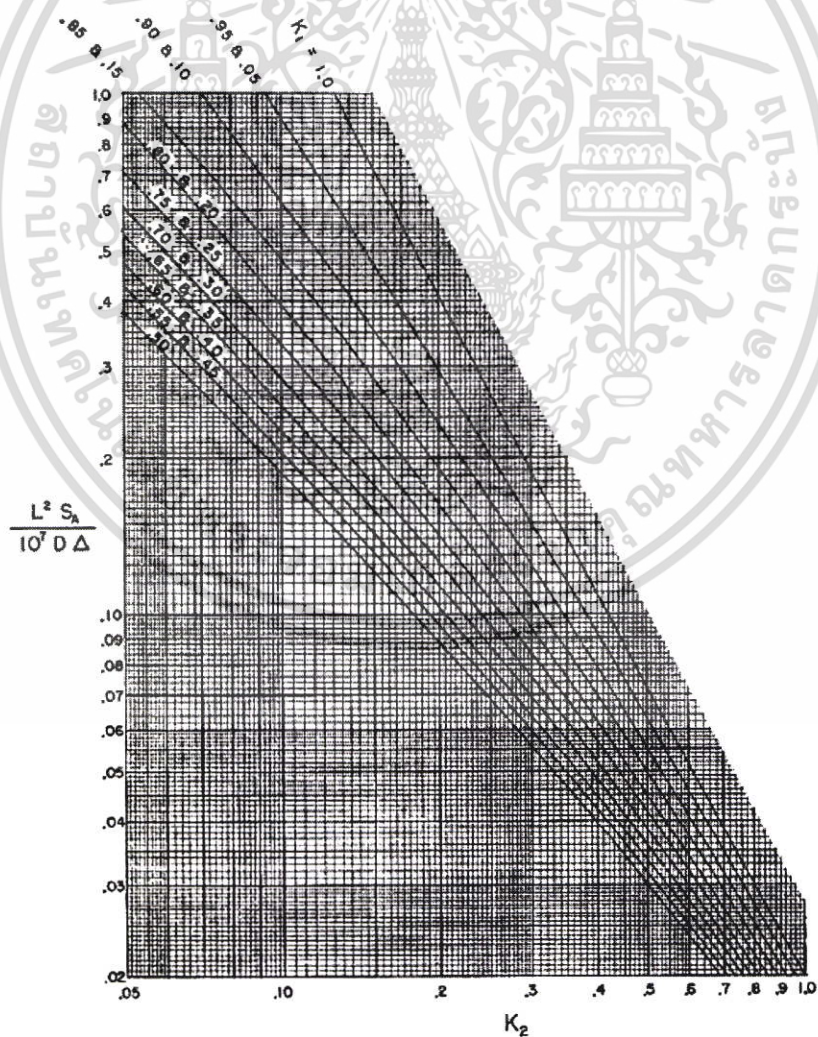
$$S = \frac{0.03(10^7)D\Delta}{L^2} \quad (3.10)$$

โดยที่ L คือ ระยะระหว่างจุด Guide – Guide,

I คือ โมเมนต์เฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด,

Δ คือ ระยะขยายตัว

S คือ ค่าความเค้นดัดจากทฤษฎี M.W. Kellogg



Multiply L by K_1 and K_2 to obtain dimensions of loop.

รูปที่ 3.14 กราฟใช้สำหรับหาค่าความเค้น Expansion Loop จากวิธีของ Kellogg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 ขั้นตอนการคำนวณท่อร้อนแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop)

1. ขั้นตอนการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ ผู้ใช้งานจะต้องเลือกชนิดวัสดุของท่อและเลือกขนาดท่อ เพื่อกำหนดค่าตัวแปรหลัก คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (OD) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (ID) อุณหภูมิที่จะคำนวณ (T) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (moment inertia) ค่าการขยายตัวทางความร้อนของท่อ (linear thermal expansion) ค่าความเค้นอนุญาตจากตาราง ASME B31.1 (S_a)

2. ขั้นตอนการกำหนดขนาดความยาวท่อ Anchor - Anchor (L) ความยาวท่อ Guide - Guide (L_1) ความยาวท่อด้าน (H) และความยาวท่อด้าน (W)

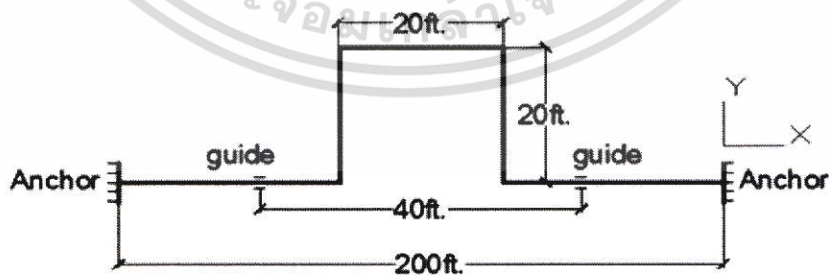
3. ขั้นตอนการคำนวณหาค่า K_1 K_2 หาค่าแฟกเตอร์การขยายตัว A_1 และ ค่า $\frac{L^2 S_A}{10^7 D \Delta}$ จากกราฟของ Kellogg ในรูปที่ 3.14

4. ขั้นตอนการคำนวณผล หาค่าความเค้น (S_E) และแรงที่จุด Anchor และโมเมนต์ที่จุด Guide

5. ขั้นตอนการแสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ โดยการนำไปกราฟสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นดัด (S_E) และค่าแรง (F) เทียบกับค่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (moment inertia)

3.9 ตัวอย่างการคำนวณการคำนวณด้วยวิธี Kellogg

คำนวณของ Kellogg [9] ซึ่งเป็นการคำนวณค่าความเค้นท่อร้อนรูปแบบแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) แบบพื้นฐานของท่อเหล็ก-คาร์บอนที่มีท่อขนาด 6 นิ้ว Schedule 40 ที่อุณหภูมิ 450°F โดยมีความยาวท่อจากจุดยึด Anchor - Anchor เท่ากับ 200 ฟุต เส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ 6.625 นิ้วท่อมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของท่อเหล็กคาร์บอนที่อุณหภูมิ 450°F เท่ากับ 0.0316 นิ้ว/ฟุต การขยายตัวภายในของท่อทั้งหมด, $\Delta = L_{G-G} \times \epsilon = 200 \times 0.0316 = 6.32$ นิ้ว และวัสดุท่อมีค่าความเค้นอนุญาตจาก ASME B31.1, $S_A = 20000$ psi



รูปที่ 3.15 แสดงขนาด ของท่อ Expansion Loop Symmetrical shaped ในตัวอย่างการคำนวณ

LOOP FORCES AND STRESS

TYPICAL CALCULATOR SHEET

M.W. Kellogg Method

Input				Calculation				
Material	Carbon steel	Sch.40		$K1 = W/L1$	0.50			
Nominal Size	6	in.		$K2 = H/L1$	0.50			
OD	6.625	in.		$L_1 = 1.2(LX1 - X_1)$	10.0	ft.	3.0 m.	
linear thermal expansion	0.316	in/ft		$\Delta \text{ Deflection} = (L) \times (\text{thermal expansion})$	63.20	in.	19.3 m.	
Temperature	450	deg F	232.2 deg C	$L2 = 2H+W$	60	ft.	18 m.	
Code allowable stress (Sa)	20000	psi	137.90 MPa					
moment inertia	28.140	in ⁴						
A1 from kellogg Chart	0.21							
A2 from kellogg Chart	0.5							
$\frac{L^2 S_1}{10^7 D \Delta}$ from kellogg Chart	0.03	ft.						
H	20	ft.	6.096 m					
L_{1-4}	200	ft.	60.96 m					
L_{2-5}	40	ft.	12.192 m					
W	20	ft.	6.096 m					
				Result				
				Stress $S = (41 \times (10^{-3}) D \Delta) L$	78506	psi	541	MPa
				Axial force at anchor $F_1 = -F_2 = \frac{10^{-4} A1 \Delta}{L}$	5836	lb	26	kN

รูปที่ 3.16 ตัวอย่างตารางการคำนวณโดยใช้ โปรแกรม Excel เป็นเครื่องมือ

ขั้นตอนการคำนวณมีดังต่อไปนี้

1. คำนวณหาค่าความยาว Loop bend length ที่ต้องการน้อยที่สุดจากสมการที่ 3.5

$$L = \sqrt{\frac{3ED_o \Delta}{144S_A}}$$

$$L = \sqrt{\frac{3 \times (29 \times 10^6) \times 6.625 \times 6.32}{144 \times 20000}} = 35.56 \rightarrow \text{ft.}$$

และตรวจสอบ Loop bend length ด้วยแผนภูมิ Nomograph โดยวิธี M.W. Kellogg เท่ากับ 40 ฟุต. เป็นขนาด Loop bend length ที่ต้องการน้อยที่สุด ดังนั้นในตัวอย่างที่ใช้การคำนวณจะใช้ $L_2 = 2H + W$ เท่ากับ 60 ฟุต.

พิจารณา $H=W$

กำหนดให้ $H=20$ ฟุต และ $W=20$ ฟุต

2. คำนวณหาค่าคงที่ K_1 และ K_2 ได้ดังนี้

$$K_1 = \frac{W}{L_{G-G}} = \frac{20}{40} = 0.5$$

$$K_2 = \frac{W}{L_{G-G}} = \frac{20}{40} = 0.5$$

3. คำนวณหาค่าความยาว L_C ได้ดังนี้

$$L_C = \frac{1}{2}(L_{G-G}) \times (1 - K_1)$$

$$L_C = \frac{1}{2} \times 40 \times (1 - 0.5) = 10 \rightarrow ft.$$

4. คำนวณหาค่าระยะยืดขยายตัว (Deflection) ดังต่อไปนี้

$$\Delta = L_{A-A} \alpha$$

$$\text{Deflection, } \Delta = 200 \times 0.0316 = 6.32 \rightarrow in.$$

5. หาค่าคงที่ A_1 จากรูปที่ 3.13 ; ได้ค่าคงที่ $K_1 = 0.5 \rightarrow A_1 = 0.21$
 6. คำนวณหาค่าแรงที่จุด Anchor ดังต่อไปนี้

$$F_{xA} = -F_{xA'} = \frac{-10^6 A_1 \Delta}{L_{G-G}^3}$$

$$F_{xA} = -F_{xA'} = \frac{-10^6 \times 0.21 \times 6.32}{(40)^3} = 584 \rightarrow lb.$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. คำนวณหาค่าความเค้นเกิดจากการขยายตัว ดังต่อไปนี้

$$\text{Stress} = s = \frac{0.03(10^7)D_o\Delta}{L^2}$$

$$\text{Stress} = s = \frac{0.03 \times 10^7 \times 6.625 \times 6.32}{40^2} = 7850.25 \rightarrow \text{psi}$$

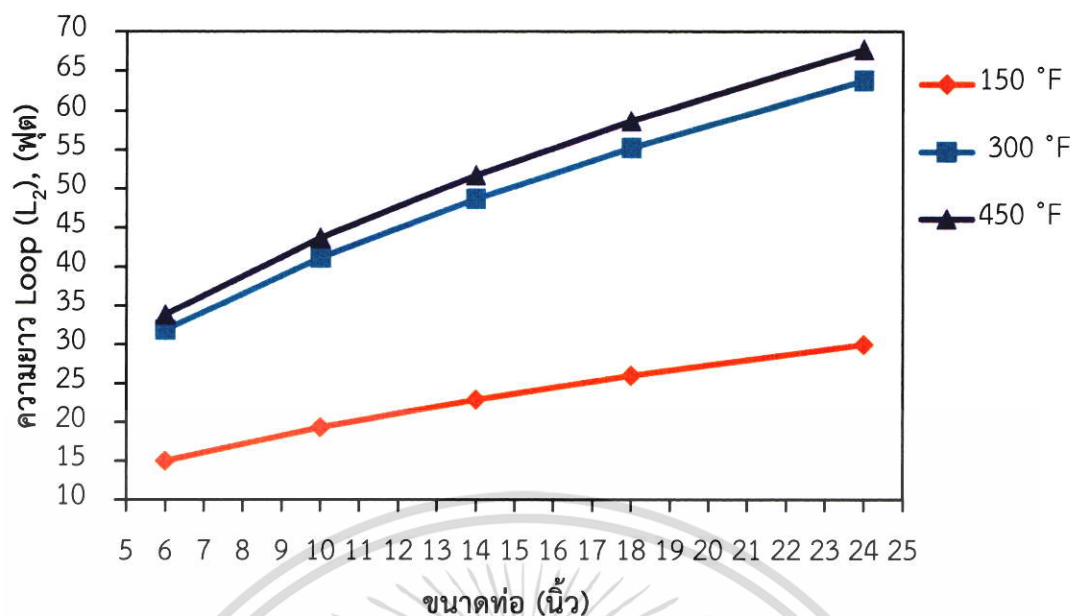
3.9.1 ผลการคำนวณแอ็กซ์แพนชันลูป ด้วยวิธีของ Kellogg

จากการคำนวณหาค่าความเค้นดัดด้วยวิธีของ Kellogg ของท่อขนาด 6 นิ้ว Schedule 40 และท่อขนาด 10,14,18 และ 24 นิ้ว Schedule 20. โดยความยาวรวมของท่อจากจุดยึด Anchor – Anchor (L_{AA}) เท่ากับ 200 ฟุต ที่อุณหภูมิติดตั้งภายนอก 70°F และอุณหภูมิท่อที่ใช้ในการคำนวณ 150°F , 300°F และ 450°F และที่มีขนาดความยาว Loop เท่ากับ ($L_2 = 2H + W$) ได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณความยาว Loop ที่ต้องการจากวิธีของ Kellogg

อุณหภูมิ	150°F	300°F	450°F
ขนาดท่อ (นิ้ว)	ความยาว (L_2) ที่ต้องการ (ฟุต)		
6	15	32	34
10	19	41	44
14	23	49	52
18	26	55	59
24	30	64	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



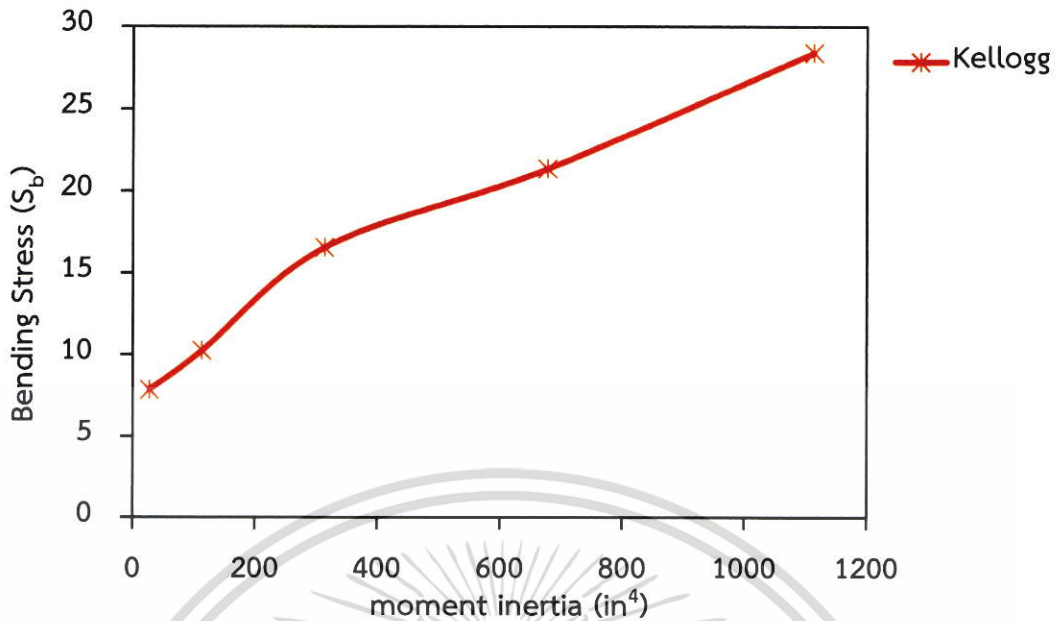
รูปที่ 3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวแอกซ์แพนชั้นลูป (L_2) กับขนาดท่อ

จากรูปที่ 3.17 เป็นผลการคำนวณความยาว Loop จากวิธีของ Kellogg จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวแอกซ์แพนชั้นลูป (L_2) กับขนาดท่อ และเห็นได้ว่า เมื่อขนาดท่อและอุณหภูมิของท่อเพิ่มขึ้น ความยาว Loop ที่ใช้รองรับการขยายตัวจะเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 3.3 ตารางค่าความเค้นดัด (Bending Stress) จากการคำนวณด้วยวิธี Kellogg

ขนาดท่อ (นิ้ว)	6	10	14	18	24
Sch. no	40	20	20	20	20
ผลวิธี Kellogg	7,850	10,240	16,538	21,352	28,417

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



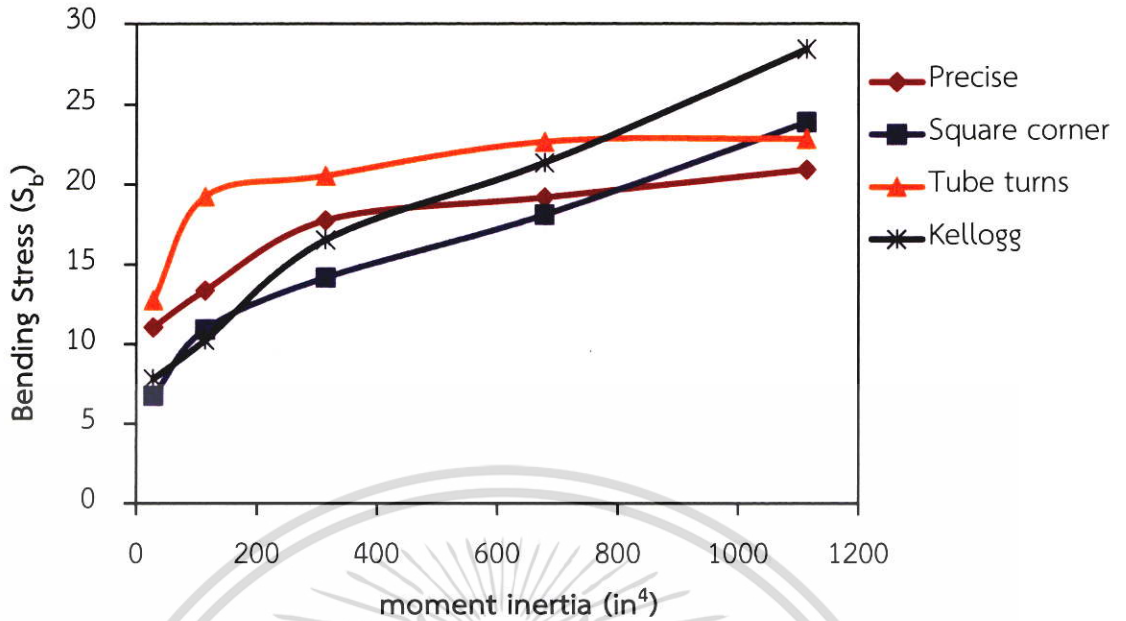
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ของความเค้นดัด (Bending Stress) ที่เกิดจากการขยายตัวของท่อร้อน กับ Moment Inertia จากวิธีของ Kellogg

จากรูปที่ 3.18 เป็นผลการคำนวณความเค้นดัด (Bending Stress) จากวิธีของ Kellogg จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัด (Bending Stress) สูงสุดกับ moment inertia ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่อมีความหนาท่อและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะมีค่าความเค้นดัดที่เกิดจากการขยายตัวของท่อร้อนเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 3.4 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณของค่าความเค้นดัด (Bending Stress)

ขนาดท่อ (นิ้ว)	6	10	14	18	24
Sch. no	40	20	20	20	20
ผลวิธี Kellogg	7,850	10,240	16,538	21,352	28,417
ผลวิธี Tube Turns	12,762	19,250	20,551	22,699	22,869
ผลวิธี Precise Com.	11,052	13,367	17,767	19,194	20,926
ผลวิธี Square Com.	6,747	10,914	14,166	18,112	23,892

หมายเหตุ ผลการคำนวณจากวิธี Tube Turns และวิธี Precise Com. และวิธี Square Com. นำผลจากหนังสือ Introduction to Pipe Stress Analysis มาใช้อ้างอิง[9]



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ของความเค้นดัด (Bending Stress) ที่เกิดจากการขยายตัวของท่อร้อน กับ Moment Inertia จากวิธีอื่นๆ หนังสือ Introduction to Pipe Stress Analysis [9] เทียบกับจากวิธีของ Kellogg

จากรูปที่ 3.19 เป็นการเปรียบเทียบความเค้นดัด (Bending Stress) จากวิธีของ Kellogg กับวิธีอื่นๆ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัด (Bending Stress) สูงสุดกับ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment inertia) ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่อมีความหนาท่อและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะมีค่าความเค้นดัดที่เกิดจากการขยายตัวของท่อร้อนเพิ่มมากขึ้นและสอดคล้องกันทุกวิธีการคำนวณ

บทที่ 4

การคำนวณหาค่าความเค้นที่ร้อนรูปแบบแอ็กซ์แพนชันรูป ด้วย ANSYS Workbench

ในการออกแบบท่อแอ็กซ์แพนชันรูปจะต้องออกแบบให้สามารถรับภาระแรงและความเค้นที่เท่ากับแอ็กซ์แพนชันรูป แต่การคำนวณรับภาระแรงและความเค้นในทางทฤษฎีของวิธี Kellogg เป็นแค่การคำนวณแบบพื้นฐาน มีขีดจำกัดในด้านสมมุติฐาน และการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต งานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมทางพานิชย์ ANSYS Workbench Version 16.0



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการขยายตัวทางความร้อนท่อ

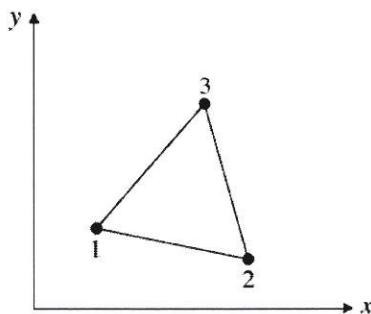
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหนึ่งในวิธีเชิงตัวเลขที่เราสามารถนำมาใช้ในการหาผลเฉลยแบบประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาต่าง ๆ โดยอาศัยแนวคิดหลักของการแบ่งโดเมนออกเป็นโดเมนย่อยที่ไม่ทับซ้อนกัน เรียกว่า เอลิเมนต์ (element) จากนั้นจึงทำการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งในการวิเคราะห์เราจะกำหนดให้ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์ถูกจัดเก็บเอาไว้ที่จุดต่อ (node) สุดท้ายเมื่อนำเอลิเมนต์ทั้งหมดมารวมกันเป็นโดเมน หรือที่เรียกว่าตาข่าย (mesh) ก็จะได้ระบบสมการพีชคณิตที่สามารถหาผลเฉลยได้โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสม แต่เนื่องจากผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยแบบประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ ดังนั้น ความแม่นยำของผลเฉลยจึงสามารถขึ้นกับหลายปัจจัย โดยปัจจัยหลักที่มีผลกระทบสูงก็คือขนาดของเอลิเมนต์ และฟังก์ชันการประมาณเอลิเมนต์ ซึ่งการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับแต่ละปัญหา จะมีผลต่อความแม่นยำและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยถ้าหากเราแบ่งโดเมนด้วยเอลิเมนต์ขนาดเล็กผลเฉลยที่ได้จะมีความแม่นยำสูงแต่ต้องใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก ในทางกลับกันถ้าหากเราแบ่งโดเมนด้วยเอลิเมนต์ขนาดใหญ่กว่า ผลเฉลยที่ได้จะมีความแม่นยำต่ำ แต่สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขในการกำหนดขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับปัญหาต่าง ๆ ซึ่งในรูป 4.1-4.3 แสดงตัวอย่างของเอลิเมนต์อย่างง่ายที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ในหนึ่ง สอง และสามมิติ อันประกอบด้วยเอลิเมนต์เชิงเส้นตรงหนึ่งมิติ เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมเชิงเส้นตรง (triangular element) และเอลิเมนต์ทรงเหลี่ยมสี่หน้าเชิงเส้นตรง (tetrahedral element) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมเชิงพาณิชย์ เราสามารถเลือกชนิดและกำลังของเอลิเมนต์ได้มากกว่าที่แสดงในหนังสือเล่มนี้ ซึ่งเป็นเนื้อหาที่อยู่นอกเหนือจากขอบเขตของหนังสือเล่มนี้และผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดสมบัติของเอลิเมนต์ชนิดต่าง ๆ ได้จากคู่มือการใช้งานของแต่ละโปรแกรม

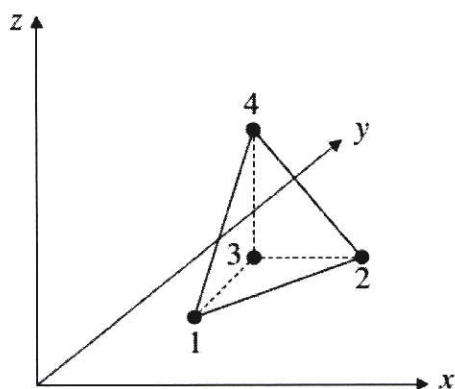


รูปที่ 4.2 เอลิเมนต์เชิงเส้นตรงหนึ่งมิติ



รูปที่ 4.3 เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมเชิงเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 เอลิเมนต์ทรงเหลี่ยมสี่หน้าเชิงเส้นตรง

4.1.1 ขั้นตอนของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการหาค่าความเค้นในเชิงการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นการหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ปัญหาด้านความเค้นของท่ออื่น ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ทางพานิชย์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก และเพิ่มส่วนที่ 4 ในกรณีต้องการความแม่นยำสูงขึ้น ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 (Pre-processing) เป็นขั้นตอนการเตรียมแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากปัญหาจริง โดยเริ่มจากการเตรียมแบบจำลองเชิงแนวคิด (conceptual model) การสร้างตาข่ายการกำหนดเงื่อนไขขอบ และการระบุภาระที่มากระทำกับแบบจำลอง สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมเชิงพาณิชย์โดยทั่วไป เราสามารถเตรียมการขั้นตอนนี้ได้โดยอาศัยความสามารถด้านกราฟิกและการสร้างตาข่ายของโปรแกรม ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ต้องการทำการวิเคราะห์ และทำการแบ่งโดเมนของแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ (Element) ต่อกัน โดยแต่ละเอลิเมนต์จะตัดกันที่จุดต่อ (Node) ที่เป็นตำแหน่งที่เราจะคำนวณหาค่าผลลัพธ์ของการขยายตัวและหดตัวได้แก่ ค่าความเค้น ค่าโมเมนต์ และ ค่าแรง เป็นต้น การแบ่งเอลิเมนต์การขยายตัวที่มีขนาดเล็กหรือมีความถี่มากเกินไปจะทำให้เพิ่มจำนวนจุดต่อที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่ามากขึ้นตามไปด้วย อันจะเป็นผลต่อเนื่องต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณและปริมาณหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้ก็จะมีค่าความแม่นยำสูงขึ้น ซึ่งผู้วิเคราะห์จะต้องเป็นผู้ตัดสินใจถึงความเหมาะสมก่อนการคำนวณ แล้วจึงกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ และการกำหนดสภาพเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของปัญหา

ขั้นตอนที่ 2 (FEM solver) เมื่อแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสร็จสมบูรณ์แล้ว ข้อมูลทั้งหมดของแบบจำลองก็จะถูกส่งต่อให้กับโปรแกรมที่ทำหน้าที่วิเคราะห์ปัญหา ซึ่งจะเริ่มด้วยการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ให้กับแต่ละเอลิเมนต์ ภาระที่มากระทำกับเอลิเมนต์จากนั้นจึงทำการประกอบเอลิเมนต์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน และกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งจะได้ระบบสมการพีชคณิตของปัญหาที่สามารถหาผลเฉลยได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขที่กำหนด

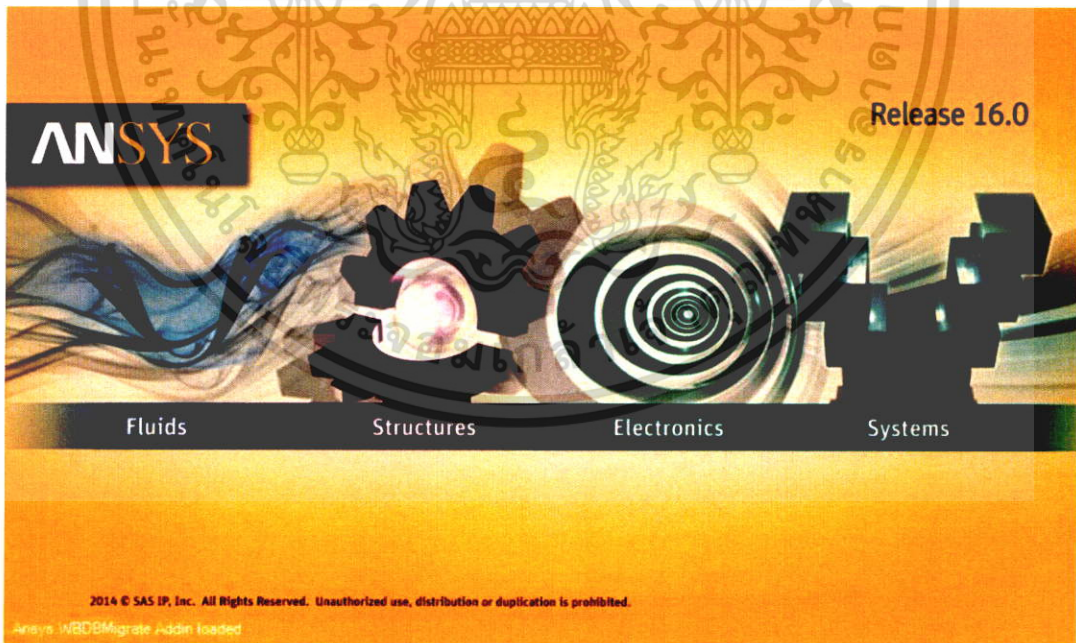
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 (Post-processing) เมื่อโปรแกรมได้ผลเฉลยที่จุดต่อแล้ว ลำดับถัดไปจะเป็นขั้นตอนการแสดงผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ที่ได้ในรูปแบบนั้น ๆ ผลลัพธ์ที่คำนวณได้เหล่านี้โดยปกติจะมีจำนวนมากซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนจุดต่อ (Node) และแสดงอยู่ในรูปของตัวเลข ซึ่งไม่สะดวกต่อการแปรข้อมูลที่ได้จากการคำนวณเพื่ออธิบายปรากฏการณ์การที่เกิดขึ้น ดังนั้นโดยทั่วไปมักจะแสดงผลลัพธ์เหล่านี้ในรูปแบบกราฟิก เช่น แผนภาพสีแสดงความเค้น (Stress Contour) บนชิ้นงานการพล็อตเวกเตอร์ (Vector) การพล็อตด้วยเส้นชั้น (Contour line) หรือ เส้นทางการเดินของอนุภาค (Streamline) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 (Adaptivity) กรณีที่ต้องการผลเฉลยที่มีความแม่นยำสูงขึ้น ให้ทำการเปรียบเทียบค่าตัวชี้วัดค่าความผิดพลาดของโดเมนกับค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ โดยถ้าหากมีค่าตัวชี้วัดค่าความผิดพลาดของโดเมนมีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ก็ทำการประยุกต์เทคนิคการสร้างตาข่ายแบบปรับตัวได้อัตโนมัติ และกลับเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ใหม่อีกครั้ง แต่ในทางตรงกันข้ามให้สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม

4.2 วิธีการคำนวณด้วย ANSYS Workbench

การคำนวณหาค่าความเค้นจากการขยายตัวของท่อคำนวณ โดยการจำลองท่อด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 16.0

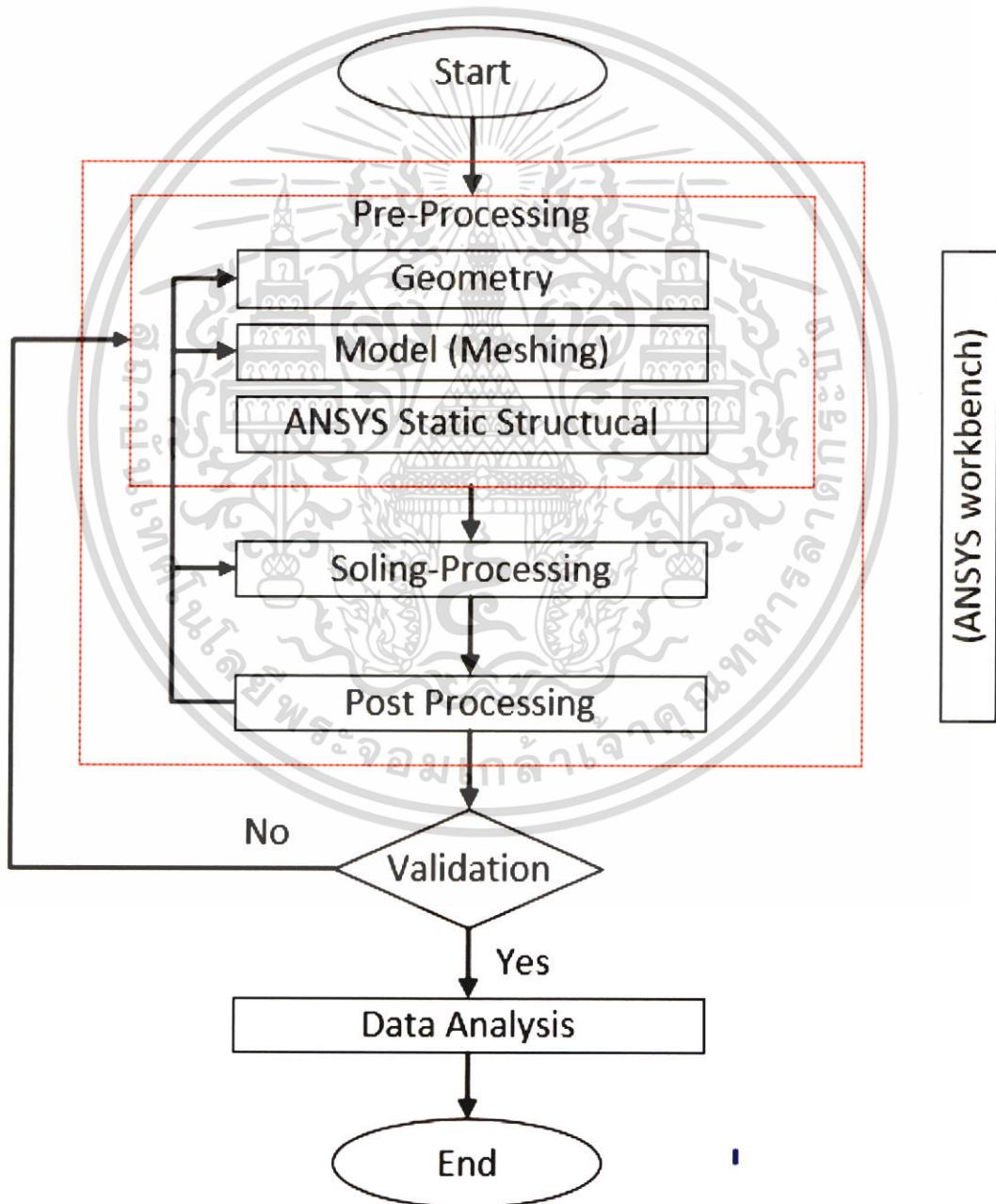


รูปที่ 4.5 โปรแกรม ANSYS Workbench 16.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การจำลองการไหลโดยใช้ โปรแกรม ANSYS Workbench 16.0

การจำลองหาค่าความเค้นจากการขยายตัวของท่อร้อนโดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench 16.0 นั้น จำเป็นต้องมีการวาดรูปทรงเรขาคณิตพร้อมทั้งสร้างกริดเพื่อใช้ในการแบ่งโดเมนที่เหมาะสมและอินทิเกรตภายในโดเมนนั้นให้เป็นเอลิเมนต์หรือตารางเล็กๆเพื่อที่จะสามารถใช้ฟังก์ชันชนิดต่างๆ สำหรับแทนลักษณะเอลิเมนต์หรือตารางเล็กๆนั้น ฟังก์ชันดังกล่าวจะถูกแทนลงไปในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการหาค่าความเค้นจากท่อร้อน ผนวกเข้ากับกระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อลดความผิดพลาดก่อให้เกิดระบบสมการเชิงพีชคณิตขนาดใหญ่ที่จำเป็นต้องแก้ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยหลักการทำงานสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก

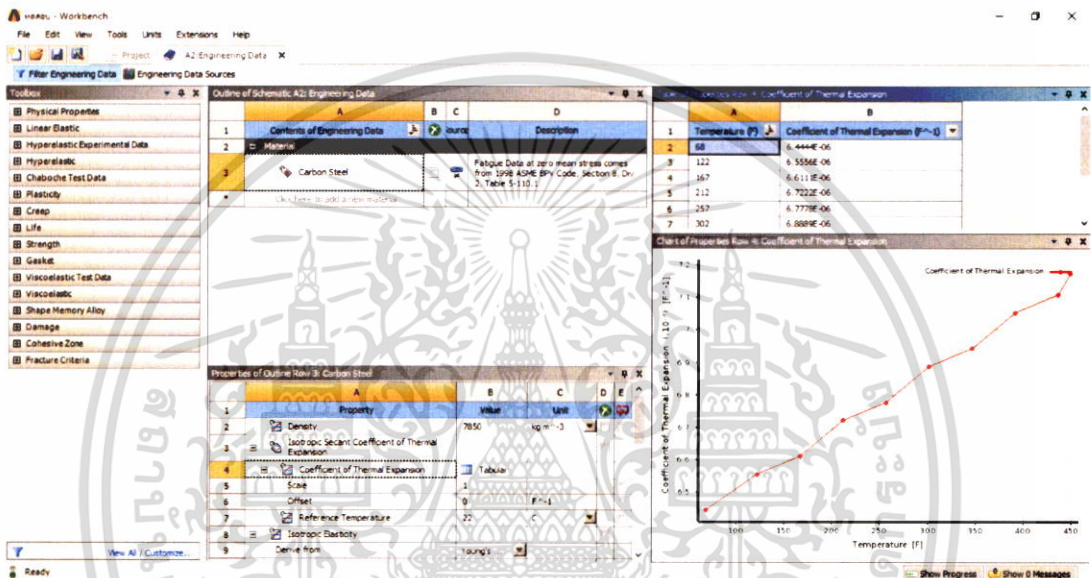


รูปที่ 4.6 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ANSYS Workbench

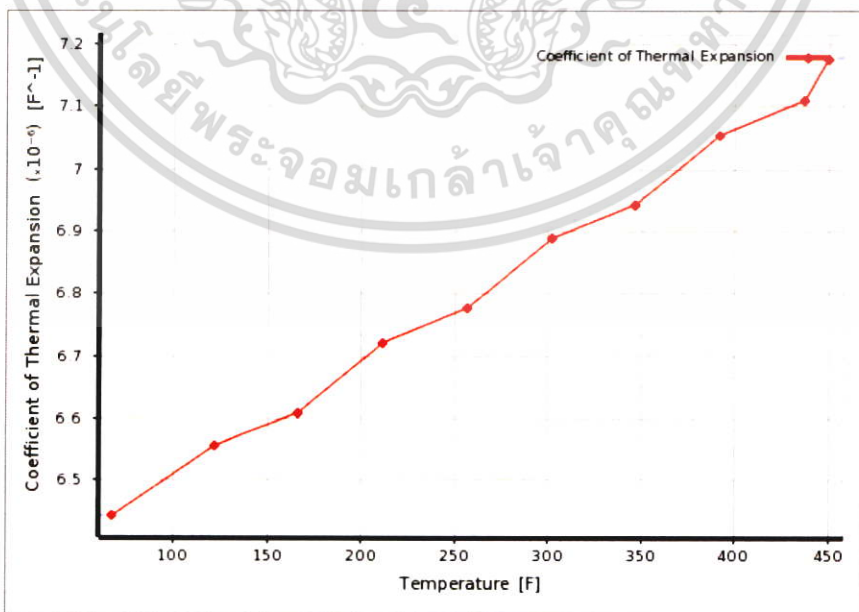
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processing)

การสร้างรูปทรง (Creating Geometry) แบบจำลองเสมือนจริงทางคอมพิวเตอร์และการกำหนดสภาพเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ที่ต้องการ โดยเริ่มจากการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุท่อเหล็กคาร์บอน (Carbon Steel) โดยมีโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) เท่ากับ 29×10^6 Psi ค่าความหนาแน่น (Density) เท่ากับ 490 lbm/ft^3 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) เท่ากับ 0.3 และคุณสมบัติทางความร้อนของท่อเหล็ก คาร์บอน ดังรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8



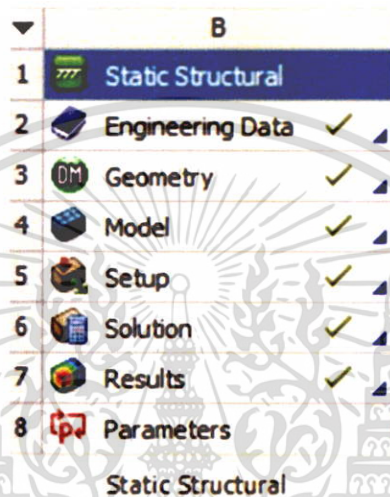
รูปที่ 4.7 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของท่อเหล็ก คาร์บอน ในโปรแกรม ANSYS Workbench



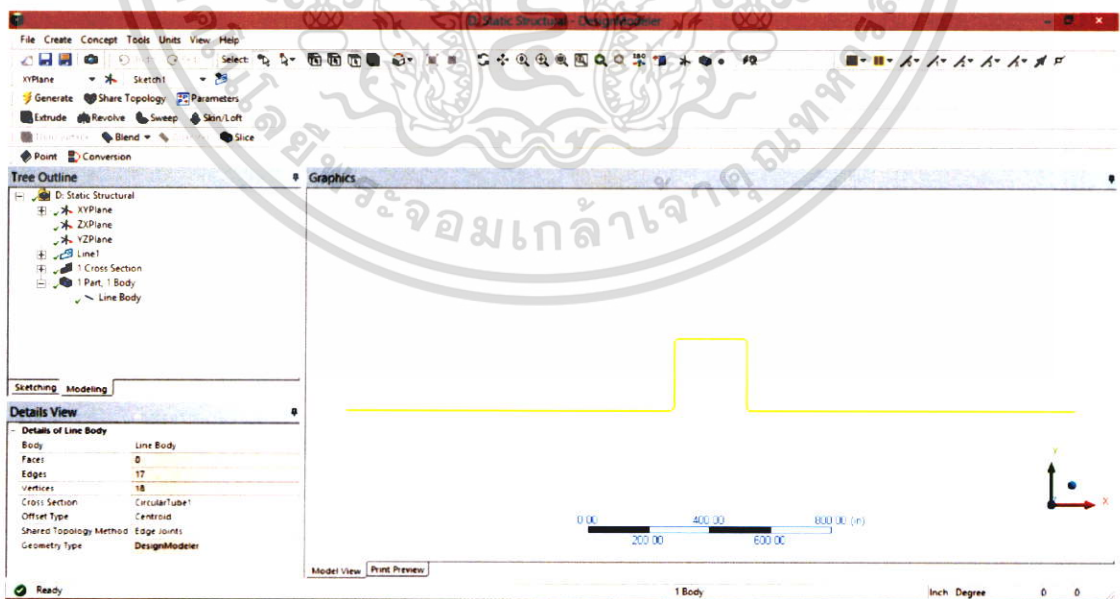
รูปที่ 4.8 แสดงการกำหนดคุณสมบัติทางความร้อนของท่อเหล็ก คาร์บอน ในโปรแกรม ANSYS Workbench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างรูปแบบจำลอง (Creating Geometry) เป็นทำการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณ โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench Version 16.0. ในรูปแบบ Static Structural โดยกำหนดรูปร่างแบบ Beam and Shell Element เป็นแบบ Line Body ในการสร้างกริดเซลล์คำนวณ (Meshing) เป็นเอลิเมนต์เชิงเส้นตรงหนึ่งมิติ ในรูปแบบ Edge Sizing เพื่อช่วยลดความหนาแน่นของกริดซึ่งจะช่วยลดภาระและเวลาในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ แต่ผลลัพธ์ที่ได้ยังมีความแม่นยำ

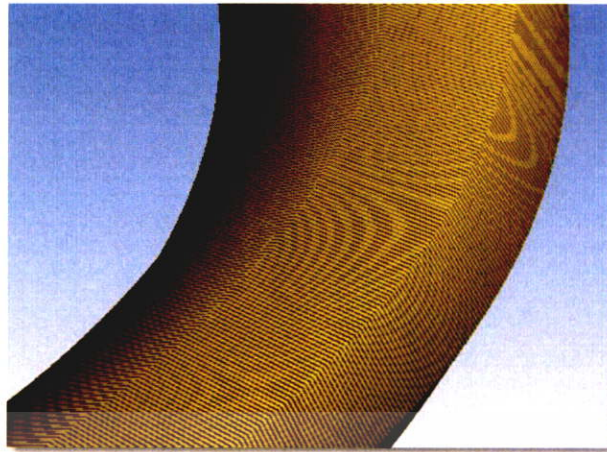


รูปที่ 4.9 แสดงการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench Version 16.0 แบบ Static Structural



รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop- Symmetrical shaped สร้างแบบจำลอง (Creating Geometry) เป็น Line Body ในโปรแกรม ANSYS Workbench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

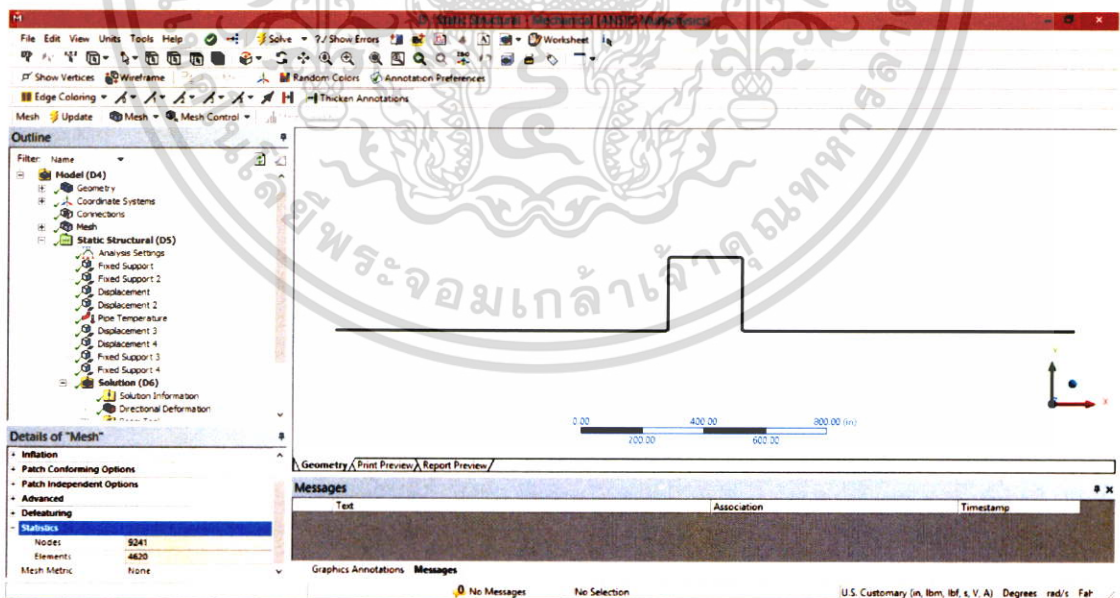


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะของเอลิเมนต์เชิงเส้นตรงหนึ่งมิติ ในรูปแบบ Edge Sizing



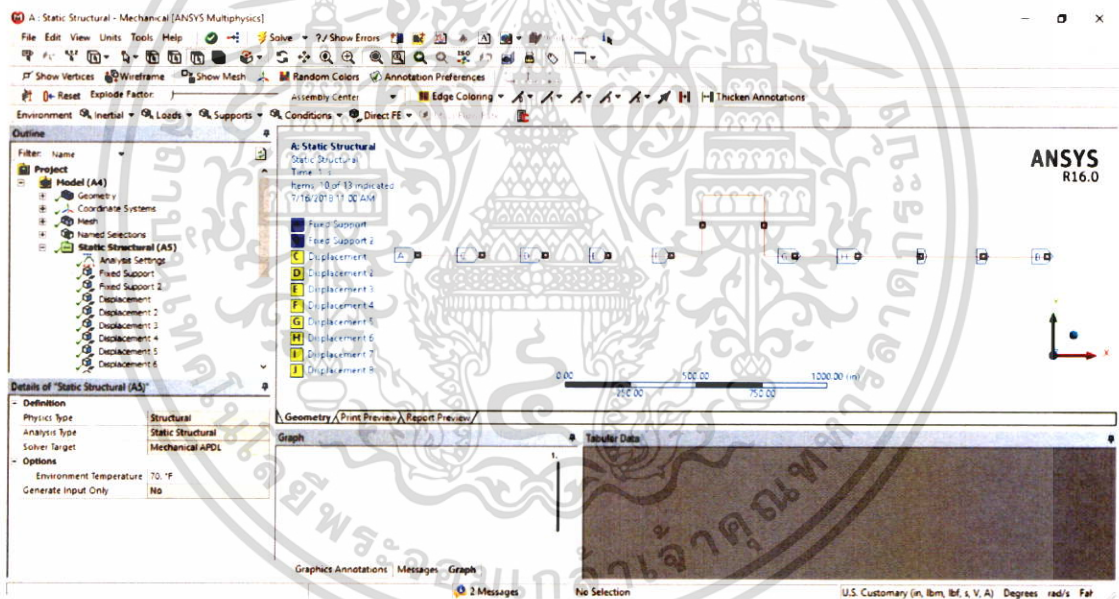
รูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่างลักษณะของเอลิเมนต์แบบ Edge Sizing ของท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop-Symmetrical shaped ประกอบด้วย 9,241 จุดต่อ (Node) และ 4,620 เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ขั้นตอนการคำนวณผลของไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solving-Processing)

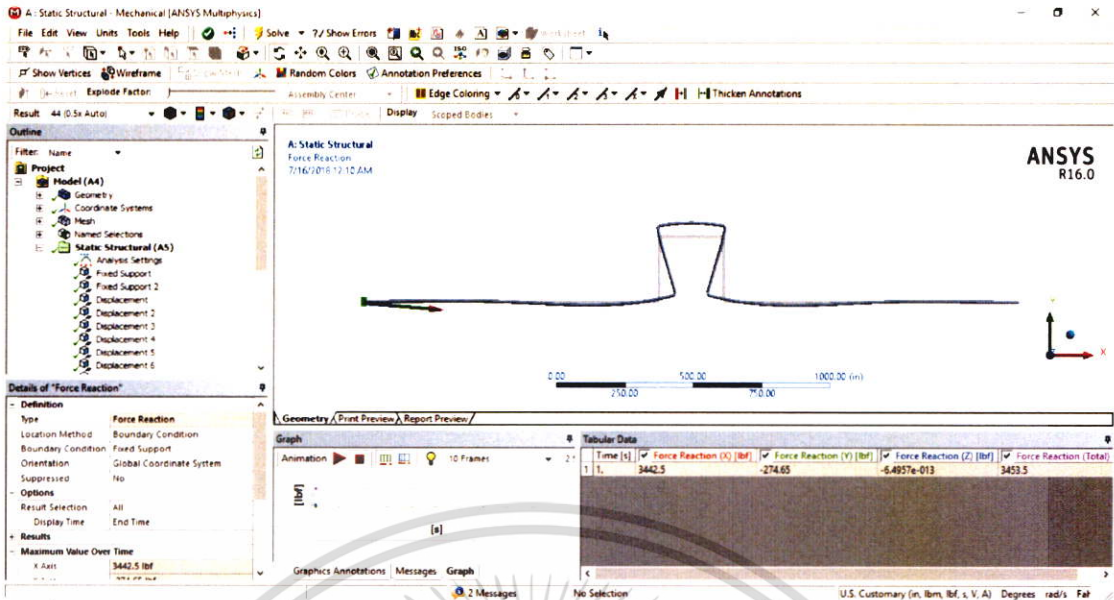
เป็นขั้นตอนการนำรูปทรงเสมือนจริงที่ทำการสร้างกริดแล้วเข้าสู่การกำหนดค่าต่างๆที่จำเป็นต่อการคำนวณ มีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

1. กำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ เป็นการตั้งค่ากำหนดเงื่อนไขควบคุมต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ อุณหภูมิติดตั้งภายนอก 70 °F และอุณหภูมิที่ที่ใช้ในการคำนวณ 150°F, 300°F และ 450°F และกำหนดจุดรับหรือจุดยึด (Support)
2. กำหนดเงื่อนไขการคำนวณหาค่าแรงจากการขยายตัวของท่อร้อนเป็นรูปแบบ Force Reaction ใช้คำนวณหาค่าแรงสูงสุดแนวแกน X
3. กำหนดเงื่อนไขการคำนวณหาค่าความเค้นตัดจากการขยายตัวของท่อร้อนรูปแบบ Bending Stress
4. กำหนดเงื่อนไขการคำนวณหาค่าความความยืดการขยายตัวของท่อร้อนรูปแบบ Deformation Probe

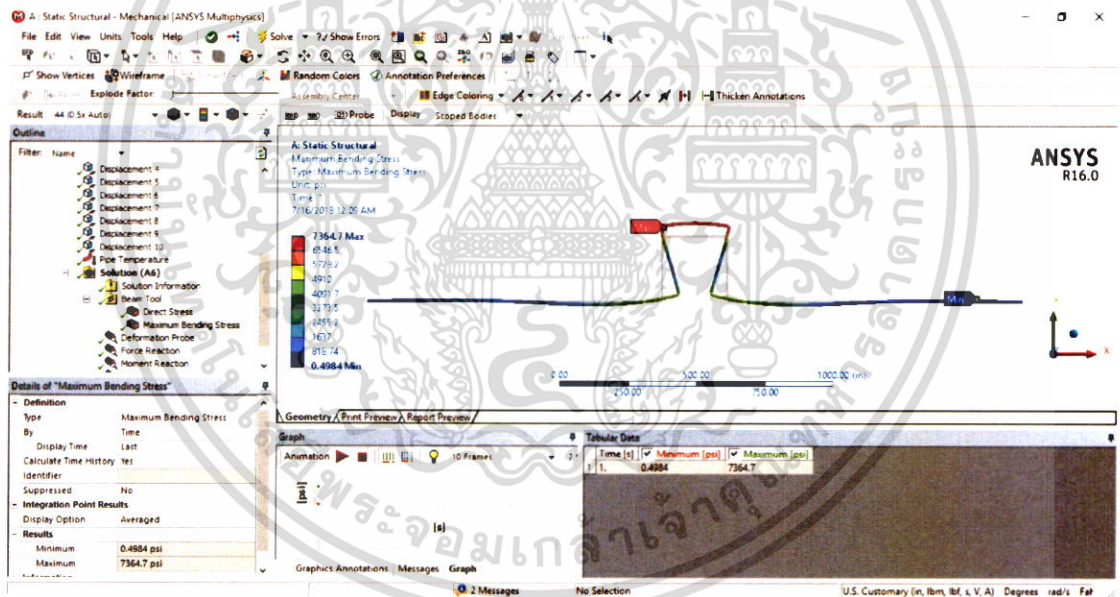


รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างการกำหนดเงื่อนไข Input Controls ของท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop-Symmetrical shaped ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

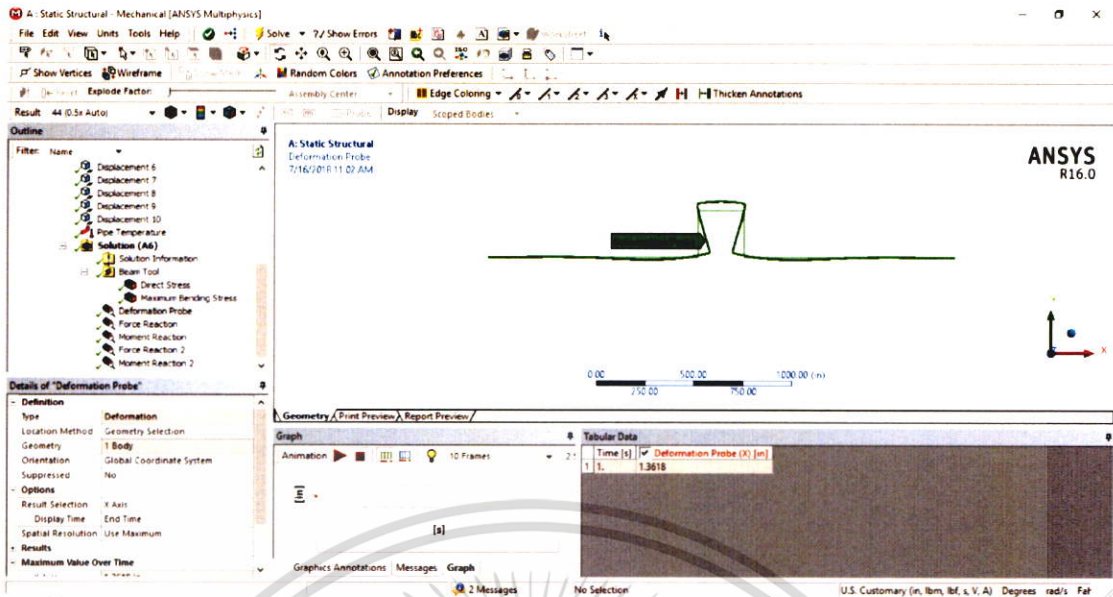


รูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างการนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์หาค่าแรงของท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop-Symmetrical shaped ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench



รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างการนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์หาค่าความเค้นของท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop-Symmetrical shaped ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench

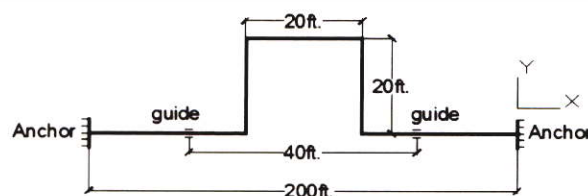
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างการนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์ค่าแรงของท่อ 6 นิ้ว Sch. No 40 รูป Loop-Symmetrical shaped ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench

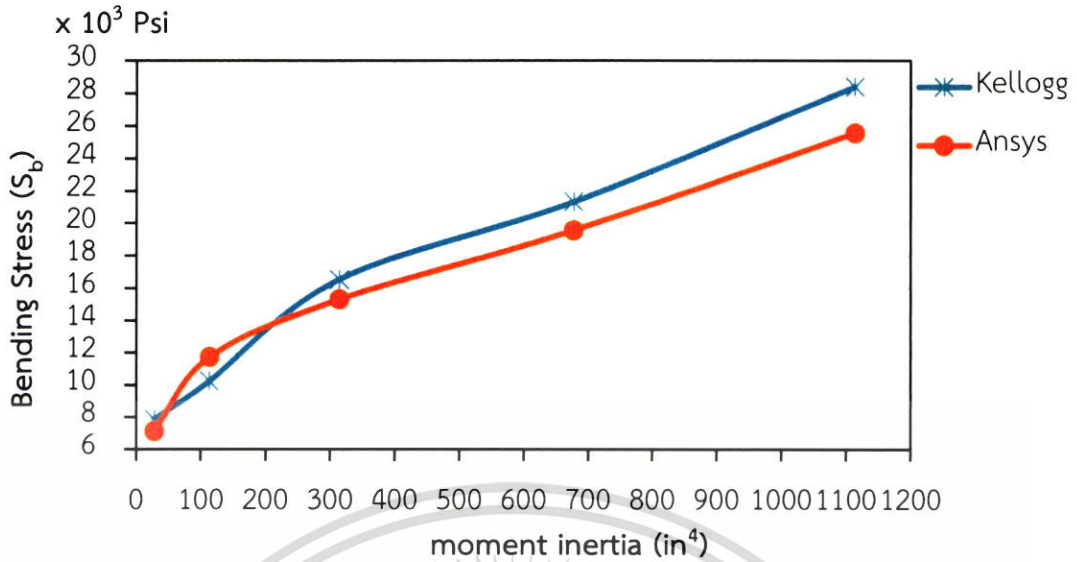
4.3 การทวนสอบโมเดลรูปแบบการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench

นำโมเดลการจำลองจาก Ansys มาจำลองเทียบกับการงานการคำนวณของ Kellogg [9] ซึ่งเป็น การคำนวณค่าความเค้นที่ร้อนรูปแบบแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) แบบพื้นฐานของท่อ เหล็ก-คาร์บอนที่มีท่อขนาด 6 นิ้ว Schedule 40 และท่อขนาด 10, 14, 18 และ 24 นิ้ว Schedule 20 ที่อุณหภูมิ 450°F โดยมีความยาวท่อจากจุดยึด Anchor – Anchor เท่ากับ 200 ฟุต ดังแสดงใน รูปที่ 4.19 ซึ่งพบว่า สอดคล้องกันผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench เทียบ กับผลที่ได้จากการคำนวณของ Kellogg ท่อขนาด 6 นิ้ว Schedule 40 มีค่าคลาดเคลื่อน 9.2 เปอร์เซ็นต์ ท่อขนาด 10 นิ้ว Schedule 20 มีค่าคลาดเคลื่อน 9.8 เปอร์เซ็นต์ ท่อขนาด 14 นิ้ว Schedule 20 มีค่าคลาดเคลื่อน 7.4 เปอร์เซ็นต์ ท่อขนาด 18 นิ้ว Schedule 20 มีค่าคลาดเคลื่อน 8.3 เปอร์เซ็นต์ และท่อขนาด 24 นิ้ว Schedule 20 มีค่าคลาดเคลื่อน 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเมื่อการ ยืนยันผลสามารถยอมรับได้จึงนำกริดและวิธีการที่ได้ไปใช้ต่อในการจำลองการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench



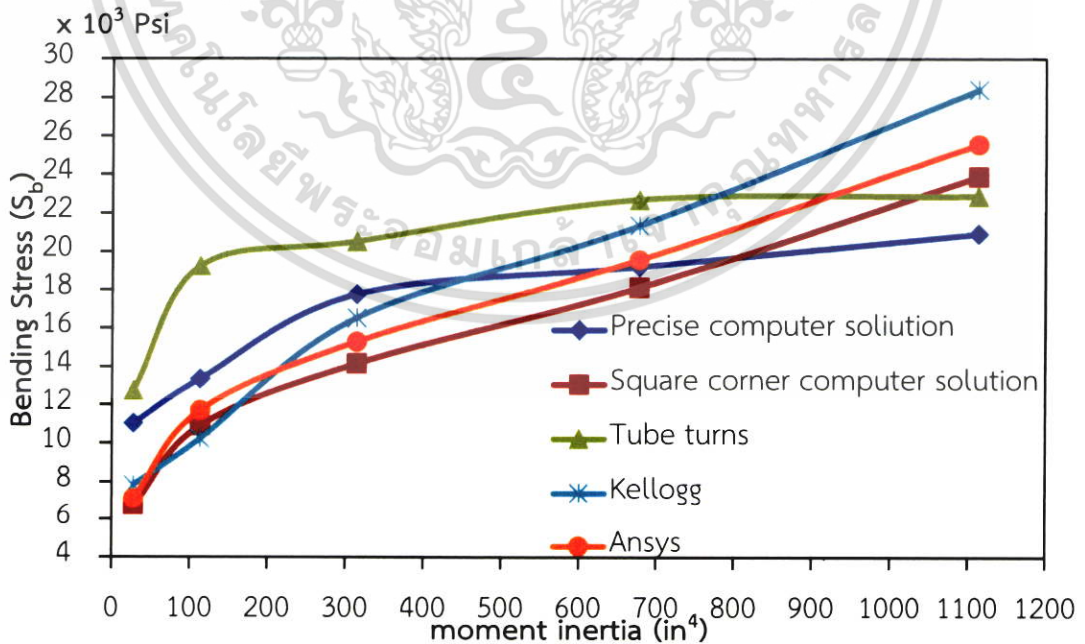
รูปที่ 4.17 แสดงขนาด ของท่อ Expansion Loop Symmetrical shaped เพื่อการทวนสอบผล คำนวณจาก ANSYS Workbench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นของท่อ Expansion Loop Symmetrical shaped จากวิธี Kellogg เทียบกับโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิท่อ 450°F

นอกจากนี้ยังได้นำโมเดลการจำลองจาก Ansys มาจำลองเทียบกับการงานการคำนวณการคำนวณค่าความเค้นท่อร้อนรูปแบบแอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) ของวิธีอื่นๆ โดย Sam Kannappan P.E. ได้รวบรวมไว้ในหนังสือ Introduction to Pipe Stress Analysis เช่น วิธีของ Tube turns วิธีของ Precise computer solution และวิธีของ Square corner computer solution [9] ดังรูปด้านล่างนี้

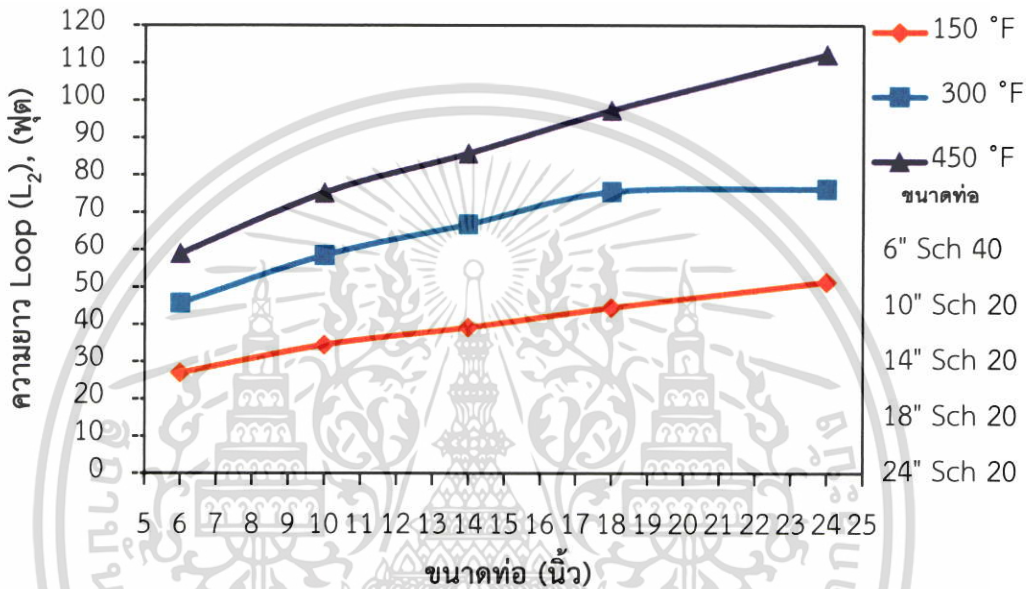


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นของท่อ Expansion Loop Symmetrical shaped จากวิธีอื่นๆ เทียบกับโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิท่อ 450°F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลลัพธ์จากการคำนวณจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench

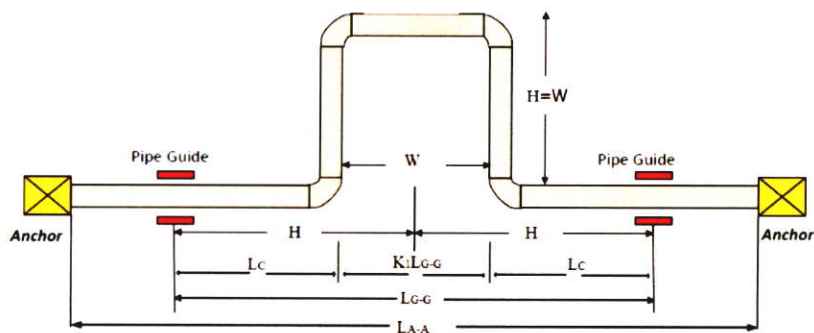
ทำคำนวณท่อขนาด 6 นิ้ว Schedule 40 และท่อขนาด 10,14,18 และ 24 นิ้ว Schedule 20. โดยความยาวรวมของท่อจากจุดยึด Anchor – Anchor (L_{AA}) เท่ากับ 200 ฟุต ที่อุณหภูมิติดตั้งภายนอก 70 °F และอุณหภูมิท่อที่ใช้ในการคำนวณ 150°F, 300°F และ 450°F และที่มีขนาดความยาว Loop เท่ากับ ($L_2 = 2H+W$)



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวเอ็กซ์แพนชันลูป (L_2) กับขนาดท่อ

จากรูปที่ 4.20 เป็นผลการคำนวณจากโปรแกรม ANSYS Workbench จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวเอ็กซ์แพนชันลูป (L_2) กับขนาดท่อ และเห็นได้ว่า เมื่อขนาดท่อและอุณหภูมิของท่อเพิ่มขึ้น ความยาว Loop ที่ใช้รองรับการขยายตัวจะเพิ่มขึ้นด้วย

4.4.1 กรณี $H=W$



รูปที่ 4.21 แสดงรูปแบบ Symmetrical loop ($H=W$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์จากโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิห้อง 150°F กรณี H=W

Pipe Size	L _{A-A} (ft)	L _{G-G} (ft)	L _c (ft)	L ₂ (ft)	H (ft)	W (ft)	Loop Defection (in)	Bending Stress (Psi)	Force Reaction (lbf)
6" Sch40	200	18.0	4.5	27.0	9.0	9.0	0.279	6589.3	5898.9
10" Sch20	200	23.0	5.7	34.5	11.5	11.5	0.274	6664.8	12102.0
14" Sch20	200	26.2	6.5	39.2	13.1	13.1	0.268	6741.1	23288.0
18" Sch20	200	29.7	7.4	44.5	14.8	14.8	0.262	6842.7	35110.0
24" Sch20	200	34.3	8.6	51.5	17.2	17.2	0.254	6973.6	65737.0

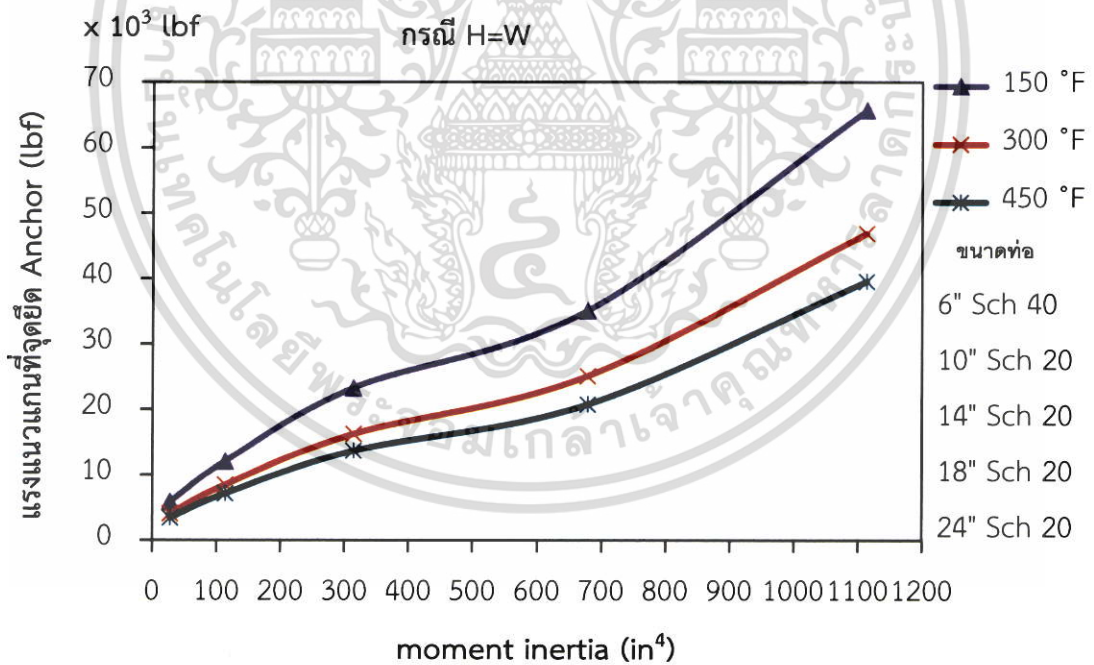
ตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์จากโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิห้อง 300°F กรณี H=W

Pipe Size	L _{A-A} (ft)	L _{G-G} (ft)	L _c (ft)	L ₂ (ft)	H (ft)	W (ft)	Loop Defection (in)	Bending Stress (Psi)	Force Reaction (lbf)
6" Sch40	200	30.5	7.6	45.7	15.2	15.2	0.819	7112.5	4118.7
10" Sch20	200	39.0	9.7	58.5	19.5	19.5	0.805	7265.1	8501.1
14" Sch20	200	44.5	11.1	66.7	22.2	22.2	0.787	7349.5	16285.0
18" Sch20	200	50.3	12.6	75.5	25.2	25.2	0.771	7527.8	25139.0
24" Sch20	200	50.8	12.7	76.2	25.4	25.4	0.747	7655.3	46893.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

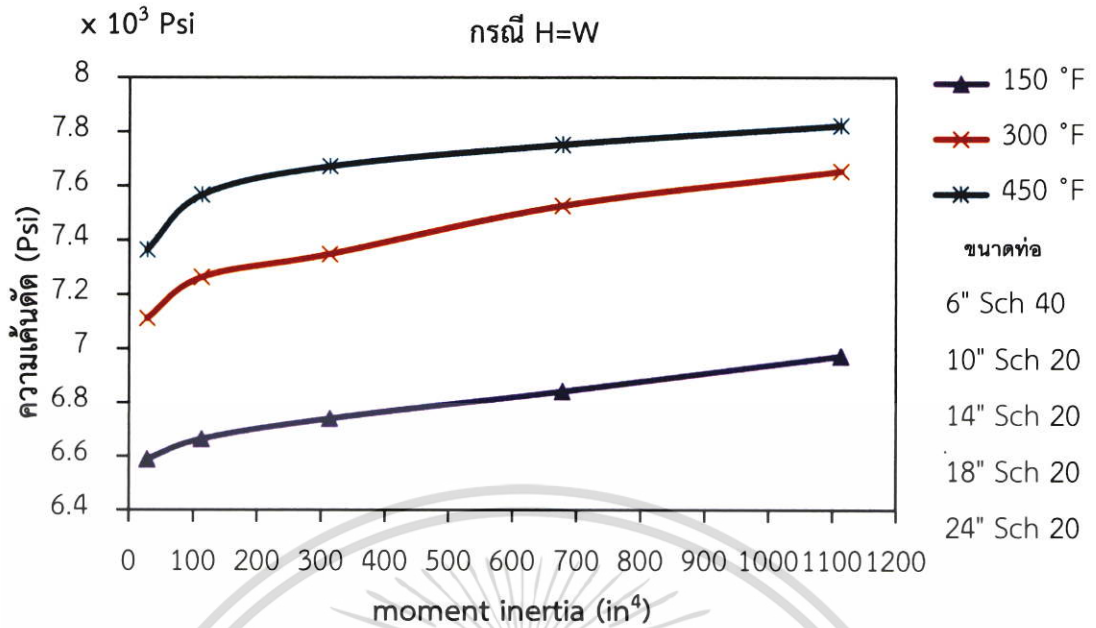
ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์จากโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิที่ 450°F กรณี H=W

Pipe Size	L _{A-A} (ft)	L _{G-G} (ft)	L _c (ft)	L ₂ (ft)	H (ft)	W (ft)	Loop Defection (in)	Bending Stress (Psi)	Force Reaction (lbf)
6" Sch40	200	39.3	9.8	59.0	19.7	19.7	1.362	7364.7	3442.5
10" Sch20	200	50.2	12.5	75.2	25.1	25.1	1.331	7566.7	7140.9
14" Sch20	200	57.2	14.3	85.7	28.6	28.6	1.298	7673.4	13705.0
18" Sch20	200	64.8	16.2	97.2	32.4	32.4	1.266	7751.9	20776.0
24" Sch20	200	74.8	18.7	112.2	37.4	37.4	1.219	7823.2	39564.0

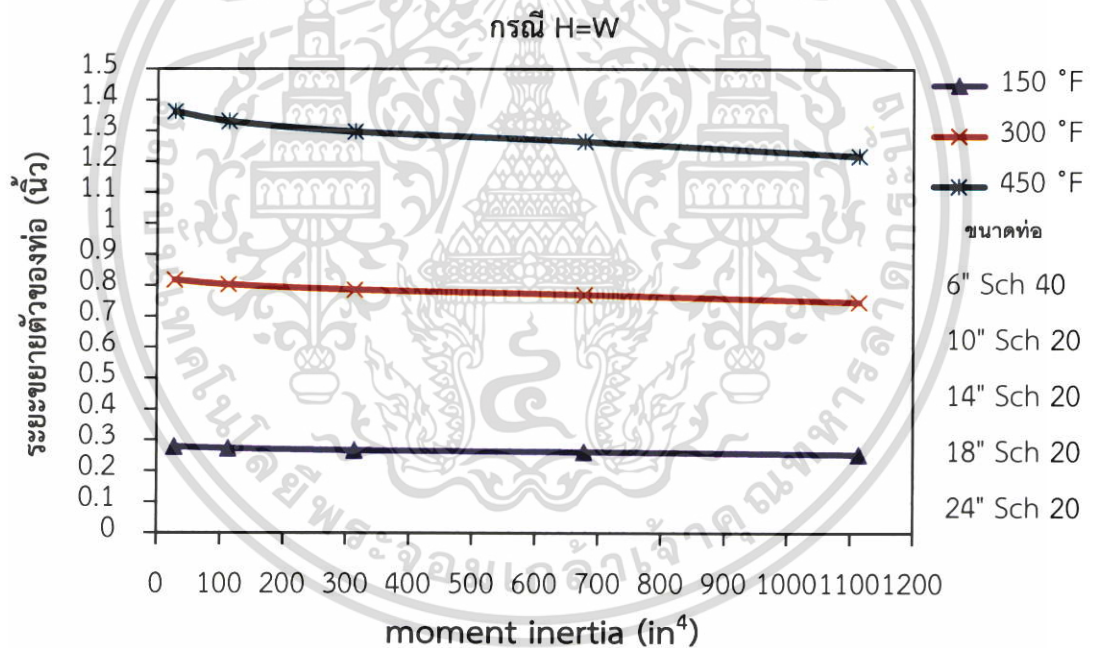


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวแกน (F_x) กับ moment inertia กรณี H=W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

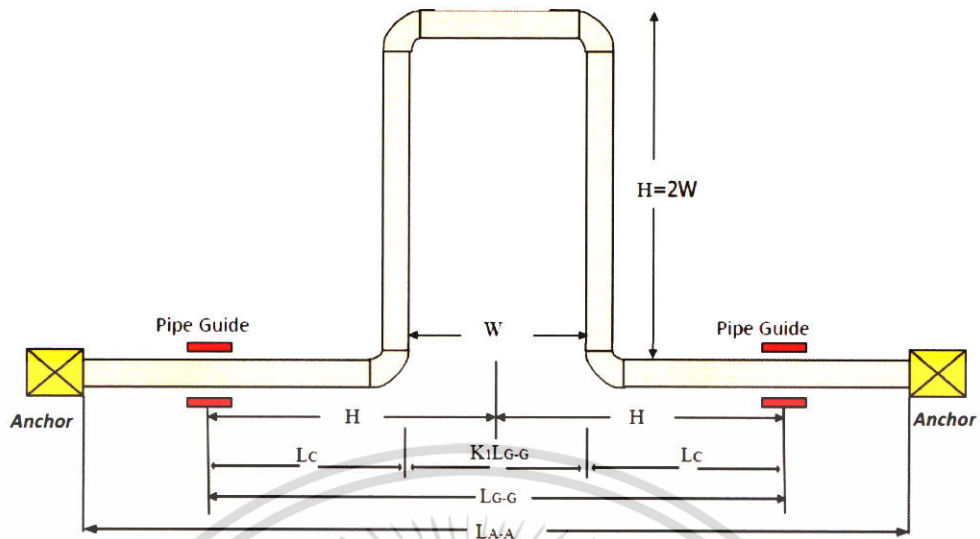


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดสูงสุดกับ moment inertia กรณีสี่ H=W



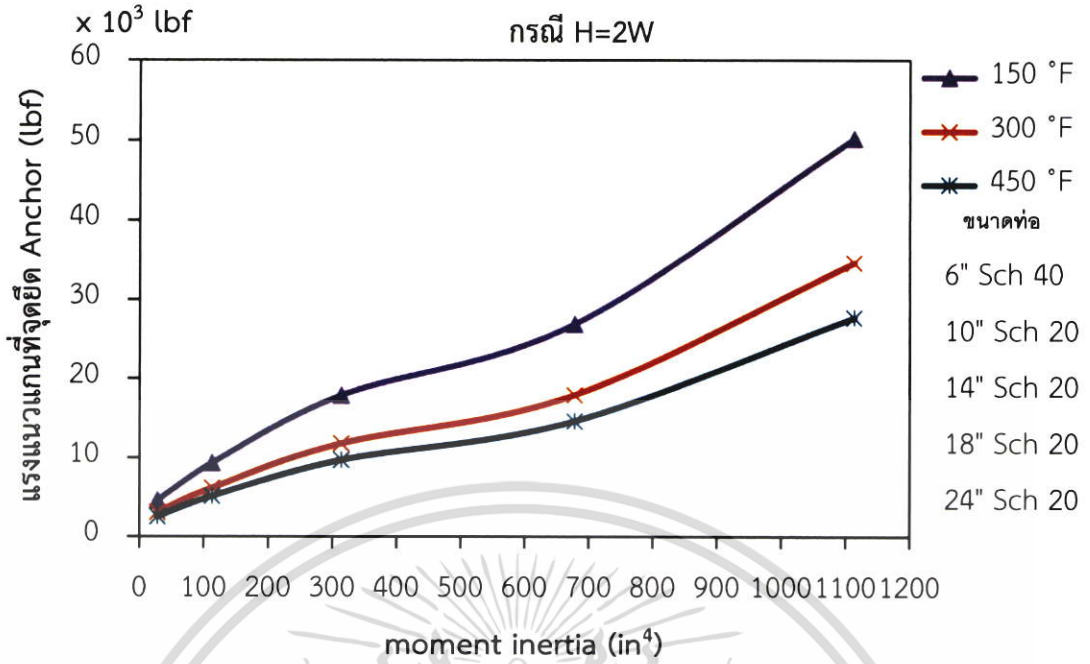
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะขยายตัวของท่อ (Deformation) กับ moment inertia กรณีสี่ H=W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

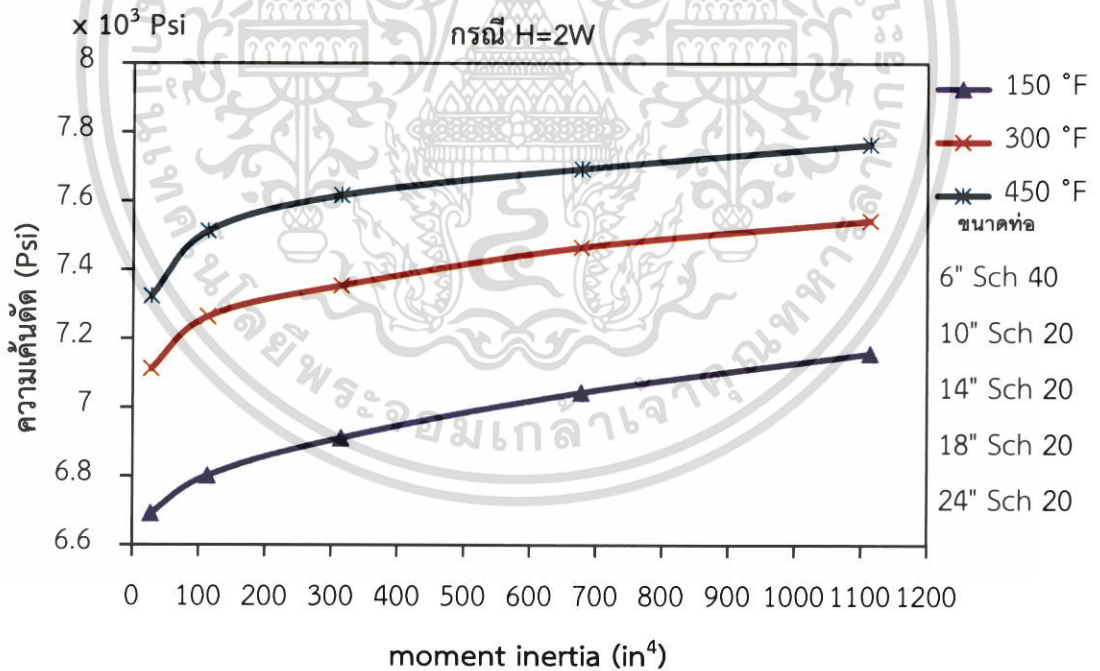
4.4.2 กรณี $H=2W$ รูปที่ 4.25. แสดงรูปแบบ Symmetrical loop ($H=2W$)ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์จากโปรแกรม ANSYS Workbench ที่อุณหภูมิห้อง 150°F กรณี $H=2W$

Pipe Size	L_{A-A} (ft)	L_{G-G} (ft)	L_c (ft)	L_2 (ft)	H (ft)	W (ft)	Loop Defection (in)	Bending Stress (Psi)	Force Reaction (lbf)
6" Sch40	200	21.6	8.1	27.0	10.8	5.4	0.286	6692.4	4596.6
10" Sch20	200	27.6	10.3	34.5	13.8	6.9	0.284	6802.0	9334.9
14" Sch20	200	31.4	11.8	39.2	15.7	7.8	0.279	6912.2	17896.0
18" Sch20	200	35.6	13.3	44.5	17.8	8.9	0.275	6944.4	26890.0
24" Sch20	200	41.2	15.4	51.5	20.6	10.3	0.269	6917.8	50242.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

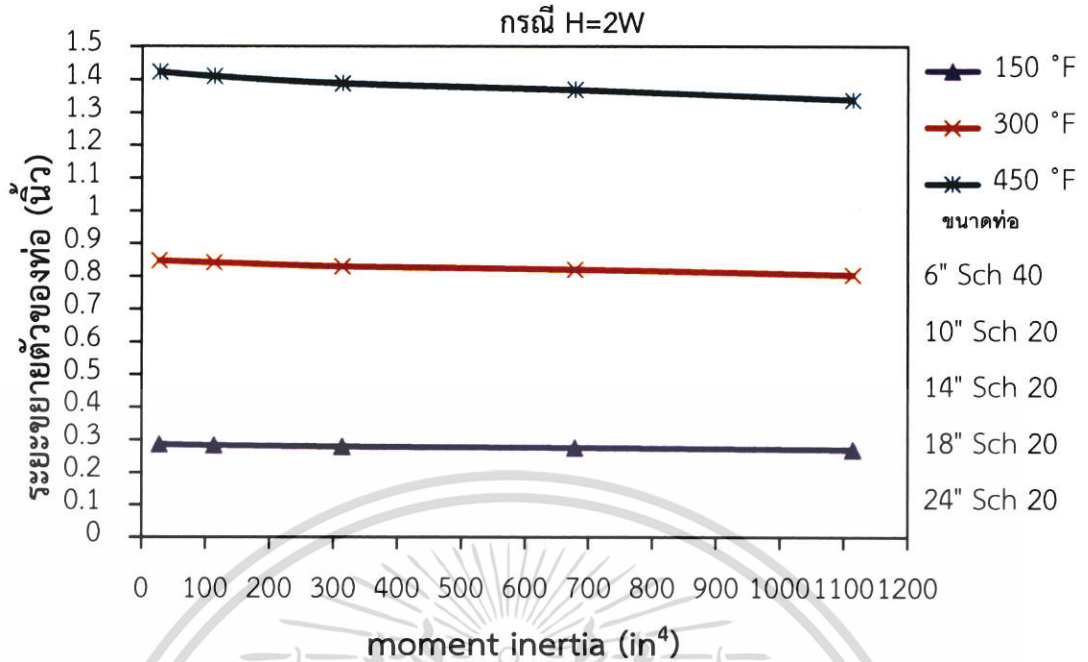


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวแกน (Axial Reacting Force, F_x) กับ moment inertia กรณี H=2W



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดสูงสุด (Bending Stress) กับ moment inertia กรณี H=2W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะขยายตัวของท่อ (Deformation) กับ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment inertia) กรณี H=2W

จากรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.26 เป็นผลการคำนวณจากโปรแกรม ANSYS Workbench จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวแกน (Axial Reacting Force, Fx) กับ moment inertia ในกรณี H=W และกรณี H=2W ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่อมีความหนาท่อเพิ่มขึ้น ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (moment inertia) แรงที่เกิดจากการขยายตัวกระทำที่จุดยึด Anchor ในแนวแกน X เพิ่มมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแรงที่เกิดจากการขยายตัวกระทำที่จุดยึด Anchor ในแนวแกน X เพิ่มมากขึ้นด้วย

จากรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.27 เป็นผลการคำนวณจากโปรแกรม ANSYS Workbench จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัด (Bending Stress) สูงสุดกับ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment inertia) ในกรณี H=W และกรณี H=2W ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่อมีความหนาท่อและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะมีค่าความเค้นดัดที่เกิดจากการขยายตัวของท่อร้อนเพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.28 เป็นผลการคำนวณจากโปรแกรม ANSYS Workbench จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะขยายตัวของท่อ (Deformation) กับ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment inertia) ในกรณี H=W และกรณี H=2W ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่อมีความหนาท่อและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะมีค่าความเค้นดัดที่เกิดจากการขยายตัวของท่อร้อนเพิ่มมากขึ้น

บทที่ 5

ฐานข้อมูลเอ็กซ์แพนชันลูปด้วยโปรแกรม Excel

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำผลลัพธ์จากการคำนวณจากโปรแกรม ANSYS Workbench มาสร้างเป็นฐานข้อมูล เพื่อใช้เป็นเครื่องมือให้มีความสะดวกและรวดเร็วในการหาขนาดและค่าความเค้นตัดของเอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loop) โดยใช้โปรแกรม Excel

5.1 โปรแกรมเอ็กเซล Excel

เอ็กเซล คือโปรแกรมที่ เหมาะกับงานด้านการคำนวณ การติดตามการหาค่าสูตรต่างๆการสร้างกราฟ โดยที่ เมื่อเปลี่ยนแปลงตัวเลขใดๆ โปรแกรมจะทำการคำนวณสูตรที่เชื่อมโยงกับตัวเลขนั้นๆให้อัตโนมัติ ในการทำงานของโปรแกรมจะใช้ตารางตามแนวตั้ง (columns) และแนวนอน (rows) เป็นหลัก ในลักษณะที่ง่ายต่อการใช้งาน ลักษณะของการเขียนสมการคำนวณในโปรแกรม การวิเคราะห์ข้อมูลการแสดงผลในรูปแบบทั่วไป แบบคณิตศาสตร์วิศวกรรม การนำเอ็กเซลไปประยุกต์ใช้งานสะดวกต่อการคำนวณและการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้และสามารถจัดข้อมูลต่างๆ ได้อย่างเป็นหมวดหมู่และเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น

5.1.1 คุณสมบัติที่สำคัญในโปรแกรมเอ็กเซล

5.1.1.1 ความสามารถด้านการคำนวณ Excel สามารถป้อนสูตรการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เช่น บวก ลบ คูณ หาร เป็นต้น รวมทั้งสูตรคำนวณด้านอื่น ๆ และจุดเด่นของการคำนวณคือผลลัพธ์ของการคำนวณจะเปลี่ยนแปลงตาม เมื่ออินพุตที่นำมาเปลี่ยนค่า ทำให้เราไม่ต้องเสียเวลาเปลี่ยนแปลงค่าผลการคำนวณใหม่

5.1.1.2 ความสามารถด้านการใช้ฟังก์ชัน นอกจากการป้อนสูตรคุณทางคณิตศาสตร์แล้ว Excel ยังสามารถป้อนฟังก์ชันอื่น ๆ ได้อีก เช่น ฟังก์ชันเกี่ยวกับตัวอักษร ตัวเลข วันที่ ฟังก์ชันเกี่ยวกับการเงินหรือการตัดสินใจ

5.1.1.3 ความสามารถในการสร้างกราฟ Excel สามารถนำข้อมูลที่ป้อนลงในตารางมาสร้างเป็นกราฟได้ทันที มีรูปภาพให้เลือกใช้งานหลายรูปแบบตามความเหมาะสม เช่น กราฟแท่งแสดงยอดขายแต่ละเดือน กราฟวงกลม แสดงส่วนแบ่งการตลาด เป็นต้น

5.1.1.4 ความสามารถในการตกแต่งตารางข้อมูล Excel สามารถตกแต่งตารางข้อมูลหรือกราฟข้อมูลด้วยภาพสีและรูปแบบตัวอักษรต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความสวยงามและแยกแยะข้อมูลได้ง่ายขึ้น

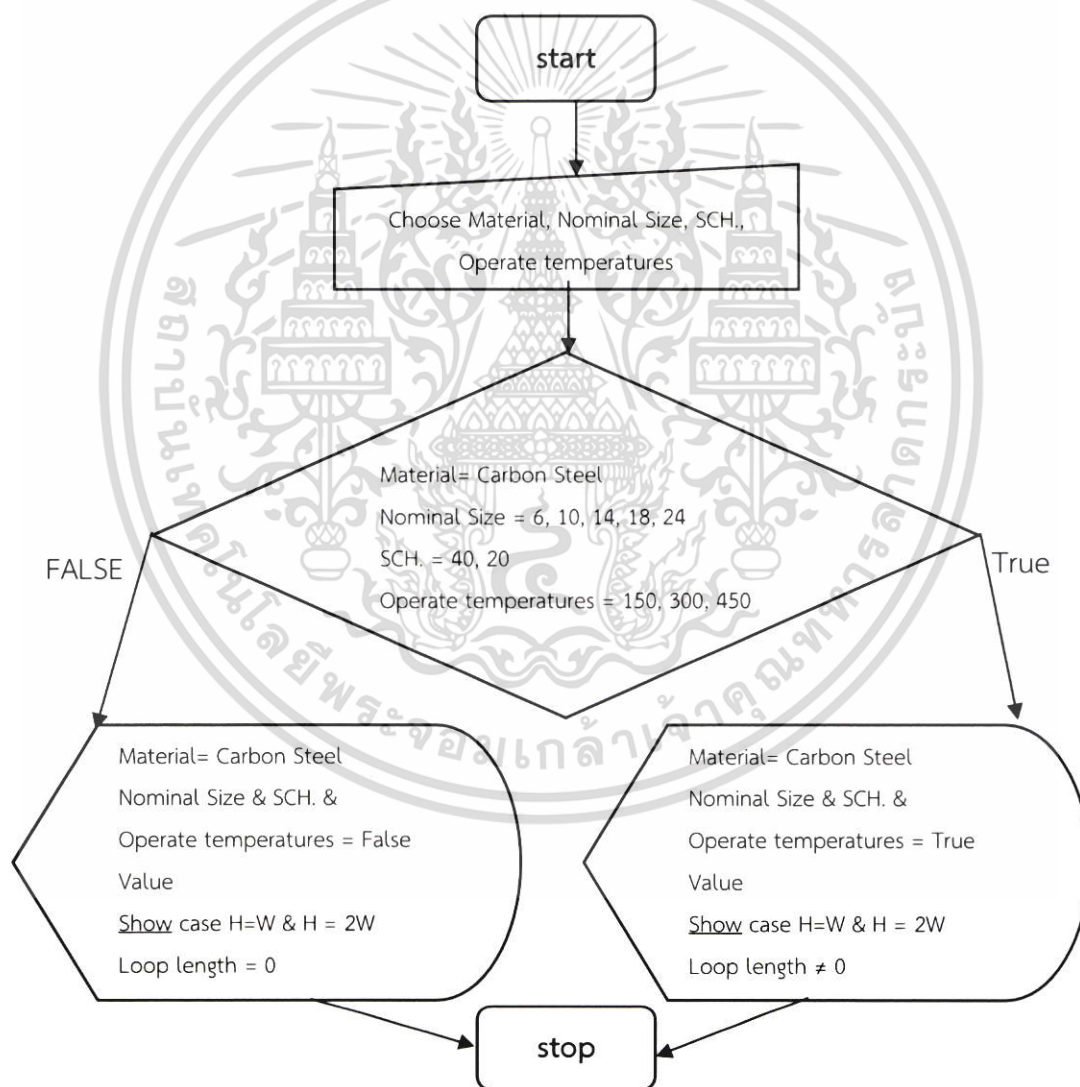
5.1.1.5 ความสามารถในการจัดเรียงลำดับ Excel สามารถคัดเลือกเฉพาะข้อมูลที่ต้องการมาวิเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.6 ความสามารถในการพิมพ์งานออกทางเครื่องพิมพ์ Excel สามารถพิมพ์งานทั้งข้อมูลและรูปภาพหรือกราฟออกทางเครื่องพิมพ์ได้ทันที ซึ่งทำให้ง่ายต่อการสร้างรายงาน

5.1.1.7 ความสามารถในการแปลงข้อมูลในตารางให้เป็นเว็บเพจเพื่อนำมาแสดงในโฮมเพจสำหรับในมุมมองของการศึกษานั้น เอ็กเซลถือได้ว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญอันหนึ่งสำหรับนักศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณเพื่อการเรียนการสอนในสถาบันการศึกษาแล้ว เอ็กเซลยังเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในงานวิจัย งานพัฒนาและการวิเคราะห์ของหน่วยงานต่างๆมากมาย

5.2 แผนภูมิการทำงานฐานข้อมูล Excel



รูปที่ 5.1 แผนผังการทำงานของฐานข้อมูลเอ็กซ์เพนชันลูป (Expansion Loop)

จากแผนผังการทำงานของฐานข้อมูลด้วยโปรแกรม Excel เป็นการสร้างฐานตารางข้อมูลไว้ในตาราง Excel และทำการสร้างฟังก์ชันได้แก่ ฟังก์ชัน IFERROR และฟังก์ชัน VLOOKUP เราสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกขนาดท่อที่ต้องการมาพิจารณาหนึ่งอย่าง จากนั้นฐานข้อมูลจะแสดงค่าต่างๆ ที่เป็นผลลัพธ์จากการคำนวณแอกซ์แพนชันลูป (Expansion Loop)

LOOP FORCES AND STRESS TYPICAL DATA SHEET						
Data		Case H-W		Case H-2W		
		Loop length		Loop length		
1	Material					
2	Nominal Size	in.	10 Bend Length (L_2)	ft	18 Bend Length (L_2)	ft
3	SCH		11 H	ft	19 H	ft
4	Ambient temperatures	deg F	12 W	ft	20 W	ft
5	Operate temperatures	deg F	13 L_1	ft	21 L_1	ft
6	L (anchor-anchor)	ft.	14 L_c	ft.	22 L_c	ft.
7	Modulus of Elasticity	psi	15 Loop Deflection	in	23 Loop Deflection	in
8	linear thermal expansion	in/100ft	16 Axial force at anchor	lb	24 Axial force at anchor	lb
9	Code allowable stress (Sa)	psi	17 Max. Bending Stress	psi	25 Max. Bending Stress	psi

รูปที่ 5.2 หน้าต่างเครื่องมือฐานโปรแกรม Excel ที่ใช้แสดงผลการคำนวณแอกซ์แพนชันลูป

จากรูปที่ 5.2 เราสามารถเลือกข้อมูลที่ต้องการทราบค่าได้ โดยอธิบายค่าต่างๆ ตามหมายเลขในรูปได้ดังนี้

โดยหมายเลข 1-9 เป็นข้อมูลขนาดและวัสดุท่อ

1. Material คือการเลือกชนิดของวัสดุ เช่น วัสดุ Carbon Steel
2. Nominal Size คือ ขนาดของท่อ
3. SCH คือ ความหนาของท่อ
4. Ambient temperatures คือ อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการคำนวณ
5. Operate temperatures คือ อุณหภูมิใช้งานที่ใช้ในการคำนวณ
6. L (anchor-anchor) คือ ความยาวท่อจาก จุดยึด anchor-anchor
7. Modulus of Elasticity คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุท่อจากมาตรฐาน ASME B31.1
8. linear thermal expansion คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน
9. Code allowable stress (Sa) คือ ค่าความเค้นอนุญาตของวัสดุท่อจากมาตรฐาน ASME B31.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากรูปที่ 5.2 หมายเลข 10-17 เป็นผลลัพธ์จากการคำนวณ ในกรณีที่ $H=W$ และ 18-25 เป็นผลลัพธ์จากการคำนวณ ในกรณีที่ $H=2W$ โดยผลลัพธ์จะแสดงค่าดังนี้

- 10 และ 18 เป็นค่า Bend Length (L_2)
- 11 และ 19 เป็นค่าความยาว H
- 12 และ 20 เป็นค่าความยาว W
- 13 และ 21 เป็นค่าความยาว L_{GG}
- 14 และ 22 เป็นค่าความยาว L_C
- 15 และ 23 เป็นค่าการยึดตัวของท่อร้อน Loop Defection
- 16 และ 24 เป็นค่าแรงในแนวแกน x ที่เกิดจากการขยายตัว (Axial force at anchor)
- 17 และ 25 เป็นค่าความเค้นสูงสุด Max. Bending Stress

5.3 หลักการทำงานและวิธีการใช้เครื่องมือ Excel

1. เลือกในหมายเลขที่ 1 เป็นการเลือกค่าวัสดุชนิด Material คือการเลือกชนิดของวัสดุ ได้แก่ วัสดุ Carbon Steel
2. เลือกในหมายเลขที่ 2 ขนาดท่อ Nominal Size ได้แก่ ท่อขนาด 6, 10, 14, 18 และ 24 นิ้ว
3. เลือกในหมายเลขที่ 3 ความหนาของท่อ SCH ได้แก่ SCH20 และ SCH40
4. เลือกในหมายเลขที่ 5 อุณหภูมิใช้งานที่ใช้ในการคำนวณ Operate temperatures ได้แก่ 150°F , 300°F และ 450°F
5. หลังจากเลือกเสร็จแล้วจะแสดงข้อมูลผลลัพธ์ที่เราต้องการ นอกจากนี้สามารถดูรายละเอียดการสร้างฐานข้อมูลบนโปรแกรม Excel ได้ในภาคผนวก ข

LOOP FORCES AND STRESS TYPICAL DATA SHEET									
Data			Case H=W			Case H=2W			
1 Material	Carbon Steel		Loop length			Loop length			
2 Nominal Size	6	in.	10 Bend Length (L _b)	59.00	ft	18 Bend Length (L _b)	59.00	ft	
3 SCH	40		11 H	19.67	ft	19 H	23.60	ft	
4 Ambient temperatures	70	deg F	12 W	19.67	ft	20 W	11.80	ft	
5 Operate temperatures	450	deg F	13 L _{c,c}	39.33	ft	21 L ₁	47.20	ft	
6 L (anchor anchor)	200	ft	14 L _c	9.83	ft	22 L _c	17.70	ft	
7 Modulus of Elasticity	29000000	psi	15 Loop Deflection	1.36	in	23 Loop Deflection	1.42	in	
8 linear thermal expansion	3.16	in/100ft	16 Axial force at anchor	3442.50	lb	24 Axial force at anchor	2503.20	lb	
9 Code allowable stress (SA)	20000	psi	17 Max. Bending Stress	7364.70	psi	25 Max. Bending Stress	7323.00	psi	

รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการใช้เครื่องมือฐานข้อมูลบน Excel

จากรูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างผลการเลือกท่อ Carbon Steel ขนาด 6 นิ้วที่ความหนาท่อ sch 40 ที่อุณหภูมิใช้งาน 450°F :ซึ่งสามารถรู้ผลลัพธ์การคำนวณขนาดของแอ็กซ์แพนชั่นลูป (Expansion Loop) และค่าความเค้นที่กระทำจากการขยายตัวได้ และสามารถใช้งานได้สะดวกรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการศึกษาวิเคราะห์หาค่าความเค้น และค่าแรงจากการขยายตัวของท่อร้อนในท่อบรรยากาศแบบ Expansion loop พบว่า

1. เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจากการขยายตัวที่กระทำกับท่อร้อนกับโมเมนต์เฉื่อย (Moment inertia) พบว่าเมื่อเพิ่มโมเมนต์เฉื่อย (Moment inertia) เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความเค้นเพิ่มขึ้นด้วย
2. เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าแรงจากการขยายตัวที่กระทำกับท่อร้อนกับโมเมนต์เฉื่อย (Moment inertia) พบว่าเมื่อเพิ่มโมเมนต์เฉื่อย (Moment inertia) เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าแรงเพิ่มขึ้นด้วย
3. เมื่อนำผลจากการคำนวณด้วยวิธีคำนวณของ Kellogg และด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench พบว่าผลจากการเพิ่มขนาดท่อและเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ขนาด Expansion loop มีขนาดใหญ่ขึ้นเพิ่มไม่ทำให้ค่าความเค้นที่เกิดจากการขยายตัวเกินค่าที่มาตรฐานของค่าความเค้นวัสดุที่ระบุใน ASME B31.1 และพบว่าจากการคำนวณทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน
4. จากนำผลลัพธ์ค่าความเค้นจากการขยายตัวของท่อร้อนในท่อบรรยากาศแบบ (Expansion loop) จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาสร้างเป็นฐานข้อมูลในโปรแกรมสเปรดชีต (Microsoft Excel) ทำให้เราสามารถคำนวณ Expansion loop ได้สะดวกและรวดเร็วขึ้นและสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดต่อขนาดอื่นๆได้

ข้อเสนอแนะและการพัฒนางานวิจัย

1. การคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถพัฒนาต่อเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับลักษณะการออกแบบระบบแอกเพนชันลูปรูปแบบอื่นได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดในโปรแกรม เช่น ค่าคุณสมบัติของวัสดุ หรือขนาดแอกเพนชันลูป ๓
2. ในการหาค่าแรง ค่าโมเมนต์ และค่าความเค้นของแอกเพนชันลูป ด้วยวิธีการคำนวณแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Ansys Workbench ควรทำการศึกษาแบบจำลองอื่นๆเปรียบเทียบกับกัน เช่น วิธีของ M.W. Kellogg, วิธีของ Spielvogel, วิธีของ Grinnell หรือโปรแกรม CAESAR II เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gaurav, B. and Girish, T. 2013. "Stress Intensification & Flexibility in Pipe Stress Analysis." *VJTI*, 3(3) :1324-1329.
- [2] Anindya, B. and Daniel, L. 2017. **A Finite Element-based Investigation on Stress Intensification and Flexibility Factors for Pipe Bends within and outside the Limitations of ASME B31 Piping Codes**, [Online]. Available : www.nafems.org
- [3] Andrzej, B. Radovan, P. and Bartlomiej, Z. 2011. "Finite Element Method Analysis of Pipe Material Temperature Changes Influence on Line Expansion Loops in Hydraulic Installations on Modern Tankers." *Ther Science*, 15(1) : 81-90.
- [4] E.M.M, Fonseca. F.J.M.Q, de Melo. And C.A.M, Oliveira. 2005. "The Thermal and Mechanical Behaviour of Structural Steel Piping Systems." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 82 : 145-153.
- [5] João Pedro Amaral Vidigal da Silva. 2017. **Development of calculation methodologies for the design of piping systems**, [Online] . Available : <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/>
- [6] ดุลย์โชติ ชลศึกษ์ 2559 การออกแบบระบบท่อทางวิศวกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [7] Liang-Chuan, P. 2018. **Quick Check on Piping Flexibility**, [Online] Available : <https://www.scribd.com>
- [8] Liang-Chuan, P. and Tsen-Loong, P. n.d. **Pipe Stress Engineering**, Texas : Asme Press.
- [9] Sam Kannappan. 1986. **Introduction to Pipe Stress Analysis**, New York : John Wiley & Sons.
- [10] The M.W.Kellogg Company. 1956. **Design of Piping Systems**, 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
- [11] (2012) **ASME B31.1 Power Piping**. ASME, American Society of Mechanical Engineers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ตารางคุณสมบัติของท่อ A335 P11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table A-2 Low and Intermediate Alloy Steel

Spec. No.	Grade	Type or Class	Nominal Composition	P-No.	Notes	Specified Minimum Tensile, ksi	Specified Minimum Yield, ksi	E or F
Seamless Pipe and Tube								
A213	T2	...	$\frac{1}{2}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	3	...	60	30	1.00
	T5	...	$5\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	5B	...	60	30	1.00
	T5b	...	$5\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}-1\frac{1}{2}\text{Si}$	5B	...	60	30	1.00
A213	T5c	...	$5\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}-\text{Ti}$	5B	...	60	30	1.00
	T9	...	$9\text{Cr}-1\text{Mo}$	5B	...	60	30	1.00
	T11	...	$1\frac{1}{4}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	4	...	60	30	1.00
A213	T12	...	$1\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	4	...	60	30	1.00
	T21	...	$3\text{Cr}-1\text{Mo}$	5A	...	60	30	1.00
	T22	...	$2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$	5A	(5)	60	30	1.00
	T91	...	$9\text{Cr}-1\text{Mo}-\text{V}$	15E	(10)	85	60	1.00
	T91	...	$9\text{Cr}-1\text{Mo}-\text{V}$	15E	(11)	85	60	1.00
A333	3	...	$3\frac{1}{2}\text{Ni}$	9B	(1)	65	35	1.00
	4	...	$\frac{1}{4}\text{Cr}-\frac{1}{4}\text{Ni}-\text{Cu}-\text{Al}$	4	(1)	60	35	1.00
	7	...	$2\frac{1}{2}\text{Ni}$	9A	(1)	65	35	1.00
	9	...	$2\text{Ni}-1\text{Cu}$	9A	(1)	63	46	1.00
A335	P1	...	$\text{C}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	3	(2)	55	30	1.00
	P2	...	$\frac{1}{2}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	3	...	55	30	1.00
	P5	...	$5\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	5B	...	60	30	1.00
	P5b	...	$5\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}-1\frac{1}{2}\text{Si}$	5B	...	60	30	1.00
A335	P5c	...	$5\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}-\text{Ti}$	5B	...	60	30	1.00
	P9	...	$9\text{Cr}-1\text{Mo}$	5B	...	60	30	1.00
	P11	...	$1\frac{1}{4}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}-\text{Si}$	4	...	60	30	1.00
A335	P12	...	$1\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	4	...	60	32	1.00
	P21	...	$3\text{Cr}-1\text{Mo}$	5A	...	60	30	1.00
	P22	...	$2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$	5A	(5)	60	30	1.00
	P91	...	$9\text{Cr}-1\text{Mo}-\text{V}$	15E	(10)	85	60	1.00
	P91	...	$9\text{Cr}-1\text{Mo}-\text{V}$	15E	(11)	85	60	1.00
A369	FP1	...	$\text{C}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	3	(2)	55	30	1.00
	FP2	...	$\frac{1}{2}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	3	...	55	30	1.00
	FP5	...	$5\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$	5B	...	60	30	1.00
A369	FP9	...	$9\text{Cr}-1\text{Mo}$	5B	...	60	30	1.00
	FP11	...	$1\frac{1}{4}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}-\text{Si}$	4	...	60	30	1.00

รูปที่ ก.1 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table A-2 Low and Intermediate Alloy Steel

Maximum Allowable Stress Values in Tension, ksi, for Metal Temperature, °F, Not Exceeding																			
-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950	1,000	1,050	1,100	1,150	1,200	Grade	Spec. No.
Seamless Pipe and Tube																			
17.1	17.1	17.1	17.1	16.9	16.4	16.1	15.7	15.4	14.9	14.5	13.9	9.2	5.9	...	...	...	...	T2	A213
17.1	17.1	16.6	16.5	16.4	16.2	15.9	15.6	15.1	14.5	13.8	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	1.8	1.0	T5	
17.1	17.1	16.6	16.5	16.4	16.2	15.9	15.6	15.1	14.5	13.8	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	1.8	1.0	T5b	
17.1	17.1	16.6	16.5	16.4	16.2	15.9	15.6	15.1	14.5	13.8	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	1.8	1.0	T5c	A213
17.1	17.1	16.6	16.5	16.4	16.2	15.9	15.6	15.1	14.5	13.8	13.0	10.6	7.4	5.0	3.3	2.2	1.5	T9	
17.1	17.1	17.1	16.8	16.2	15.7	15.4	15.1	14.8	14.4	14.0	13.6	9.3	6.3	4.2	2.8	...	...	T11	
17.1	16.8	16.5	16.5	16.5	16.3	16.0	15.8	15.5	15.3	14.9	14.5	11.3	7.2	4.5	2.8	...	...	T12	A213
17.1	17.1	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.0	12.0	9.0	7.0	5.5	4.0	...	T21	
17.1	17.1	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	13.6	10.8	8.0	5.7	3.8	...	...	T22	
24.3	24.3	24.3	24.2	24.1	23.7	23.4	22.9	22.2	21.3	20.3	19.1	17.8	16.3	14.0	10.3	7.0	4.3	T91	
24.3	24.3	24.3	24.2	24.1	23.7	23.4	22.9	22.2	21.3	20.3	19.1	17.8	16.3	12.9	9.6	7.0	4.3	T91	
18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	17.5	16.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	3	A333
17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	4	
18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	17.5	16.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	7	
18.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	9	
15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.4	14.9	14.5	...	...	...	...	...	...	...	P1	A335
15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.4	14.9	14.5	13.9	9.2	5.9	...	...	...	...	P2	
17.1	17.1	16.6	16.5	16.4	16.2	15.9	15.6	15.1	14.5	13.8	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	1.8	1.0	P5	
17.1	17.1	16.6	16.5	16.4	16.2	15.9	15.6	15.1	14.5	13.8	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	1.8	1.0	P5b	
17.1	17.1	16.6	16.5	16.4	16.2	15.9	15.6	15.1	14.5	13.8	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	1.8	1.0	P5c	A335
17.1	17.1	16.6	16.5	16.4	16.2	15.9	15.6	15.1	14.5	13.8	13.0	10.6	7.4	5.0	3.3	2.2	1.5	P9	
17.1	17.1	17.1	16.8	16.2	15.7	15.4	15.1	14.8	14.4	14.0	13.6	9.3	6.3	4.2	2.8	...	...	P11	
17.1	16.8	16.5	16.5	16.5	16.3	16.0	15.8	15.5	15.3	14.9	14.5	11.3	7.2	4.5	2.8	...	...	P12	A335
17.1	17.1	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.0	12.0	9.0	7.0	5.5	4.0	...	P21	
17.1	17.1	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	13.6	10.8	8.0	5.7	3.8	...	...	P22	
24.3	24.3	24.3	24.2	24.1	23.7	23.4	22.9	22.2	21.3	20.3	19.1	17.8	16.3	14.0	10.3	7.0	4.3	P91	
24.3	24.3	24.3	24.2	24.1	23.7	23.4	22.9	22.2	21.3	20.3	19.1	17.8	16.3	12.9	9.6	7.0	4.3	P91	
15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.4	14.9	14.5	...	...	...	...	...	...	...	FP1	A369
15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.4	14.9	14.5	13.9	9.2	5.9	...	...	...	...	FP2	
17.1	17.1	16.6	16.5	16.4	16.2	15.9	15.6	15.1	14.5	13.8	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	1.8	1.0	FP5	
17.1	17.1	16.6	16.5	16.4	16.2	15.9	15.6	15.1	14.5	13.8	13.0	10.6	7.4	5.0	3.3	2.2	1.5	FP9	A369
17.1	17.1	17.1	16.8	16.2	15.7	15.4	15.1	14.8	14.4	14.0	13.6	9.3	6.3	4.2	2.8	...	...	FP11	

รูปที่ ก.2 ตารางแสดงค่าความเค้นสูงสุด(Maximum Allowable Stress) ของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table B-1 Thermal Expansion Data

Material	Coef- ficient	in Going From 70°F to Indicated Temperature [Note (1)]																
		Temperature Range 70°F to																
		-325	-150	-50	70	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
Group 1 carbon and low alloy steels [Note (2)]	A	5.5	5.9	6.2	6.4	6.7	6.9	7.1	7.3	7.4	7.6	7.8	7.9	8.1	8.2	8.3	8.4	8.4
	B	-2.6	-1.6	-0.9	0	1.0	1.9	2.8	3.7	4.7	5.7	6.8	7.9	9.0	10.1	11.3	12.4	14.7
Group 2 low alloy steels [Note (3)]	A	6.0	6.5	6.7	7.0	7.3	7.4	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.4	8.5
	B	-2.9	-1.7	-1.0	0	1.1	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.1	9.2	10.3	11.4	12.5	13.5
5Cr-1Mo steels	A	5.6	6.0	6.2	6.4	6.7	6.9	7.0	7.1	7.2	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.6	7.7	7.8
	B	-2.7	-1.6	-0.9	0	1.0	1.9	2.8	3.7	4.6	5.5	6.4	7.4	8.4	9.3	10.3	11.4	12.4
9Cr-1Mo steels	A	5.0	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	7.0	7.1	7.2	7.2
	B	-2.4	-1.4	-0.8	0	0.9	1.7	2.5	3.3	4.1	5.0	5.9	6.8	7.7	8.7	9.7	10.6	11.6
Straight chromium stainless steels																		
12Cr to 13Cr steels	A	5.1	5.5	5.7	5.9	6.2	6.3	6.4	6.5	6.5	6.6	6.7	6.7	6.8	6.8	6.9	6.9	7.0
	B	-2.4	-1.5	-0.8	0	1.0	1.7	2.5	3.3	4.2	5.0	5.8	6.7	7.6	8.5	9.4	10.2	11.1
15Cr to 17Cr steels	A	4.5	4.9	5.1	5.3	5.5	5.7	5.8	5.9	6.0	6.1	6.2	6.2	6.3	6.4	6.4	6.5	6.5
	B	-2.1	-1.3	-0.7	0	0.9	1.6	2.3	3.0	3.8	4.6	5.4	6.2	7.0	7.9	8.7	9.5	10.4
27Cr steels	A	4.3	4.7	4.9	5.0	5.2	5.2	5.3	5.4	5.4	5.5	5.6	5.7	5.7	5.8	5.9	5.9	6.0
	B	-2.0	-1.2	-0.7	0	0.8	1.4	2.1	2.8	3.5	4.2	4.9	5.6	6.4	7.2	8.0	8.7	9.6
Austenitic stainless steels (304, 305, 316, 317, 321, 347, 348, 19-9DL, XM-15, etc.)	A	7.5	8.0	8.2	8.5	8.9	9.2	9.5	9.7	9.9	10.0	10.1	10.2	10.3	10.4	10.6	10.7	10.8
	B	-3.6	-2.1	-1.2	0	1.4	2.5	3.8	5.0	6.3	7.5	8.8	10.2	11.5	12.9	14.3	15.8	17.2
Other austenitic stainless steels (309, 310, 315, XM-19, etc.)	A	7.1	7.6	7.8	8.2	8.5	8.7	8.9	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9	10.1
	B	-3.4	-2.0	-1.1	0	1.3	2.4	3.5	4.7	5.8	7.0	8.2	9.5	10.7	12.0	13.3	14.7	16.1
Gray cast iron	A	...	...	...	...	5.8	5.9	6.1	6.3	6.5	6.7	6.8	7.0	7.2	...	...	...	...
	B	...	...	...	0	0.9	1.6	2.4	3.2	4.1	5.0	6.0	7.0	8.0	...	...	...	...
Ductile cast iron	A	...	4.9	5.3	5.7	6.0	6.3	6.6	6.8	7.0	7.1	7.3	7.4	7.5	...	...	...	...
	B	...	-1.3	-0.8	0	0.9	1.7	2.6	3.5	4.5	5.4	6.4	7.3	8.4	...	...	...	...

Table B-1 Thermal Expansion Data (Cont'd)

NOTES:

- (1) These data are for information and it is not to be implied that materials are suitable for all the temperature ranges shown.
 (2) Group 1 alloys (by nominal composition):

Carbon steels

(C, C-Si, C-Mn, and C-Mn-Si)

C- $\frac{1}{2}$ Mo $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo-V $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{4}$ Mo-Si $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{3}{2}$ Mo $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Ni- $\frac{1}{4}$ Mo $\frac{3}{4}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Ni-Cu $\frac{3}{4}$ Cr- $\frac{3}{4}$ Ni-Cu-Al1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo-Si1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo-V1 $\frac{1}{4}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo1 $\frac{1}{4}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo-Si1 $\frac{1}{4}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo-Cu2Cr- $\frac{1}{2}$ Mo2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo

3Cr-1Mo

 $\frac{1}{2}$ Ni- $\frac{1}{2}$ Mo-V $\frac{1}{2}$ Ni- $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{4}$ Mo-V $\frac{3}{4}$ Ni- $\frac{1}{2}$ Mo-Cr-V $\frac{3}{4}$ Ni- $\frac{1}{2}$ Mo- $\frac{1}{2}$ Cr-V $\frac{3}{4}$ Ni- $\frac{1}{2}$ Cu-Mo $\frac{3}{4}$ Ni- $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo-V $\frac{3}{4}$ Ni-1Mo- $\frac{3}{4}$ Cr1Ni- $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo1 $\frac{1}{4}$ Ni-1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo1 $\frac{3}{4}$ Ni- $\frac{3}{4}$ Cr- $\frac{1}{4}$ Mo2Ni- $\frac{3}{4}$ Cr- $\frac{1}{4}$ Mo2Ni- $\frac{3}{4}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo2 $\frac{1}{2}$ Ni3 $\frac{1}{2}$ Ni3 $\frac{1}{2}$ Ni-1 $\frac{1}{4}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo-V

- (3) Group 2 alloys (by nominal composition):

Mn-V

Mn- $\frac{1}{4}$ MoMn- $\frac{1}{2}$ MoMn- $\frac{1}{2}$ Mo- $\frac{1}{4}$ NiMn- $\frac{1}{2}$ Mo- $\frac{1}{2}$ NiMn- $\frac{1}{2}$ Mo- $\frac{3}{4}$ Ni

รูปที่ ก.4 ตารางแสดงค่าการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Data) ของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012 (ต่อ) [11]

Table B-1 (SI) Thermal Expansion Data

Material	Coef- ficient	Temperature Range 20°C to													
		-200	-100	-50	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275
Group 1 carbon and low alloy steels [Note (2)]	A	9.9	10.7	11.1	11.5	11.8	11.9	12.1	12.3	12.4	12.6	12.7	12.9	13.0	13.2
	B	-2.2	-1.3	-0.8	0	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	2.0	2.3	2.6	3.0	3.4
Group 2 low alloy steels [Note (3)]	A	10.8	11.7	12.0	12.6	12.8	13.0	13.1	13.2	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9
	B	-2.4	-1.4	-0.8	0	0.4	0.7	1.0	1.4	1.7	2.1	2.4	2.8	3.2	3.6

รูปที่ ก.5 ตารางแสดงค่าการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Data, SI) ของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table B-1 (SI) Thermal Expansion Data

$A = \text{Mean Coefficient of Thermal Expansion, } 10^{-6} \text{ mm/mm/}^{\circ}\text{C}$ $B = \text{Linear Thermal Expansion, mm/m}$																				
in Going From 20°C to Indicated Temperature [Note (1)]																				
Temperature Range 20°C to																				
300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800
13.3	13.4	13.6	13.7	13.8	14.0	14.1	14.2	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.1	15.2	15.3	15.3	15.4
3.7	4.1	4.5	4.9	5.3	5.7	6.1	6.5	6.9	7.3	7.7	8.2	8.6	9.0	9.4	9.9	10.3	10.7	11.1	11.6	12.0
14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.6	14.7	14.8	14.8	14.9	15.0	15.0	15.1	15.1	15.2	15.2	15.3	15.3	15.3
3.9	4.3	4.7	5.1	5.5	5.9	6.3	6.7	7.1	7.5	7.9	8.3	8.7	9.1	9.5	9.9	10.3	10.7	11.1	11.1	11.5

รูปที่ ก.6 ตารางแสดงค่าการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Data, SI) ของท่อ A335 P11 อ้างอิงจาก ASME B31.1-2012 (ต่อ) [11]

MANDATORY APPENDIX D FLEXIBILITY AND STRESS INTENSIFICATION FACTORS

Table D-1 Flexibility and Stress Intensification Factors

Description	Flexibility Characteristic, h	Flexibility factor, k	Stress Intensification Factor, I	Sketch
Welding elbow or pipe bend [Notes (1), (2), (3), (4), (5)]	$\frac{t_n R}{r^2}$	$\frac{1.65}{h}$	$\frac{0.9}{h^{2.7}}$	
Closely spaced miter bend [Notes (1), (2), (3), (5)] $s < r(1 + \tan \theta)$ $B \geq 6 t_n$ $\theta \leq 22\frac{1}{2}$ deg	$\frac{5t_n \cot \theta}{2r^2}$	$\frac{1.52}{h^{2.4}}$	$\frac{0.9}{h^{2.7}}$	
Widely spaced miter bend [Notes (1), (2), (5), (6)] $s \geq r(1 + \tan \theta)$ $\theta \leq 22\frac{1}{2}$ deg	$\frac{t_n (1 + \cot \theta)}{2r}$	$\frac{1.52}{h^{2.4}}$	$\frac{0.9}{h^{2.7}}$	
Welding tee per ASME B16.9 [Notes (1), (2), (7)]	$\frac{3.1t_n}{r}$	1	$\frac{0.9}{h^{2.7}}$	
Reinforced fabricated tee [Notes (1), (2), (8), (9)]	$\frac{(t_n + \frac{t}{2})^{3/2}}{r (t_n)^{3/2}}$	1	$\frac{0.9}{h^{2.7}}$	
Unreinforced fabricated tee [Notes (1), (2), (9)]	$\frac{t_n}{r}$	1	$\frac{0.9}{h^{2.7}}$	

รูปที่ ก.7 ตารางแสดงค่าความยืดหยุ่นและความเค้นหนาแน่นของท่อ อ้างอิงจาก ASME B31.1[11] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดส่วน อาร์กิวเมนต์ ของ ชุดคำสั่งที่ใช้ใน LOOP FORCES AND STRESS TYPICAL DATA SHEET

LOOP FORCES AND STRESS TYPICAL DATA SHEET											
Data			Case H=W			Case H=2W					
			Loop length			Loop length					
1	Material	Carbon Steel	10	Bend Length (L ₂)	59.00 ft	18	Bend Length (L ₂)	59.00 ft			
2	Norminal Size	6 in.	11	H	19.67 ft.	19	H	23.60 ft.			
3	SCH.	40	12	W	19.67 ft.	20	W	11.80 ft.			
4	Ambient temperatures	70 deg F	13	L ₁	39.33 ft.	21	L ₁	47.20 ft.			
5	Operate temperatures	450 deg F	14	L ₂	9.83 ft.	22	L ₂	17.70 ft.			
6	L (anchor-anchor)	200 ft.	15	Loop Deflection	1.36 in	23	Loop Deflection	1.42 in			
7	Modulus of Elasticity	29000000 psi	16	Axial force at anchor	3442.50 lb	24	Axial force at anchor	2503.20 lb			
8	linear thermal expansion	3.16 in/1000	17	Max. Bending Stress	364.70 psi	25	Max. Bending Stress	7323.00 psi			
9	Code allowable stress (Sa)	20000 psi									

รูปที่ ข.1 แสดงหน้าต่าง LOOP FORCES AND STRESS TYPICAL DATA SHEET

1. Material สร้างเป็น Dropdown List บังคับให้กรอกข้อมูลตามที่กำหนดด้วย Data Validation
2. Norminal Size สร้างเป็น Dropdown List บังคับให้กรอกข้อมูลตามที่กำหนดด้วย Data Validation
3. SCH. สร้างเป็น Dropdown List บังคับให้กรอกข้อมูลตามที่กำหนดด้วย Data Validation
4. Ambient temperatures
5. Operate temperatures สร้างเป็น Dropdown List บังคับให้กรอกข้อมูลตามที่กำหนดด้วย Data Validation
6. L (anchor-anchor)
7. Modulus of Elasticity
8. line thermal expansion
9. Code allowable stress (Sa)

Case H=W

10. Bend Length (L₂) ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$D\$6:\$X\$20,12,0),0)

11. H ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$D\$5:\$X\$20,13,0),0)

12. W ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$D\$5:\$X\$20,14,0),0)

13. L₁ ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$D\$5:\$X\$20,15,0),0)

14. L₂ ชุดคำสั่งคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$D\$5:\$X\$20,16,0),0)

15. Loop Defection ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$D\$5:\$X\$20,19,0),0)

16. Axial force at anchor ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$D\$5:\$X\$20,21,0),0)

Case H=2W

17. Max. Bending Stress ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$D\$5:\$X\$20,20,0),0)

18. Bend Length (L2) ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$Z\$6:\$AN\$20,2,0),0)

19. H ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$Z\$6:\$AN\$20,3,0),0)

20. W ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$Z\$6:\$AN\$20,4,0),0)

21. Lgg ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$Z\$6:\$AN\$20,5,0),0)

22. Lc ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$Z\$6:\$AN\$20,6,0),0)

23. Loop Defection ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$Z\$6:\$AN\$20,13,0),0)

24. Axial force at anchor ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$Z\$6:\$AN\$20,15,0),0)

25. Max. Bending Stress ชุดคำสั่งคือ

=IFERROR(VLOOKUP(\$D\$6&\$D\$7&"I"&\$D\$8&"I"&\$D\$10,'Data Result'!\$Z\$6:\$AN\$20,14,0),0)

10-17 เป็นส่วนของ Case H=W และ 18-25 เป็นส่วนของ Case H=2W

ซึ่งเราแบ่ง 'Data Result'!\$D\$5:\$X\$20 เป็น ส่วนของ Case H=W และ 'Data

Result'!\$Z\$6:\$AN\$20 เป็นส่วนของ Case H=2W ดังรูป ข.2

รูปที่ ๒.2 แสดงหน้าต่าง ตารางฐานข้อมูล

OD	SCH	linear thermal expansion	Code allowable stress (Sa)	Modulus of Elasticity	H=W								H=2W									
					Lj(R)	H(R)	W(H)	LG-G _{fit}	Ld(R)	Loop Deflection (in)	Max. Bending Stress (FEA)Psi	Force Reaction(Q)lbf	ema% ²	Lj(R)	H(R)	W(H)	LG-G _{fit}	Ld(H)	Loop Deflection (in)	Max. Bending Stress (FEA)Psi	Force Reaction(Q)lbf	
6	x	200	0.42	20000	29000000	27.0	9.0	9.0	18.0	4.5	0.279	4580.3	5898.9	47.0	27.0	10.8	5.4	21.6	8.1	0.286	6692.4	4596.6
7	10	200	0.42	20000	29000000	34.5	11.5	11.5	23.0	5.7	0.274	5664.8	72702.0	66.7	34.5	13.8	6.9	27.6	10.8	0.284	6802.0	9334.9
8	14	200	0.42	20000	29000000	39.2	13.1	13.1	26.2	6.5	0.268	6741.1	84288.0	66.5	39.2	15.3	7.6	31.4	11.8	0.279	6912.2	17896.0
9	18	200	0.42	20000	29000000	44.5	14.8	14.8	29.7	7.4	0.262	7842.7	111170.0	65.8	44.5	17.0	8.5	35.6	13.3	0.275	6944.4	26890.0
10	24	200	0.42	20000	29000000	51.5	17.2	17.2	34.3	8.6	0.254	8973.4	146737.0	65.1	51.5	20.6	10.3	41.2	15.4	0.269	6917.8	50242.0
11	x	40	2.8	20000	29000000	45.7	15.7	15.7	30.6	7.4	0.219	7110.4	41180.0	64.4	45.7	18.3	9.1	36.6	13.7	0.248	7113.5	3059.4
12	10	20	2.8	20000	29000000	58.5	19.5	19.5	39.0	9.7	0.205	7245.1	85011.0	63.7	58.5	23.4	11.7	46.8	17.5	0.243	7264.6	6217.7
13	14	20	2.8	20000	29000000	66.7	22.2	22.2	44.5	11.1	0.201	7347.5	112651.0	63.0	66.7	26.7	13.3	53.4	20.0	0.231	7353.0	11823.0
14	18	20	2.8	20000	29000000	75.5	25.2	25.2	50.3	12.6	0.177	7527.8	129130.0	62.4	75.5	30.0	15.1	60.4	22.9	0.221	7465.3	17956.0
15	24	20	2.8	20000	29000000	76.2	25.4	25.4	50.8	12.7	0.174	7655.4	144800.0	61.7	76.2	30.0	15.2	61.0	22.9	0.204	7563.3	34620.0
16	x	40	3.16	20000	29000000	59.0	19.7	19.7	39.3	9.8	1.162	7364.7	30423.0	63.2	59.0	23.6	11.8	47.2	17.7	1.423	7323.0	2503.2
17	10	20	3.16	20000	29000000	75.2	25.1	25.1	50.2	12.5	1.151	7566.1	11400.0	62.2	75.2	30.1	15.0	60.2	22.6	1.411	7512.5	5110.5
18	14	20	3.16	20000	29000000	85.7	28.6	28.6	57.2	14.3	1.098	7633.4	13705.0	61.6	85.7	34.3	17.1	68.6	25.7	1.389	7616.7	9734.1
19	18	20	3.16	20000	29000000	97.2	32.4	32.4	64.8	16.2	1.066	7751.9	20776.0	61.2	97.2	38.9	19.4	77.8	29.2	1.369	7692.5	14656.0
20	24	20	3.16	20000	29000000	112.2	37.4	37.4	74.8	18.7	1.019	7873.2	39564.0	60.2	112.2	44.9	22.4	89.8	33.7	1.338	7764.2	27718.0

ภาคผนวก ค.

บทความที่เข้าร่วมการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 (ME-NETT 2016)

6-8 กรกฎาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์

The 30th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand
ประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
วันที่ 6-8 กรกฎาคม 2559

Engineering Connect For the benefit of Mankind

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

วัตถุประสงค์
 การประชุมวิชาการครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้นักวิจัยและนักปฏิบัติในสาขาวิศวกรรมเครื่องกลได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนเรียนรู้ประสบการณ์และองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลกับนักวิจัยและนักปฏิบัติในสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งเพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้นักวิจัยและนักปฏิบัติในสาขาวิศวกรรมเครื่องกลได้มีโอกาสเผยแพร่ผลงานวิจัยและนวัตกรรมของตนเองสู่สาธารณชนและผู้ประกอบการในวงกว้าง

กำหนดการ

- วันที่เปิดงานอย่างเป็นทางการ 1 สิงหาคม 2559
- วันที่ประชุมวิชาการ 6-8 กรกฎาคม 2559
- วันที่ปิดงานอย่างเป็นทางการ 10 กรกฎาคม 2559
- วันที่ประชุมวิชาการ 6-8 กรกฎาคม 2559
- วันที่ปิดงานอย่างเป็นทางการ 10 กรกฎาคม 2559
- วันที่ประชุมวิชาการ 6-8 กรกฎาคม 2559
- วันที่ปิดงานอย่างเป็นทางการ 10 กรกฎาคม 2559
- วันที่ประชุมวิชาการ 6-8 กรกฎาคม 2559
- วันที่ปิดงานอย่างเป็นทางการ 10 กรกฎาคม 2559

สถานที่จัดงาน
 โรงแรม NH ศรีนคร 16 ซอยศรีนคร 15/1
 ถนนศรีนครินทร์ อำเภอเมืองขอนแก่น
 โทร. 074-440222 Fax: 074-440442

ติดต่อสอบถาม
 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง ข.ขอนแก่น 40112

ค่าลงทะเบียน

ประเภท	จำนวน
• ค่าลงทะเบียนผู้บรรยาย	4,000 บาท/ท่าน
• ค่าลงทะเบียนผู้สนับสนุนวิชาการ (หลัง 31 ธ.ค. 59)	5,000 บาท/ท่าน
• ค่าลงทะเบียนผู้สนับสนุนวิชาการ (ไม่เข้างานภายใน)	1,500 บาท/ท่าน
• ค่าลงทะเบียนผู้สนับสนุนวิชาการ (เข้าร่วมงาน)	2,000 บาท/ท่าน
• ค่าลงทะเบียนผู้สนับสนุนวิชาการ (เข้าร่วมงาน)	5,000 บาท/ท่าน
• ค่าลงทะเบียนผู้สนับสนุนวิชาการ (เข้าร่วมงาน)	8,000 บาท/ท่าน

สถานที่/กิจกรรม
 • (หลัง 31 ธ.ค. 59) 5,000 บาท/ท่าน
 • (หลัง 31 ธ.ค. 59) 8,000 บาท/ท่าน

หมายเหตุ : ผู้ที่สนใจสมัครเข้าร่วมประชุมวิชาการสามารถดูรายละเอียดได้ที่เว็บไซต์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น
<http://www.me.psu.ac.th/me-nett2016>

โทรศัพท์ 0-7428-7190, 0-7428-7200 โทรสาร 0-7455-8830
อีเมล : me-nett2016@me.psu.ac.th
http://www.me.psu.ac.th/me-nett2016 http://www.facebook.com/me-nett2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การวิเคราะห์หาค่าความเค้นในท่อเอ็กซ์แพนชันลูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Stress Analysis of Expansion loop Using Finite Element Method

สมเกียรติ ไข่มุกส์^{1*} และ จำลอง ปรานแก้ว¹

1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

E-mail : kpchamlog@kmitl.ac.th, Tel: 02-3298350-1

* ติดต่อ E-mail: kh.somkiat@yahoo.com, Tel: 091-886-1665

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบท่อที่ใช้ในงานในสภาวะอุณหภูมิและความดันสูงอย่างเช่น ท่อไอน้ำในโรงงานผลิตไฟฟ้า ท่อจะขยายตัวเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงและจะหดตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง ถ้าปลายท่อถูกจับยึดทั้งสองข้าง การขยายตัวและการหดตัว อาจทำให้ระบบท่อพังเสียหายเนื่องจากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงเกินกว่าค่าความเค้นอนุญาติของวัสดุที่ใช้ทำท่อได้ ซึ่งการแก้ปัญหาการขยายตัวของระบบท่อดังกล่าวสามารถใช้ข้อต่อแบบขยายตัว (Expansion joints) หรือการติดตั้งท่อโค้งที่เรียกว่าเอ็กซ์แพนชันลูป (Expansion Loops) เพื่อรองรับการขยายตัวและการหดตัวของท่อได้ การใช้เอ็กซ์แพนชันลูปราคาจะถูกกว่าการใช้ข้อต่อแบบขยายตัว การออกแบบหาขนาดของเอ็กซ์แพนชันลูปจะถูกกำหนดอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน ASME B31.1 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบท่อไอน้ำที่ใช้ในโรงงานผลิตไฟฟ้า ก่อนหน้านี้ได้มีผู้นำเสนอวิธีการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นในเอ็กซ์แพนชันลูปหลายวิธีอย่างเช่น วิธี Tube turns วิธี Grinnell เป็นต้น แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือวิธีของ Kellogg และต่อมาได้มีผู้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาใช้ในการคำนวณหาขนาดของเอ็กซ์แพนชันลูปหลายรายอย่างเช่น โปรแกรม CAESAR II สำหรับบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าความเค้น, โมเมนต์และแรงที่กระทำกับเอ็กซ์แพนชันลูปของวิธีการคำนวณของ M.W. Kellogg โดยได้ทำการศึกษาจากแบบจำลอง 3 มิติของท่อแบบ Three-dimensional horizontal loop โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและขนาดความหนาของท่อ และคำนวณผลเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS WORKBENCH ผลที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกันตามข้อกำหนด ASME B31.1 ที่ใช้การออกแบบระบบท่อ

คำหลัก: ความเค้นและความยืดหยุ่น, ขยายตัวทางความร้อน, ASME B31.1

Abstract

Designing of piping which they are operating in extreme high temperature and pressure condition such as steam pipes in power plants. Pipes can expand when temperatures has raised in high and will shrink when the temperature drops. If the pipe is clamped and fixed on either side. The expansion and contraction can cause pipeline damage due to the stresses exceed the allowable stress of the material used to make pipes. The solution to the expansion of the pipeline system can be used an Expansion joints or installing a pipe Expansion Loops to support the expansion and the shrinkage of the pipe line. By using the expansion loops are cost cheaper than using expansion joints. The designing of the expansion loop must be designed with in provisions of the standard ASME B31.1, which is the standard used in the design of steam pipes in power plants. Previously, a presenter shows how to calculate the stresses in the expansion loops in several ways. Such as Tube turns method and Grinnell method, but the most used and effective method is the Kellogg's. And later, computer developers have developed several programs which were used to calculate the size of expansion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0017

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



loops, such as CAESAR II. This article presents a method of how to calculate the stress and momentum of force acting on the expansion loop with the method of calculation of M.W. Kellogg by study from the Three-dimensional-horizontal loop from modifying the temperature and pipe size. As the results of the studied were used to compared with Finite Element by program ANSYS, which results are consistent along together.

Keywords: stress, flexibility, thermal expansion, ASME B31.1.

1. บทนำ

การออกแบบท่อเพื่อใช้งานกับของไหลที่มีอุณหภูมิและความดันสูง เช่น ท่อไอน้ำในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าหรือท่อที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี จะทำให้ท่อขยายตัว ส่งผลให้แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับท่อมีค่าสูงขึ้นจนอาจเป็นสาเหตุทำให้ท่อเกิดความเสียหายได้ เช่น ท่อบิดโค้งงอ, ฉนวนหุ้มท่อนิกซาค หรือ จุดจับยึดท่อพังเสียหาย ซึ่งการแก้ไขปัญหามาจากการขยายตัวของท่อด้วยการออกแบบให้ระบบท่อบริเวณยึดหยุ่น ซึ่งมีหลักอยู่สองประการคือ ทำท่อโค้งรองรับการขยายตัว (Expansion loop) หรือติดตั้งข้อต่อแบบขยายตัว (Expansion joint) หรือถ้าเป็นการวางท่อในแนวตั้งก็อาจติดตั้งสปริง (Spring support) รองรับการขยายตัวของท่อได้ การติดตั้งท่อโค้งรองรับการขยายตัวของท่อ (Expansion loop) ได้รับความนิยมในหม้อน้ำ ออกแบบเป็นอย่างดีเพราะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าการติดตั้งข้อต่อรองรับการขยายตัว การออกแบบท่อแอ็กเพนชันลูปให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับการขยายตัวของท่อได้นั้นจึงต้องมีการศึกษาวิจัย จึงทำให้มีนักวิจัยหลายท่านทำการศึกษาวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับท่อ โดย Gaurav Bhende, Girish Tembhare [1] ได้อธิบายแนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการหาค่าความยืดหยุ่น, ค่าความเค้นหนาแน่นตามสมการที่ระบุไว้ใน ASME B31 และตั้งข้อสังเกตเกี่ยวกับสมการคำนวณหาค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นตาม ASME B31 โดยวิเคราะห์ค่าความเค้นหนาแน่นข้อต่อรูปตัว U เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการศึกษาวิเคราะห์จากทั้งสองวิธีสอดคล้องกันและสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของท่อมีผลต่อค่าความยืดหยุ่นและค่าความเค้นหนาแน่นในท่อตามสมการ ASME B31, Andrzej Banaszek, Radovan Petrovic and Bartłomiej Zylinski. [2] ได้วิเคราะห์ expansion loop ชนิด "U" เป็นท่อที่ใช้ในระบบไฮดรอลิกความดันสูง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 130x30 mm เหล็ก

คาร์บอน 52.4 โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าท่อมีค่าความเค้นและความยืดหยุ่นสูงสุดที่จุด elbow 90 และนักวิจัย João Pedro Amaral Vidigal da Silva [3] ได้พัฒนาวิธีการคำนวณในการวิเคราะห์ expansion loop โดยกำหนด $W=1/2H$ คำนวณจากโปรแกรม CAESAR II ตาม ASME B31 เปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณการขยายตัวของความร้อนด้วยวิธีของ Spielvogel และ Grinnell พบว่าค่าความยืดหยุ่นจาก CAESAR II น้อยที่สุด ค่าความแตกต่าง 44 % สำหรับบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าความเค้น, โมเมนต์และแรงที่กระทำกับแอ็กเพนชันลูปของวิธีการคำนวณของ M.W. Kellogg และคำนวณผลเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS WORKBENCH โดยได้ทำการศึกษาจากแบบจำลอง 3 มิติของท่อแบบ Three-dimensional-horizontal loop วิธีการนำเสนอนี้จะช่วยการออกแบบระบบท่อบริเวณยึดหยุ่นและสะดวกรวดเร็วมากขึ้น โดยที่ค่าความปลอดภัยยังอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐานสากล

2. ทฤษฎี

2.1 มาตรฐานระบบท่อ

สมาคมวิศวกรรมเครื่องกลในสหรัฐอเมริกาได้กำหนดมาตรฐานในการออกแบบระบบท่อให้สามารถใช้งานได้ อย่างปลอดภัยโดยแบ่งออกเป็นหลายมาตรฐานขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานแต่ละประเภทเช่นมาตรฐาน ASME B31.1 Power Piping สำหรับระบบท่อที่ใช้ในโรงงานผลิตไฟฟ้าหรือโรงงานกลั่นน้ำมันที่ใช้ไอน้ำเป็นของไหล โดยมีค่าความปลอดภัยประมาณ 3.5 [4] ASME B31.3 Process Piping สำหรับระบบท่อที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงาน เช่น โรงงานปิโตรเคมีโดยมีค่าความปลอดภัยประมาณ 3.0 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0017

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



2.2 การหาความหนาท่อ

$$\text{Thickness, } t_m = \frac{PD_o}{2SE_q + PY} + A \quad (1)$$

t_m = ความหนาน้อยสุดที่ต้องการ

P = ความดันภายในที่ใช้ออกท่อ

D_o = ความหนาภายนอกท่อ

S = ค่าความเค้นอนุญาตที่อุณหภูมิที่ใช้ออกแบบท่อ

Y = coefficient of material

A = allowance corrosion

E_q = quality factor

$$\Delta = \alpha L \quad (4)$$

α = สัมประสิทธิ์การขยายความร้อนของท่อ

L = ความยาวท่อ

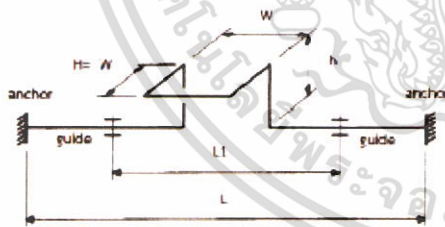
2.3 การหาขนาดแฉกเพนซ์รูป

จากรูปที่ 1 ความยาว Bend Length (L_2) เป็นส่วนของท่อที่ใช้ในการรองรับการขยายตัวของความร้อนคำนวณได้จากสมการ [6]

$$L_2 = \sqrt{\frac{3E_s D \Delta}{S_s}} \quad (2)$$

เมื่อ E_s เป็นโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุที่อุณหภูมิใช้งาน, D เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของท่อ, S_s เป็นความเค้นการขยายตัวอนุญาต และกำหนดให้

$$L_2 = 2H + W \quad (3)$$



รูปที่ 1 Three-dimensional-horizontal loop

2.4 ทฤษฎีการขยายตัวของความร้อน

ระบบท่อส่วนใหญ่ทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการติดตั้ง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะนำไปสู่การขยายตัวของความร้อนของท่อ การขยายตัวของความร้อนของวัสดุคำนวณด้วยสมการต่อไปนี้ [6]

2.5 ทฤษฎีความเค้นการขยายตัว

การวิเคราะห์ความยืดหยุ่นจะกระทำโดยการเปรียบเทียบระหว่างผลรวมของความเค้นเฉือนที่เกิดจากแรงบิดและความเค้นดัด [6]

$$S_E = \sqrt{S_b^2 + S_t^2} \quad (5)$$

S_t = ความเค้นบิด (Torsion stress)

$$S_t = \frac{M_T}{2Z} \quad (6)$$

S_b = ความเค้นดัด (Bending Stress)

$$S_b = \frac{\beta M_b}{Z} \quad (7)$$

M_t = โมเมนต์บิด

M_b = โมเมนต์ดัด

Z = โมดูลัสหน้าตัด

β = แฟกเตอร์ค่าความเค้นหนาแน่น

2.6 ความเค้นอนุญาต (Allowable stress) [5]

$$S_A = f(1.25 S_c + 0.25 S_u) \quad (8)$$

S_c = เป็นความเค้นเค้นอนุญาตที่อุณหภูมิการติดตั้ง

S_u = ความเค้นอนุญาตที่อุณหภูมิใช้งาน

2.7 ทฤษฎีแรงและโมเมนต์

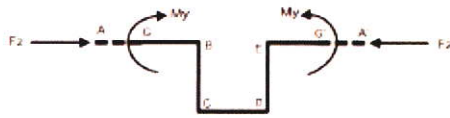
พิจารณาแรงจากการขยายตัวของท่อเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามแนวแกน Z ที่จุดยึดท่อทั้งสองข้าง (FZ) และพิจารณาโมเมนต์จากการขยายความร้อนของท่อที่เกิดแนวแกน Y ที่จุดยึด Guide (MY) โดยแรงและ

CST0017

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



โมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีค่าความปลอดภัยจากแรงภายนอก 33% [6]



รูปที่ 2 Free Body Diagram

$$F_{sA} = -F_{sA'} = \frac{-10^6 A_1 \Delta}{L^3} \quad (9)$$

$$M_G = -M_G' = \frac{-10^5 A_2 \Delta}{L^2} \quad (10)$$

Δ = Deflection

L = ระยะระหว่างจุด Guide - Guide

I = โมเมนต์เฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด

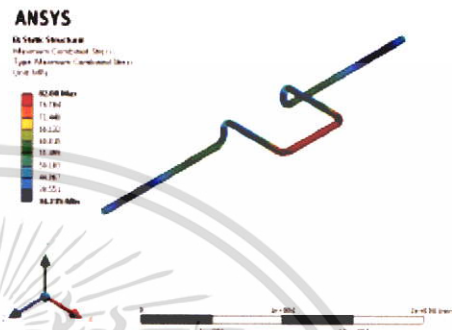
2.8 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมซึ่งหากใช้การคำนวณเพียงตัวเลขอย่างเดียวจะทำให้ไม่สามารถเห็นผลลัพธ์ที่ออกมาได้ และบางวิธีต้องใช้การคำนวณด้วยมือ ซึ่งมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรม ดังนั้นหากใช้วิธีการ FEM ในการเขียนโปรแกรมและใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ จะทำให้สะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมและยังสามารถแสดงเป็นกราฟฟิคออกมาได้อีกด้วย [8] ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กระบวนการดังนี้

1. การ Pre-Processing เป็นการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และกำหนดข้อมูลพารามิเตอร์ และกำหนดภาระที่กระทำกับแบบจำลองโดยมีหลายลักษณะให้กับแบบจำลองเพื่อทำการประมวลผล
2. การ Solve-Processing เป็นส่วนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการวิเคราะห์ผล

3. การ Post-Processing เป็นการแสดงการวิเคราะห์ที่ได้ออกมาในลักษณะของภาพกราฟฟิค

4. การวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3 แบบจำลอง 3 มิติ Three-dimensional-horizontal loop

สร้างแบบจำลอง 3 มิติของท่อแบบ Three-dimensional-horizontal loop โดยใช้ท่อขนาด 20 นิ้วที่ทำจากวัสดุ ASTM-A335-P11 alloy steel, อุณหภูมิติดตั้งภายนอก 22 °C กำหนดให้อุณหภูมิใช้งานภายในท่อ 200, 300, 400 °C และความดันที่ใช้ออกแบบ 4.5 MPa และความหนาท่อตาม Schedule number 40, 60 และ 80 โดยคำนวณหาความยาวแอกเพนซ์นัล (L_p) จากวิธีการคำนวณของ M.W. Kellogg, และคำนวณแรงที่กระทำที่จุดจับยึด (Anchor), โมเมนต์กระทำที่จุดประคองให้ท่อขยายตัวในแนวนอน (Guide) และค่าความเค้นที่เกิดขึ้น ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys Workbench แล้วนำผลคำนวณค่าความเค้น, โมเมนต์, และแรง ไปเปรียบเทียบกับที่ได้จากวิธีการคำนวณของ M.W. Kellogg แสดงในตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3. ผลการวิเคราะห์

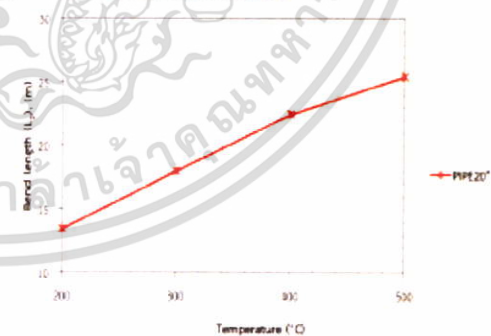
ตารางที่ 1 ตารางผลการวิเคราะห์แรง, โมเมนต์ และความเค้น จาก FEA เทียบกับทฤษฎี M.W. Kellogg

ข้อมูล								ผลการวิเคราะห์					
Temp. (°C)	L (m)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	W (m)	H (m)	h (m)	Schedule	Kellogg			FEA		
								F _{AZ} (kN)	M _{AZ} (kN-m)	S _Z (MPa)	F _{AZ} (kN)	M _{AZ} (kN-m)	S _Z (MPa)
200	30	8	13.5	4.5	4.5	2	40	172.71	370.10	132.85	137.95	246.76	82.28
							60	229.61	492.02	132.85	176.86	324.26	73.34
							80	281.42	603.05	132.85	223.11	401.42	66.65
300	30	10	18	6	6	2	40	137.95	349.45	121.52	107.80	229.16	82.08
							60	176.86	464.56	121.52	138.79	307.12	72.62
							80	223.11	569.40	121.52	176.69	388.13	66.35
400	30	12	22.5	7.5	7.5	2	40	83.27	297.40	112.22	82.85	223.21	78.29
							60	110.70	393.37	112.22	106.89	295.09	68.92
							80	136.69	484.59	112.22	135.16	371.30	62.31
500	30	14	25.5	8.5	8.5	2	40	73.33	304.90	108.57	74.70	195.45	78.21
							60	100.14	405.33	108.57	96.50	265.80	68.90
							80	122.74	496.80	108.57	122.09	337.89	62.31

3.1 กราฟจากการวิเคราะห์ด้วย FEA และทฤษฎีของ M.W Kellogg

รูปที่ 4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาว แอ็กเพนชันลูป (L₂) กับอุณหภูมิเท่ากับ 200, 300, 400 °C และ 500 °C เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การขยายของท่อ (α) เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นความยาวแอ็กเพนชันลูป (L₂) ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวไม่ให้สูงเกินกว่าค่าความเค้นอนุญาตของวัสดุที่ใช้ ทำท่อ รูปที่ 5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดจากการขยายตัวของท่อที่ความหนาต่อเท่ากับ Schedule number 40, 60 และ 80 และที่อุณหภูมิเท่ากับ 200, 300, 400 °C และ 500 °C, ความยาวแอ็กเพนชันลูปเท่ากับ L₂ เห็นได้ว่า เมื่อความหนาต่อเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นสูงสุด (S_Z) จากการขยายตัวจะลดลง และเมื่อเทียบค่าความเค้นสูงสุดจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นอนุญาตจากทฤษฎีของ M.W. Kellogg เห็นได้ว่า ความเค้นสูงสุดที่คำนวณได้ไม่เกินค่าความเค้นอนุญาต (S_E < S_A) ซึ่งอยู่ภายใต้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASME B31.1 รูปที่ 6 - 7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและโมเมนต์จากการขยายตัวของท่อเทียบกับ Schedule Number 40, 60 และ 80 และความยาวแอ็กเพนชันลูปเท่ากับ L₂ โดยรูปที่ (ก) เป็นผลการคำนวณจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และรูปที่ (ข) เป็น

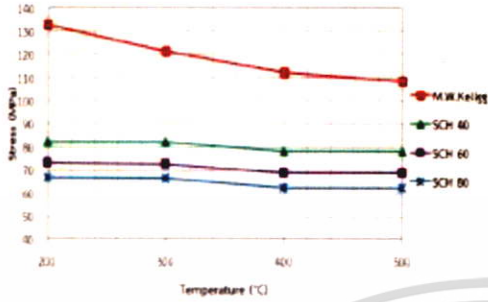
ผลการคำนวณจากวิธีทฤษฎีของ M.W. Kellogg จากรูปที่ 6(ก) - 6(ข) เห็นได้ว่า เมื่อมีความหนาต่อเพิ่มขึ้นแรงที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวกระทำที่จุดยึด Anchor ในแนวแกน Z เพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 7(ก) - 7(ข) พบว่า เมื่อมีความหนาต่อเพิ่มขึ้นโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวกระทำที่จุดยึด Guide ในแนวแกน Y เพิ่มขึ้น เนื่องจากทอมิค่าโมเมนต์เฉื่อย (Moment of Inertia) มีความมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากทอมิค่าโมเมนต์เฉื่อย (Moment of Inertia) มีค่ามากขึ้น จึงทำให้แรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวของทอมิค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาว แอ็กเพนชันลูป(L₂) กับอุณหภูมิ

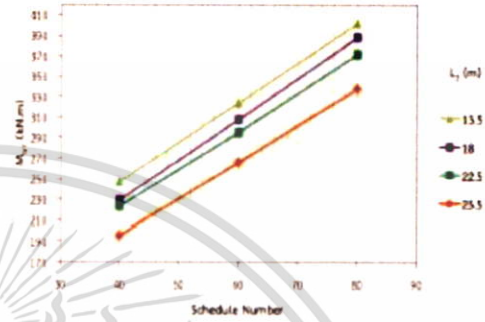
CST0017

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

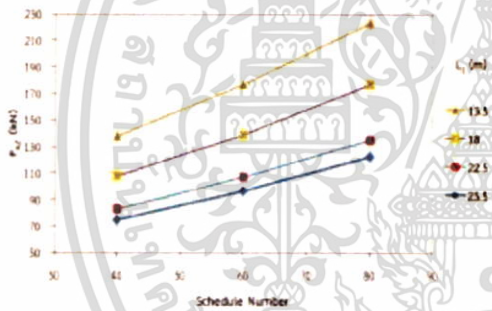


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดจากการขยายตัวกับความหนาต่อตาม Schedule number 40, 60 และ 80 ที่อุณหภูมิเท่ากับ 200, 300, 400 °C และ 500 °C, จาก FEA เทียบกับความเค้นสูงสุดจากการขยายตัวจากทฤษฎี M.W. Kellogg และค่าความเค้นอนุญาตจาก ASME B31.1

รูปที่ 6(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจากการขยายตัวกับ Schedule Number เท่ากับ 40, 60 และ 80 ที่เกิดขึ้น ในแนวแกน Z ที่จุดยึด Anchor จากทฤษฎี M.W. Kellogg

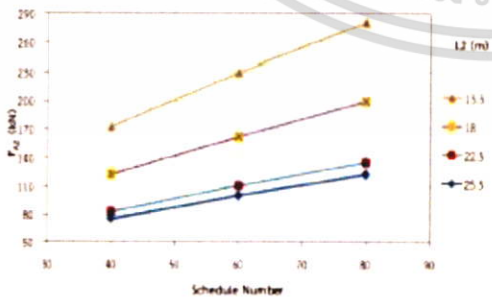


รูปที่ 7(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จากการขยายตัวกับ Schedule Number เท่ากับ 40, 60 และ 80 ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y ที่จุดยึด Guide จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 6(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจากการขยายตัวกับ Schedule Number เท่ากับ 40, 60 และ 80 ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z ที่จุดยึด Anchor จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 7(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์จากการขยายตัวกับ Schedule Number เท่ากับ 40, 60 และ 80 ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y ที่จุดยึด Guide จากทฤษฎี M.W. Kellogg



4. สรุปผล

จากการนำทฤษฎีของ M.W. Kellogg มาใช้ในการออกแบบขนาดของเอ็กสเฟนชันลูป แล้วนำไปคำนวณด้วยจากวิธีคำนวณด้วย FEA ซึ่งได้ผลการคำนวณค่าความเค้น, โมเมนต์และ แรงที่กระทำกับเอ็กสเฟนชันลูปสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความยาวเอ็กสเฟนชันลูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0017

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



($L_2=2H+W$), อุณหภูมิ และขนาดความหนาท่อ คือ เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น การขยายตัวของท่อจะมากขึ้น ขนาดความยาวเอ็กซ์แพนชันลูป (L_2) จะเพิ่มขึ้นเพื่อลดความเค้นที่เกิดจากการขยายตัวทางความร้อนไม่ให้ความเค้นที่เกิดขึ้นสูงเกินกว่าค่ากำหนดของวัสดุที่ใช้ทำท่อ และเมื่อขนาดความยาวเอ็กซ์แพนชันลูป (L_2) และขนาดความหนาท่อเพิ่มขึ้น ทำให้แรงและโมเมนต์เนื่องจากเกิดการขยายตัวที่กระทำกับท่อเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าความเค้นที่กระทำกับท่อลดลง และจากการเปรียบเทียบผลของแรง และ โมเมนต์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FEA เทียบกับทฤษฎีของ M.W. Kellogg ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน และจากการเปรียบเทียบค่าความเค้น (S_2) ที่ได้จากรหัสคำนวณด้วย FEA ไม่เกินค่าความเค้นอนุญาต S_a จากทฤษฎีของ M.W. Kellogg ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนด ASME B31.1 ที่ใช้การออกแบบระบบท่อ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ทีทีซีแอล จำกัดมหาชน ที่ให้การสนับสนุนงานข้อมูลสำหรับงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gaurav Bhende¹, Girish Tembhare² "Stress Intensification & Flexibility in Pipe Stress Analysis" Department of Mechanical Engineering, VJTI, Mumbai, India Vol.3, Issue.3, May-June. 2013 pp-1324-1329 ISSN: 2249-6645
- [2] Andrzej Banaszeka, Radovan Petrovic³ and Bartlomiej Zylinskie "Finite element method analysis of pipe material temperature changes influence on line expansion loops"
a. Faculty of Maritime Technology, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland,
b. Faculty of Mechanical Engineering Kraljevo, University of Kragujevac, Serbia,
c. Strata Marine & Off shore AS, Oslo, Norway
Year 2011, Vol. 15, No. 1, pp. 81-90
- [3] João Pedro Amaral Vidigal da Silva "Development of calculation methodologies for

the design of piping systems" Mechanical Engineering Department, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

[4] ASME B31.1 (2004) Power Piping, ASME, American Society of Mechanical Engineers.

[5] ASME B31.3 (2004) Process Piping, ASME, American Society of Mechanical Engineers.

[6] Kellogg, The M.W., Company (1956) Design of Piping Systems, 2nd ed., New York, John Wiley & Sons.

[7] Sam Kannappan, P.E. (1986). *Introduction to Pipe Stress Analysis*, John Wiley & Sons, New York.

[8] วิทยา สงวนวรรณ. การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย NX CAE. สมุทรปราการ: เอนจิเนียร์แอนด์คิเคคพลัส.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสมเกียรติ ไข่มุสิก
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532
ที่อยู่	209 หมู่ 15 ตำบล ตำนาน อำเภอ เมือง จังหวัด พัทลุง 93000
อีเมล	kh.somkiat@yahoo.com , khaimoosik@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา (วิทย์ - คณิต) โรงเรียนพัทลุง ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ.2554	นักศึกษาฝึกงานฝ่ายบำรุงรักษาเครื่องกล การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (เขื่อนรัชชประภา)
พ.ศ.2556-2560	วิศวกรวางแผนและออกแบบระบบท่อ บมจ. ทีทีซีแอล
ปัจจุบัน	ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายโรงงาน บมจ. ยูนิวานิชน้ำมันปาล์ม งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ สมเกียรติ ไข่มุสิก, จำลอง ปราบแก้ว “การวิเคราะห์หาค่าความเค้นในท่อเอ็กซ์แพนชันลูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, ME NETT, ครั้งที่ 30 ตุลาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้