

ตัวประกอบยืดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัด  
ในระนาบและนอกระนาบสำหรับสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา

FLEXIBILITY FACTORS OF UNREINFORCED BRANCH PIPE CONNECTIONS  
SUBJECTED TO IN-PLANE AND OUT-OF-PLANE BENDING MOMENTS FOR  
FIXED-SIMPLY END CONDITIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2560  
KMITL-2017-EN-M-030-176

ตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัด  
ในระนาบและนอกระนาบสำหรับสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา

FLEXIBILITY FACTORS OF UNREINFORCED BRANCH PIPE CONNECTIONS  
SUBJECTED TO IN-PLANE AND OUT-OF-PLANE BENDING MOMENTS FOR  
FIXED-SIMPLY END CONDITIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2560  
KMITL-2017-EN-M-030-176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLEXIBILITY FACTORS OF UNREINFORCED BRANCH PIPE CONNECTIONS  
SUBJECTED TO IN-PLANE AND OUT-OF-PLANE BENDING MOMENTS FOR  
FIXED-SIMPLY END CONDITIONS



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  
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2017-EN-M-030-176



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบ  
และนอกระนาบสำหรับสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา

Thesis Title Flexibility Factors of Unreinforced Branch Pipe Connections Subjected  
to In-plane and Out-of-Plane Bending Moments for Fixed-Simply End  
Conditions

นักศึกษา นายสดีไส ล่ำธาร

รหัสประจำตัว 55610964

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-030-176

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ฐิตะพล	หุยนันท์	
รศ.ดร.จำลอง	ปราบแก้ว	
ผศ.ดร.จิตราภรณ์	วงศ์งาม	
ผศ.ดร.เอกพจน์	ตันตราภีวัฒน์	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อจากนี้จึงเลิกออกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบสำหรับสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา

นักศึกษา

นายสดีไสย์ ล้ำธาร

รหัสประจำตัว

55610964

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

### บทคัดย่อ

ตัวประกอบยึดหยุ่นเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ความเค้นของระบบท่ออุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบจากภายนอก ความไม่แม่นยำของตัวประกอบยึดหยุ่นส่งผลให้เกิดผลลัพธ์ที่ไม่แม่นยำสำหรับการคำนวณโมเมนต์ดัดและความเค้นจากการขยายตัวของระบบท่อ งานวิจัยนี้ศึกษาเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลอง อิทธิพลของความยาวของท่อหลักและท่อแยกต่อตัวประกอบยึดหยุ่นและนำเสนอสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นต่อตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ ( $d/D$ ,  $D/T$ ,  $t/T$ ) ในช่วง  $0.1 \leq d/D \leq 1$ ,  $20 \leq D/T \leq 250$  และ  $d/D \leq t/T \leq 3$  ที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดกระทำที่ปลายท่อแยก สำหรับสภาพจุดปลายของท่อหลักยึดแน่น-ธรรมดา โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยคุณสมบัติของการยึดหยุ่นเชิงเส้น ขั้นแรกการดำเนินการสอบเทียบแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบความเค้นลัพธ์ของการต่อท่อแยกที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อมูลผลการทดลองที่มีอยู่ ต่อมาศึกษาการลู่เข้าของความเค้นในแต่ละเทคนิค จากนั้นศึกษาผลกระทบของความยาวท่อหลักและท่อแยกต่อตัวประกอบยึดหยุ่น การหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นและสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นได้ถูกดำเนินการตามลำดับ จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของความเค้นลัพธ์สอดคล้องกับข้อมูลผลการทดลองเป็นอย่างดี นอกจากนี้ผลลัพธ์จากการคำนวณได้แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อหลักและท่อแยกด้วยสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดามีผลกระทบต่อตัวประกอบยึดหยุ่นจากการพิจารณาการลู่เข้าของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบยึดหยุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Flexibility Factors of Unreinforced Branch Pipe Connections Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Bending Moments for Fixed-Simply End Conditions
Student	Mr. Sodsai Lamtharn
Student ID	55610964
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Monsak Pimsarn

## Abstract

Flexibility factors are an important parameter in pipe stress analysis, especially, for branch pipe connections subjected to external moments, in-plane and out-of-plane. Inaccuracy of these can influence to calculated moments which result in inaccurate displacement stress range. The purpose of this paper is to investigate the modeling technique analysis, the effects of lengths of the run and branch pipes on flexibility factors and correlation equations for these flexibility factors on geometry parameters ( $d/D$ ,  $D/T$ ,  $t/T$ ) for range  $0.1 \leq d/D \leq 1$ ,  $20 \leq D/T \leq 250$  and  $d/D \leq t/T \leq 3$  subjected to in-plane and out-of-plane bending moments for fixed-simply end conditions. Finite element method with linear elastic property is employed for stress and flexibility factor evaluation. At first, FEM stress results of run-branch pipe intersection are verified by comparing with the available experimental data, the convergence study on stress of each technique, the study on effect of lengths for the run and branch pipes, the determination of flexibility factors and correlation equations for these flexibility factors was carried out, respectively. The simulated result, the stress distribution trend, shows good agreement with the experimental data. Moreover, the FEA simulations of varying lengths of the run and branch pipes with fixed-simply end conditions, were performed and the calculated results indicate that run and branch pipe lengths have an effect on flexibility factors by considering convergent of flexibility factors percentage difference.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาและอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ยิงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ คุณครูทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอน แนะนำและตักเตือนผู้เขียนจนมีทุกวันนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ตั้งแต่ผู้เขียนได้เข้ามาศึกษาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษานี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อประสงค์ ลำธาร คุณแม่ปราณอม ลำธาร นางสาววิวรรณ หนูเขียว ผู้เป็นภรรยาและเด็กชายภูตะวัน ลำธาร เด็กชายภูบดีนทร์ ลำธาร ผู้เป็นบุตรชาย ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุน และเป็นแรงผลักดันผู้เขียนทั้งในด้านการเขียนและการดำเนินชีวิตมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้คงจะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนัก

นายสดใส ลำธาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6เค้าโครงวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับความเค้นแบบ 3 มิติ ทั่วไป.....	9
3.1.1 เอลิเมนต์ทรงตันแบบ 3 มิติ ชนิด 20 node isoparametric brick.....	9
3.1.2 สูตรของเอลิเมนต์ทรงตันแบบ 3 มิติ ชนิด 20 node isoparametric brick.....	10
3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย่อยชนิด Submodeling.....	10
3.2.1 เทคนิค Shell to solid submodeling.....	11
3.2.2 เทคนิค Solid to solid submodeling.....	11
3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย่อยชนิด Shell to solid coupling.....	12
3.4 การประมาณความเค้นแบบเชิงเส้น (Linearization of stress).....	12
3.4.1 เส้นระดับความเค้น (Stress classification lines).....	12
3.4.2 การหาความเค้นเชิงเส้นโดยวิธีรวมความเค้น.....	14
3.5 ตัวประกอบยึดหยุ่น (Flexibility factor).....	15
บทที่ 4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	19
4.1 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element model).....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.1 การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง (Benchmark study) .....	19
4.2 เทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อย (Submodel technique) .....	26
4.2.1 Whole modeling .....	26
4.2.2 Solid to solid submodeling .....	29
4.2.3 Shell to solid submodeling .....	36
4.2.4 Shell to solid coupling .....	43
4.3 การหาความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม .....	50
4.3.1 ขั้นตอนการดำเนินการหาความยาวของท่อแยก ( $L_b$ ) ที่เหมาะสม .....	50
4.3.2 ขั้นตอนการดำเนินการหาความยาวของท่อหลัก ( $L_1$ ) ที่เหมาะสม .....	51
4.3.3 ขั้นตอนการดำเนินการหาความยาวของท่อหลัก ( $L_2$ ) ที่เหมาะสม .....	51
4.3.4 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 0.1$ .....	51
4.3.5 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 0.2$ .....	56
4.3.6 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 0.333$ .....	57
4.3.7 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 0.5$ .....	57
4.3.8 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 0.75$ .....	60
4.3.9 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 1$ .....	65
4.4 ตัวประกอบยึดหยุ่น .....	71
4.5 สมการความสัมพันธ์ .....	72
บทที่ 5 ผลการวิจัย .....	75
5.1 บทนำ .....	75
5.2 ผลของการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง .....	75
5.2.1 ภาวะโมเมนต์ดัดในระนาบ .....	76
5.2.2 ภาวะโมเมนต์ดัดนอกระนาบ .....	79
5.3 ผลของการศึกษาเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อย .....	82
5.4 ผลของการหาความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม .....	85
5.4.1 ความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสมที่อัตราส่วน $d/D = 0.1$ .....	85
5.5 ผลของการหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่น .....	88
5.6 ผลของการหาสมการความสัมพันธ์ .....	91
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	93
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	93
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และวางอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก .....	98
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	99
ประวัติผู้เขียน .....	107



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงช่วงขอบเขตของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต .....	3
4.1 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง .....	25
4.2 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Whole model .....	28
4.3 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองรวม (Solid element) .....	34
4.4 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element) .....	35
4.5 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองรวม (Shell element) .....	41
4.6 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element) .....	42
4.7 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลอง Shell to solid coupling .....	49
4.8 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 0.1$ .....	53
4.9 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 0.1$ .....	54
4.10 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 0.2$ .....	58
4.11 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 0.2$ .....	59
4.12 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 0.333$ .....	61
4.13 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 0.333$ .....	62
4.14 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 0.5$ .....	63
4.15 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 0.5$ .....	64
4.16 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 0.75$ .....	67
4.17 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 0.75$ .....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.18 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 1$ .....	69
4.19 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน $d/D = 1$ .....	70
4.20 แสดงช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต.....	72
4.21 แสดงความยาวท่อหลักและท่อแยกสำหรับการวิเคราะห์ตัวประกอบยึดหยุ่นด้วย FEA.....	72
4.22 ตัวประกอบยึดหยุ่น $K_i$ และ $K_o$ ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA).....	72
5.1 แสดงความยาวท่อหลักและท่อแยกสำหรับการวิเคราะห์ตัวประกอบยึดหยุ่นด้วย FEA.....	88
5.2 ตัวประกอบยึดหยุ่น $K_i$ และ $K_o$ ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA).....	89
5.3 ความแตกต่างระหว่าง FEA กับสมการความสัมพันธ์.....	91



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 การแบ่งรูปร่างลักษณะของโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ .....	9
3.2 เอลิเมนต์ทรงตันแบบ 3 มิติ ชนิด 20 node isoparametric brick.....	9
3.3 กลางโซนใน Shell to solid submodeling.....	11
3.4 องค์ประกอบของความเค้นเชิงเส้น .....	12
3.5 เส้นระดับความเค้น.....	13
3.6 แนวเส้นระดับความเค้นที่ลากผ่านผนังความหนา .....	13
3.7 องค์ประกอบของความเค้น .....	14
3.8 แผนภาพของการต่อท่อแยกและสภาพเงื่อนไขขอบเขต .....	15
3.9 แนวความคิดของตัวประกอบยึดหยุ่น.....	18
3.10 การหมุนที่จุดปลายของท่อแยก .....	18
4.1 ภาพของจัดวางในการทดลองของปัญหา ORNL-1.....	19
4.2 แผนภาพของการต่อท่อแยก, สภาพเงื่อนไขขอบเขตและการกระทำของโมเมนต์ตัด จากภายนอกของปัญหา ORNL-1.....	20
4.3 ระยะขอบเขตของการยุบตัวบนท่อหลัก $3.0\sqrt{RT}$ .....	21
4.4 ระยะขอบเขตของการยุบตัวบนท่อแยก $3.0\sqrt{rt}$ .....	21
4.5 ขนาดความกว้างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวง.....	22
4.6 จำนวนเอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยก .....	23
4.7 รูปแบบการ Mesh สำหรับการศึกษเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง.....	23
4.8 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหา ORNL-1.....	24
4.9 รูปแบบการ Mesh สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์ เอลิเมนต์แบบ Whole model .....	27
4.10 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลอง ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Whole model .....	27
4.11 จำนวนเอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกในแบบจำลอง รวม (Solid element) .....	29
4.12 รูปแบบการ Mesh สำหรับแบบจำลองรวม (Solid element) .....	30
4.13 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองรวม (Solid element).....	30
4.14 บริเวณที่สนใจของการเชื่อมต่อที่อยู่ภายในระยะขอบเขตของการยุบตัว .....	31
4.15 บริเวณของแบบจำลองย่อยที่เลือก.....	32
4.16 จำนวนเอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกในแบบ จำลองย่อย (Solid element).....	32
4.17 รูปแบบการ Mesh สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element).....	33
4.18 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element) .....	33
4.19 การเชื่อมต่อของเอลิเมนต์แบบ Shell ของท่อหลักและท่อแยกใน แบบจำลองรวม (Shell element).....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	รูปแบบการ Mesh สำหรับแบบจำลองรวม (Shell element).....37
4.21	แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองรวม (Shell element).....37
4.22	บริเวณที่สนใจของการเชื่อมต่อที่อยู่ภายในระยะขอบเขตของการยู่ตัว .....38
4.23	บริเวณของแบบจำลองย่อยที่เลือก.....39
4.24	จำนวนเอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกใน แบบจำลองย่อย (Solid element) .....39
4.25	รูปแบบการ Mesh สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element).....40
4.26	แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element) .....40
4.27	การเชื่อมต่อกันของเอลิเมนต์แบบทรงตันกับเอลิเมนต์แบบผนังบาง .....43
4.28	Surface-based สำหรับยึดเอลิเมนต์ผนังบางไปยังเอลิเมนต์ทรงตัน.....44
4.29	บริเวณแบบจำลองที่สร้างด้วยเอลิเมนต์ผนังบาง.....44
4.30	รูปแบบของโครงข่ายจุดต่อของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบเอลิเมนต์ผนังบาง (a) ท่อแยก (b) ท่อหลัก.....45
4.31	บริเวณแบบจำลองที่สร้างด้วยเอลิเมนต์ทรงตัน .....45
4.32	จำนวนเอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยก.....46
4.33	โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยู่ตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบเอลิเมนต์ทรงตัน .....47
4.34	แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลอง Shell to solid coupling .....47
4.34a	รายละเอียดแสดงส่วน Solid element และ Shell element .....48
4.35	แผนภาพของการต่อท่อแยก, สภาพจุดปลายและการกระทำ ของโมเมนต์ดัดของการศึกษา.....50
4.36	แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และสภาพเงื่อนไขขอบเขตของการรองรับ .....52
4.37	โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยู่ตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่อัตราส่วน $d/D = 0.1$ .....52
4.38	แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบ ที่อัตราส่วน $d/D = 0.1$ .....55
4.39	แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดนอกระนาบ ที่อัตราส่วน $d/D = 0.1$ .....55
4.40	โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยู่ตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่อัตราส่วน $d/D = 0.2$ .....56
4.41	โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยู่ตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่อัตราส่วน $d/D = 0.333$ .....57
4.42	โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยู่ตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่อัตราส่วน $d/D = 0.5$ .....60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43	โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่อัตราส่วน $d/D = 0.75$ ..... 65
4.44	โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่อัตราส่วน $d/D = 1$ ..... 65
4.45	แผนภาพของการต่อท่อแยกสำหรับหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่น..... 71
4.46	โครงข่ายจุดต่อบริเวณระยะการยุบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... 71
5.1	ตัวอย่างขององค์ประกอบความเค้นเชิงเส้น..... 75
5.2	นิยามของระทาง $S$ ..... 76
5.3	การกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาวในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก..... 76
5.4	การกระจายตัวของความเค้นตามแนวขวางในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก..... 77
5.5	การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก ..... 77
5.6	การกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาวในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก..... 78
5.7	การกระจายตัวของความเค้นตามแนวขวางในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก..... 78
5.8	การกระจายตัวของความเค้นเค้นหลักสูงสุดในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก ..... 79
5.9	การกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาวในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก..... 79
5.10	การกระจายตัวของความเค้นตามแนวขวางในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก ..... 80
5.11	การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก ..... 80
5.12	การกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาวในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก..... 81
5.13	การกระจายตัวของความเค้นตามแนวขวางในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก..... 81
5.14	การกระจายตัวของความเค้นเค้นหลักสูงสุดในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก ..... 82
5.15	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาว ในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก ..... 83
5.16	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นตามแนวขวาง ในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก ..... 83
5.17	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดใน ระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก ..... 84
5.18	แสดงการเปรียบเทียบเวลารวมที่ใช้ในการประมวลผลของแต่ละเทคนิค..... 84
5.19	อิทธิพลของความยาว $L_b$ ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น $K_i$ ที่ $d/D = 0.1$ ..... 85
5.20	อิทธิพลของความยาว $L_b$ ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น $K_o$ ที่ $d/D = 0.1$ ..... 86
5.21	อิทธิพลของความยาว $L_1$ ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น $K_i$ ที่ $d/D = 0.1$ ..... 86
5.22	อิทธิพลของความยาว $L_1$ ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น $K_o$ ที่ $d/D = 0.1$ ..... 87
5.23	อิทธิพลของความยาว $L_2$ ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น $K_i$ ที่ $d/D = 0.1$ ..... 87
5.24	อิทธิพลของความยาว $L_2$ ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น $K_o$ ที่ $d/D = 0.1$ ..... 88
5.25	กราฟแสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบยึดหยุ่นในระนาบ ( $K_i$ ) กับอัตราส่วน $d/D$ ที่ได้ จากการศึกษานี้กับข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน [1, 11, 12, 13, 22, 26]..... 92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 5.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบยึดหยุ่นนอกระนาบ ( $K_o$ ) กับอัตราส่วน  $d/D$  ที่ได้จากการศึกษานี้กับข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน [1, 11, 12, 13, 22, 26].....92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรง (Branch connection or unreinforced fabricated) ได้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับการต่อท่อแยก (Branch pipe connection) ในระบบท่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานปิโตรเคมี โรงงานผลิตปุ๋ย โรงงานน้ำตาล โรงงานผลิตอาหารและโรงไฟฟ้า เป็นต้น เมื่อท่อแยก (Branch pipe) ได้รับโมเมนต์ดัด (Bending moment) อันเนื่องมาจากการขยายตัวทางความร้อนของระบบท่อมากกระทำที่ตัวท่อ โมเมนต์ดัดนั้นจะทำให้ท่อแยกเกิดการเสียรูปและค่าความหนาแน่นของความเค้นตรงบริเวณรอยเชื่อมต่อของท่อแยกกับท่อหลัก (Run pipe) จะมีค่าสูงขึ้น

ตัวประกอบยืดหยุ่น (Flexibility factors) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์ความเค้นของระบบท่ออุตสาหกรรมที่มีการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงอยู่ในระบบท่อ โดยที่ตัวประกอบยืดหยุ่นมีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเค้น (Displacement stress range) ของระบบท่อ ความไม่แม่นยำของตัวประกอบยืดหยุ่นสามารถนำไปสู่การคำนวณความเค้นของระบบท่อที่ไม่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามข้อแนะนำของมาตรฐานระบบท่อ ASME B31.3 ตอนที่ 319.3 [7] ได้กำหนดให้ตัวประกอบยืดหยุ่นสำหรับการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงมีค่าเท่ากับ 1 บนสมมติฐานที่ว่าจุดเชื่อมต่อของท่อหลักและท่อแยกเป็นเสมือนจุดแข็งเกร็ง (Rigid) จุดเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็งตามคำแนะนำของมาตรฐานการออกแบบระบบท่อในปัจจุบันนั้นสามารถที่จะก่อให้เกิดความไม่แม่นยำในการคำนวณโมเมนต์ดัดและความเค้นบนท่อแยก ซึ่ง WRC Bulletin 329 [8] ได้แสดงตัวอย่างผลของตัวประกอบยืดหยุ่นที่ส่งผลกระทบต่อ การคำนวณความเค้นของท่อแยกในระบบท่ออุตสาหกรรม

สำหรับการเชื่อมต่อกันของทรงกระบอกผนังบาง (Cylinder-to-cylinder intersection) ที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดจากภายนอก (External moment) นั้นขนาดและตำแหน่งของความเค้นที่เกิดขึ้นบนทรงกระบอกเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างมากที่ต้องหามาให้ได้ โดยที่ความเค้นนั้นเป็นสาเหตุของความล้มเหลว (Failure) ของโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันของรูปทรงกระบอกผนังบาง การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางเพื่อแก้ไขปัญหาซึ่งมีบางข้อแนะนำสำหรับการสร้างแบบจำลองทรงกระบอกต่อกับทรงกระบอกโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความเค้น (ดูใน [2, 15] สำหรับตัวอย่าง) โดยที่ WRC 493 [15] ได้บรรยายและแนะนำกลยุทธ์และวิธีการสร้างแบบจำลองแบบ 3 มิติ แต่ที่ผ่านมามีการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ส่วนใหญ่ใช้ทั้งหมดของแบบจำลอง (Whole model) ในการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลอง ในขณะที่การใช้เทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อย (Solid-solid and shell-solid submodel) และแบบจำลองแบบเชื่อมยึด (Shell-solid coupling) ที่ผ่านมายังไม่ได้มีการพิจารณาเปรียบเทียบทั้งในด้านของความแม่นยำและเวลาที่ใช้ในการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองรวมทั้งเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของแต่ละเทคนิค

สำหรับการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาความเค้นที่เกิดขึ้นบนทรงกระบอกที่ต่อกับทรงกระบอก เอลิเมนต์แบบต่อเนื่อง 3 มิติ ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์เพื่อที่จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดำเนินการวิเคราะห์การยืดหยุ่นเชิงเส้นของทรงกระบอกที่ต่อกับทรงกระบอก ซึ่งความเค้นที่สนใจในที่นี้คือความเค้นเชิงเส้น (Stress linearization) ที่ได้จากการประมาณความเค้นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นผลรวมของ Membrane stress กับความเค้นดัด (Bending stress) โดยความเค้นเชิงเส้นจะได้ออกคำนวณและตรวจสอบตามวิธีการที่ให้ไว้ใน WRC 429 [25]

เมื่อการดำเนินการวิเคราะห์ความเค้นในระบบท่อได้ถูกดำเนินการให้มีความใกล้เคียงตามพฤติกรรมของระบบท่อ สิ่งเหล่านี้จะช่วยเพิ่มพูนคุณค่าทางวิศวกรรม (Value engineering) ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองที่ไม่พึงประสงค์ในเชิงการออกแบบทางวิศวกรรมระบบท่อและยังส่งผลให้สามารถที่จะลดลงในเรื่องของต้นทุนของวัสดุท่อ ตัวประกอบท่อ พื้นที่ที่ใช้ในการวางระบบท่อและราคาค่าการก่อสร้างต่าง ๆ ได้อีกด้วย

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการหาค่าความเค้นบริเวณใกล้ ๆ กับจุดเชื่อมต่อของท่อหลักและท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบ (In-plane bending moments) และโมเมนต์ดัดนอกระนาบ (Out-of-plane bending moments)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบความยาวของท่อหลักและท่อแยกต่อตัวประกอบยึดหยุ่นสำหรับการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบ

1.2.3 เพื่อศึกษาและพัฒนาการหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบ

1.2.4 นำเสนอสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต ( $d/D$ ,  $D/T$  และ  $t/T$ ) สำหรับการหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่น

1.2.5 เปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน [1, 11, 12, 13, 22, 26]

## 1.3 สมมติฐานที่ใช้ในการวิจัย

1.3.1 ใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยคุณสมบัติของการยึดหยุ่นเชิงเส้นในการศึกษาและวิเคราะห์การต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบจากภายนอกเท่านั้น

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ใช้ตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตสำหรับการศึกษาตัวประกอบยึดหยุ่น โดยที่ช่วงขอบเขตของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตที่ใช้เหมือนกันกับงานก่อนหน้านี้นี้ของ Widera [1] และได้ขยายช่วงของอัตราส่วน  $d/D$  ให้น้อยลงไปอีก ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 1.1 ซึ่งช่วงขอบเขตของค่าเหล่านั้นได้มาจากการแนะนำที่กระทำโดย PVRC Task Group on Large Diameter Shell Intersections [1, 17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 1.1** แสดงช่วงขอบเขตของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต

Number of models	$t/T$	$D/T$	$d/D$
13(*)	0.1, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.1
14(**)	0.2, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.2
14(***)	0.333, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.333
14(****)	0.5, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.5
12	0.75, 1, 3	20, 60, 100, 150	0.75
3	1	20, 60, 100	1

(\*) ยกเว้น  $d/D = 0.1$  ด้วย  $D/T = 20$  และ  $t/T = 1$ .

(\*\*) ยกเว้น  $d/D = 0.2$  ด้วย  $D/T = 20$  และ  $t/T = 3$ .

(\*\*\*) ยกเว้น  $d/D = 0.333$  ด้วย  $D/T = 20$  และ  $t/T = 3$ .

(\*\*\*\*) ยกเว้น  $d/D = 0.5$  ด้วย  $D/T = 20$  และ  $t/T = 3$ .

1.4.2 ใช้ตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตสำหรับการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองรวมทั้งการศึกษาพัฒนาเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการหาค่าความเค้นเชิงเส้นที่บริเวณใกล้ ๆ กับจุดเชื่อมต่อกันของทรงกระบอกผนังบาง ซึ่งใช้ขอบเขตของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตที่  $L_b = L_1 = L_2 = 14.5$  นิ้ว และ  $d/D = t/T = 0.5$ ,  $D/T = 99$  และ  $D = 9.9$  นิ้วตามลำดับ ซึ่งเหมือนกับปัญหาของ ORNL-1 [27]

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถเลือกใช้เทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการหาค่าความเค้นที่บริเวณใกล้ ๆ กับจุดเชื่อมต่อกันของทรงกระบอกผนังบาง เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการทางด้านความแม่นยำและเวลาที่ใช้

1.5.2 ผลลัพธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นที่ได้จากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ การคำนวณและวิเคราะห์ความเค้นของระบบท่ออุตสาหกรรมที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดได้

1.5.3 สมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ การคำนวณและวิเคราะห์ความเค้นของระบบท่ออุตสาหกรรมที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดได้อย่างสะดวกและครอบคลุมช่วงของขนาดท่อที่ใช้ในอุตสาหกรรม

1.5.4 ลดต้นทุนการผลิตของโรงงาน ลดต้นทุนของวัสดุท่อ ตัวประกอบท่อ พื้นที่ที่ใช้ในการวางระบบท่อและราคาค่าการก่อสร้างต่าง ๆ

## 1.6 เค้าโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบด้วย 6 บท บทนี้ (บทที่ 1) กล่าวถึงภาพรวมของการใช้งานและผลกระทบของตัวประกอบยึดหยุ่นที่ใช้ในระบบท่ออุตสาหกรรมและการหาขนาดและตำแหน่งของ

ความเค้นที่เกิดขึ้นบนการต่อแยกของทรงกระบอกกับทรงกระบอกโดยย่อ เพื่อให้เข้าใจถึงความไม่เท่ากันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้ บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย่อย เช่น Whole modeling, Solid to solid submodeling, Shell to solid submodeling และ Shell to solid coupling การประมาณความเค้นแบบเชิงเส้น ตัวประกอบยึดหยุ่น บทที่ 4 ขั้นตอนของการศึกษา ในบทนี้ เป็นการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง เทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย่อย การหาความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม การหาตัวประกอบยึดหยุ่น การสร้างสมการความสัมพันธ์และเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้กับข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน บทที่ 5 ผลการวิจัย ในบทนี้ นำเสนอผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อมูลผลการทดลองที่มีอยู่ ผลการเปรียบเทียบของแต่ละเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย่อย ความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม ค่าตัวประกอบยึดหยุ่นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการความสัมพันธ์ และในบทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Steele และ Steel [6] ได้ศึกษาหาค่าความเค้นของทรงกระบอกที่ต่อเชื่อมด้วยหัวฉีด (Nozzle) ในแนวรัศมีที่อยู่ภายใต้ภาระแรงแนวตั้งฉากกับทรงกระบอก (Normal), โมเมนต์ดัดในแนวตามความยาว (Longitudinal) และโมเมนต์ดัดในแนวตามเส้นรอบวง (Circumferential) ของทรงกระบอก โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ FAST2 ในการศึกษาและพัฒนาสำหรับทรงกระบอกผนังบางที่อยู่ในช่วงของการยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear of elasticity) และใช้ช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตที่  $50 \leq D/T \leq 2530$ ,  $0.1 \leq d/D \leq 0.5$  และ  $6.5 \leq d/t \leq 240$  แต่ Steele ไม่ได้บอกถึงสภาพจุดที่ปลายการยึดของทรงกระบอกทั้งสองข้างที่ใช้ในการศึกษา

Widera และ Wei [2] ดำเนินการวิเคราะห์ตัวแปรทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ ซึ่งอยู่ภายใต้ภาระจากภายนอกชนิดต่าง ๆ โดยใช้ 4-node shell elements และความเข้มของความเค้นมากที่สุด (Maximum stress intensity) ของ Nodal ได้ถูกนำมาใช้สำหรับเป็นค่าความเข้มของความเค้นมากที่สุดของระบบ ซึ่ง Nodal stress เท่านั้นที่ถูกพิจารณาเพื่อหาค่ามากที่สุดสำหรับความเข้มของความเค้นที่บริเวณรอยเชื่อมต่อของทรงกระบอก โดยยกเว้นที่ nodes ที่อยู่บนจุดเชื่อมต่อ ซึ่งภาระจากภายนอกชนิดต่าง ๆ ที่ได้พิจารณาคือ โมเมนต์ดัดในระนาบ, โมเมนต์ดัดนอกระนาบและแรงในแนวแกน (Axial force) ที่กระทำลงบนจุดปลายของทรงกระบอกแยก ส่วนที่ปลายของทรงกระบอกใหญ่อยู่ภายใต้สภาพจุดปลายที่ปลายข้างหนึ่งของท่อหลักเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed support) ส่วนที่จุดปลายข้างที่เหลือถูกปล่อยแบบอิสระ (Free) ซึ่งได้ทำการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลอง จำนวน 43 แบบจำลองเพื่อที่จะหาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต (Correlation equations) สำหรับการใช้ทำนายค่าความเข้มของความเค้นมากที่สุดของการต่อกันของรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ที่อยู่ภายใต้ภาระจากภายนอก โดยที่สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตถูกจำกัดการใช้งานไว้ในช่วง  $20 \leq D/T \leq 250$ ,  $0.333 \leq d/D \leq 1$  และ  $d/D \leq t/T \leq 3$  สำหรับใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบของการเชื่อมต่อกันของผนังบางรูปทรงกระบอกที่อยู่ภายใต้ภาระจากภายนอกชนิดต่าง ๆ เหล่านั้น

The ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section 3 NB-3687.5 [11] ได้มีการจัดเตรียมสมการจำนวน 2 สมการ สำหรับการหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นในระนาบและนอกระนาบสำหรับการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบบนพื้นฐานของการศึกษาทดลองและวิเคราะห์โดย [3] แต่ไม่ได้บอกถึงสภาพจุดที่ปลายการยึดทั้งสองข้างของท่อหลักที่ใช้ในการศึกษาทดลองและวิเคราะห์ และมีข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้งานที่  $D/T \leq 100$  และ  $d/D \leq 0.5$

WRC 297 [9] ซึ่งอยู่บนพื้นฐานจากการศึกษาของ Steele และ Steel [6] ได้จัดเตรียมกราฟรูปที่ 59 [9] และ 60 [9] สำหรับการหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกที่อยู่ภายใต้ภาระแรงตามแนวตั้งฉากกับท่อหลัก, โมเมนต์ดัดในแนวตามความยาวและโมเมนต์ดัดในแนวตามเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบวงของท่อหลัก แต่ก็ไม่ได้ระบุสภาพจุดปลายที่ปลายทั้งสองข้างของท่อหลักที่ใช้ และจำกัดการใช้งานไว้ที่  $d/D \leq 0.5$  ซึ่ง WRC 297 นี้ได้ถูกใช้ในงานการออกแบบของระบบท่ออุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง สำหรับการหาค่าความเค้นที่สามารถยอมให้เกิดขึ้นได้ที่บริเวณรอยเชื่อมของหัวฉีดที่ต่อเชื่อมกับถังความดันทรงกระบอกผนังบาง รวมทั้งยังได้ถูกใช้คำนวณหาความยืดหยุ่นที่บริเวณรอยเชื่อมของหัวฉีดที่เชื่อมต่อกับถังความดันทรงกระบอกผนังบางเพื่อลดภาระของแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับรอยเชื่อมต่อกันด้วยเช่นกัน

Fujimoto และ Soh [12] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการยืดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบ ด้วยการทดสอบความเค้นแบบ Static และการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 8-node isoparametric shell element ด้วยอัตราส่วน  $D/T \geq 100$  ภายใต้สภาพเงื่อนไขขอบเขตที่จุดปลายทั้งสองข้างของท่อหลักถูกกำหนดให้เป็นจุดรองรับแบบยึดแน่นและที่จุดปลายของท่อแยกถูกปล่อยแบบอิสระ โดยให้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบกระทำลงบนจุดปลายของท่อแยก ซึ่งความยาวของท่อหลักและท่อแยกมีค่าคงที่เป็น 2.89 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของท่อหลัก ( $D_o$ ) สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตสำหรับการหาค่าตัวประกอบยืดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงได้ถูกนำเสนอไว้จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตต่อค่าตัวดรรชนีความเค้นและค่าตัวประกอบยืดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จำนวน 37 แบบจำลอง ซึ่งสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตที่ได้จำกัดการใช้งานไว้ที่  $50 \leq D/T \leq 300$ ,  $0.5 \leq d/D \leq 0.95$  และ  $0.25 \leq t/T \leq 0.95$

Wais, Rodabaugh และ Carter [13] ได้ศึกษาและสรุปผลลัพธ์ค่าตัวประกอบความเค้นของความเค้นและค่าตัวประกอบยืดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบ, โมเมนต์ดัดนอกระนาบและโมเมนต์บิด (Torsion) ด้วยการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ 4-node quadrilateral shell elements จำนวน 36 แบบจำลอง โดยการใช้ 2 สภาพเงื่อนไขขอบเขตในการศึกษาคือ (1) ภายใต้สภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ปลายข้างหนึ่งของท่อหลักเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น ส่วนที่จุดปลายข้างที่เหลือถูกปล่อยแบบอิสระและที่จุดปลายของท่อแยกถูกปล่อยแบบอิสระ และ (2) ภายใต้สภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ปลายทั้งสองข้างของท่อหลักถูกกำหนดให้เป็นจุดรองรับแบบยึดแน่นโดยที่จุดปลายของท่อแยกถูกปล่อยแบบอิสระ โดยให้โมเมนต์ดัดในระนาบ, โมเมนต์ดัดนอกระนาบและโมเมนต์บิดกระทำลงบนจุดปลายของท่อแยกในทั้งสองสภาพเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งความยาวรวมของท่อหลักยาว 39 นิ้ว หรือประมาณ 4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของท่อหลัก ( $D_o$ ) ส่วนความยาวของท่อแยกยาว 19.5 นิ้ว หรือประมาณ 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางนอกของท่อหลัก ( $D_o$ ) ซึ่งผลลัพธ์ของค่าตัวประกอบยืดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงได้มาโดยการหาค่าเฉลี่ยของค่าตัวประกอบยืดหยุ่นจากทั้งสองสภาพเงื่อนไขขอบเขต สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต (Correlation equations) สำหรับการหาค่าตัวประกอบยืดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงได้ถูกจัดเตรียมไว้จากการศึกษาวิเคราะห์ โดยที่สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต สามารถใช้งานได้ในช่วง  $7.5 \leq D/T \leq 99$ ,  $0.125 \leq d/D \leq 1.0$  และ  $7.50 \leq d/t \leq 198$

Williams และ Clark [26] ได้ทำการศึกษาการหาค่าตัวประกอบยืดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบ ซึ่งได้ดำเนินการต่อจากการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Williams ด้วยการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์และใช้แบบจำลองแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามมิติซึ่งเหมือนกับงานก่อนหน้านี้ โดยการใช้เอลิเมนต์แบบ 20-node isoparametric solid elements สำหรับแบบจำลองทางรูปทรงเรขาคณิตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และใช้เอลิเมนต์แบบ 8-node isoparametric solid elements สำหรับแบบจำลองทางรูปทรงเรขาคณิตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ตามลำดับ ภายใต้สภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ปลายข้างหนึ่งของท่อหลักเป็นจูดรองรับแบบยึดแน่น ส่วนที่จุดปลายข้างที่เหลือถูกปล่อยแบบอิสระและให้โมเมนต์ตัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบกระทำลงบนทั้งท่อแยกและท่อหลัก โดยการให้ความยาวน้อยที่สุดของท่อหลักเป็น 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของท่อหลัก ( $D_o$ ) และความยาวน้อยที่สุดของท่อแยกเป็น 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของท่อแยก ( $d_o$ ) ตามลำดับ ซึ่งจำกัดช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตที่ใช้ศึกษาไว้ที่  $D_o/16 \leq d_o \leq 7D_o/16$  และ  $5T/16 \leq t \leq 3T/4$  แต่สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตสำหรับการหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงไม่ได้ถูกจัดเตรียมทำไว้จากศึกษา

Xue, Widera และ Sang [1] ได้ทำการสรุปและเปรียบเทียบค่าตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบ จากการศึกษาตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อค่าตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จำนวน 43 แบบจำลอง โดยการขยายการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Widera และ Wei [2] และใช้ตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตที่อยู่ในช่วงขอบเขตเดียวกันคือ  $20 \leq D/T \leq 250$ ,  $0.333 \leq d/D \leq 1$  และ  $d/D \leq t/T \leq 3$  ซึ่งขอบเขตของค่าช่วงตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตเหล่านั้นได้มาจากการแนะนำที่กระทำโดย PVRC Task Group on Large Diameter Shell Intersections [1, 17] ด้วยการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ 4-node shell elements ภายใต้สภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ปลายข้างหนึ่งของท่อหลักเป็นจูดรองรับแบบยึดแน่น ส่วนที่จุดปลายข้างที่เหลือถูกปล่อยแบบอิสระและที่จุดปลายของท่อแยกถูกปล่อยแบบอิสระด้วยเช่นกัน โดยให้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบกระทำลงบนจุดปลายของท่อแยก โดยที่ Xue, Widera และ Sang [1] ได้ดำเนินการศึกษาผลกระทบความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่มีผลต่อตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบ เพื่อกำจัดผลกระทบอันเนื่องมาจากความยาวท่อเหล่านั้นก่อนที่จะดำเนินการศึกษาวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบยึดหยุ่น สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตสำหรับการหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงได้ถูกจัดเตรียมไว้จากการศึกษาวิเคราะห์ซึ่งสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต สามารถใช้งานได้ในช่วง  $20 \leq D/T \leq 250$ ,  $0.333 \leq d/D \leq 1$  และ  $d/D \leq t/T \leq 3$

Widera และ Xue [15] ได้เสนอข้อแนะนำสำหรับการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติสำหรับการเชื่อมต่อกันของรูปทรงกระบอกผนังบางกับรูปทรงกระบอกผนังบาง รวมทั้งยุทธวิธีในการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ ด้วยการศึกษาอิทธิพลของเอลิเมนต์แบบ Shells และแบบ Solids ขอบเขตของการยุบตัว (Decay distance region) ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวง (Circumferential direction) และขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) กับรอยเชื่อมต่อของรูปทรงกระบอกผนังบางที่อยู่ในระยะขอบเขตของการยุบตัว จำนวนของเอลิเมนต์ตลอดความหนาของผนังรูปทรงกระบอกผนังบางและอัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต่อของทั้งท่อหลักและท่อแยกต่อการเข้าสู่ของความเค้นในการเชื่อมต่อกันของรูปทรงกระบอกผนังบางกับรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกระบอกผนังบางที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบ โมเมนต์ดัดนอกระนาบและภาระแรงดัน ด้วยการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีขนาดมิติ ภาระและสภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ปลายของท่อหลักและท่อแยกตามนิยามปัญหาของ ORNL-1 [27] โดยดำเนินการเปรียบเทียบการลู่เข้าของผลลัพธ์สำหรับความเค้นที่ได้จากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าความเค้นที่ได้จากข้อมูลผลการทดลองของ ORNL-1 [27] ซึ่งผู้วิจัยได้สรุปว่า เอลิเมนต์แบบ 20-nodes isoparametric brick มีความเหมาะสมสำหรับการหาค่าความเค้น, ระยะขอบเขตของการยุบตัว (Decay distance region) บนท่อหลักและท่อแยกมีค่าเท่ากับ  $3.0\sqrt{RT}$  และ  $3.0\sqrt{rt}$  ตามลำดับ, ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเท่ากับ 11 องศาที่มีความละเอียดเพียงพอสำหรับโมเมนต์ดัดในระนาบแต่กว่า  $7.5^\circ$  หรือน้อยกว่าก็ได้ถูกแนะนำ, ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) กับรอยเชื่อมต่อบริเวณรอยเชื่อมต่อควรจะน้อยกว่า  $0.02\sqrt{RT}$  และขนาดของเอลิเมนต์สามารถค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าประมาณ  $0.5\sqrt{RT}$  ภายในระยะขอบเขตของการยุบตัว  $3.0\sqrt{RT}$  ขนาดความหนาของเอลิเมนต์ 3 เอลิเมนต์ก็จะให้ค่าการทำนายความเค้นที่แม่นยำกว่าแต่ จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาของทั้งท่อหลักและท่อแยกก็เพียงพอ, อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต้อมีค่าน้อยกว่า 5 และขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมต่ที่อยู่ภายนอกของขอบเขตของการยุบตัวมีค่ามากกว่า  $\sqrt{RT}$  และ  $\sqrt{rt}$  ตามลำดับ

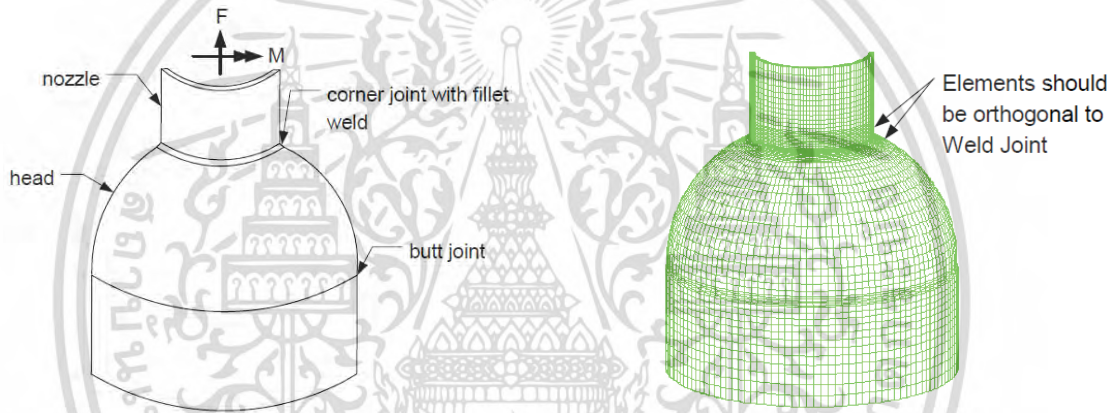
จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ดำเนินการมาก่อนหน้านี้พบว่ายังไม่มีผลการดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นที่ท่อแยกที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบและท่อหลักมีสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา รวมทั้งยังไม่มีผลการดำเนินการวิจัยการเปรียบเทียบทางด้านความแม่นยำและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลเพื่อหาความเค้นที่บริเวณจุดเชื่อมต่อกันของทรงกระบอกผนังบางที่ทรงกระบอกผนังบางแยกอยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบและทรงกระบอกผนังบางหลักมีสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา ด้วยเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Solids to solids submodeling, Shells to solids submodeling และ Shells to solids coupling

ดังนั้นในการศึกษานี้ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของพัฒนาการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark study) โดยใช้เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยคุณสมบัติการยึดหยุ่นเชิงเส้น เพื่อนำเสนอการเปรียบเทียบค่าความเค้นและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของแต่ละวิธีการและการหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นของต่อกันของทรงกระบอกผนังบางอันเนื่องมาจากภาระโมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบที่กระทำลงบนท่อแยกและท่อหลักมีสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา รวมทั้งการแนะนำความเหมาะสมในการเลือกวิธีการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองแต่ละวิธีไปใช้งาน สุดท้ายนำเสนอสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตสำหรับตัวประกอบยึดหยุ่นที่ได้มาจากวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

# บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

## 3.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับความเค้นแบบ 3 มิติ ทั่วไป

สำหรับปัญหาทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับความสลับซับซ้อนของ รูปทรงทางเรขาคณิต ภาวะ และคุณสมบัติของวัสดุ โดยทั่วไปเป็นไปได้ที่จะแก้ปัญหาโดยใช้การสังเคราะห์ด้วยคณิตศาสตร์ เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปอยู่แล้วว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมและคณิตศาสตร์กายภาพ โดยการแบ่งทั้งหมดของปัญหาที่เราสนใจไปเป็นระบบของปัญหาที่เล็กกว่าที่สมมูลกัน โดยการแก้ปัญหาแต่ละเอลิเมนต์ย่อย ๆ และหลังจากนั้นนำผลลัพธ์แต่ละเอลิเมนต์ย่อย ๆ มารวมกันเพื่อให้ได้มาของผลเฉลยของปัญหาทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) และ (ข)



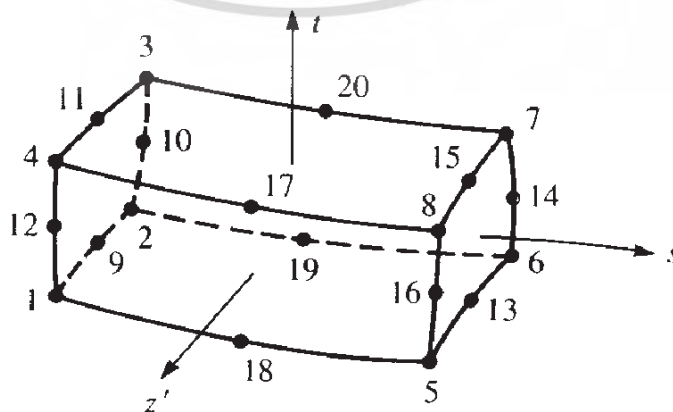
(ก) ปัญหาทั้งหมดที่สนใจ

(ข) ระบบของปัญหาที่เล็กกว่าที่สมมูลกัน

รูปที่ 3.1 การแบ่งรูปร่างลักษณะของโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ [28]

### 3.1.1 เอลิเมนต์ทรงตันแบบ 3 มิติ ชนิด 20 node isoparametric brick

การวิจัยนี้ได้พิจารณาใช้เอลิเมนต์ทรงตันแบบ 3 มิติ ชนิด 20 node isoparametric brick



รูปที่ 3.2 เอลิเมนต์ทรงตันแบบ 3 มิติ ชนิด 20 node isoparametric brick [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.2 โดยที่เอลิเมนต์ชนิดนี้เป็นประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นของวัตถุที่มีรูปร่างเป็นแบบ 3 มิติ ซึ่งต้องการความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูงกว่าที่เป็นไปได้ผ่านการวิเคราะห์ที่ใช้เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ

### 3.1.2 สูตรของเอลิเมนต์ทรงตันแบบ 3 มิติ ชนิด 20 node isoparametric brick

สำหรับเอลิเมนต์แบบ Quadratic Hexahedral ได้แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีทั้งหมด 20 โหนด ด้วยการรวมของทั้งหมด 12 โหนดที่อยู่ตรงกลาง

การอธิบายการรูปแบบทำงานของรูปทรงทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์สำหรับในแกน  $x$  ที่อยู่ในเทอมของ  $a_i$ 's คือ

$$x = a_1 + a_2s + a_3t + a_4z' + a_5st + a_6tz' + a_7z's + a_8s^2 + a_9t^2 + a_{10}z'^2 + a_{11}s^2t + a_{12}st^2 + a_{13}t^2z' + a_{14}tz'^2 + a_{15}z'^2s + a_{16}z's^2 + a_{17}stz' + a_{18}s^2tz' + a_{19}st^2z' + a_{20}stz'^2 \quad (3.1)$$

ซึ่งสมการมีความเหมือนกันในแกน  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ

การกระจัดในทิศทาง  $x$  ที่เป็นฟังก์ชันของ  $u$  ได้ถูกอธิบายโดยพหุนามที่เหมือนกันที่ใช้สำหรับรูปทรงทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์  $x$  ในสมการที่ 1 และสมการที่เหมือนกันได้ถูกใช้สำหรับฟังก์ชันการกระจัดของ  $y$  และ  $w$  ตามลำดับ เพื่อที่จะให้มีความเข้ากันได้ที่เหมาะสมของการต่อกันของเอลิเมนต์ สามเทอมของ  $s^3$ ,  $t^3$  และ  $z'^3$  ไม่ได้ถูกรวมเข้าไปด้วยแต่ใช้เทอมของ  $s^2tz'$ ,  $st^2z'$  และ  $stz'^2$  แทน

## 3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย่อยชนิด Submodeling

Submodeling เป็นเทคนิคของการศึกษาส่วนที่สนใจเป็นพิเศษเฉพาะที่ของแบบจำลองด้วยการตีโครงข่ายจุดต่อให้ละเอียดยิ่งขึ้น บนพื้นฐานของการประมาณค่าของผลเฉลยจากแบบจำลองเริ่มต้น ซึ่งเป็นแบบจำลองรวม (Global model) ลงบนส่วนที่เหมาะสมของสภาพเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองย่อย (Submodel) วิธีการนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อมีความจำเป็นที่จะให้ได้มาซึ่งความแม่นยำ อิทธิพลของรายละเอียดของผลเฉลยและการสร้างแบบจำลองในบริเวณส่วนย่อยสามารถที่จะไม่สนใจได้บนผลเฉลยทั้งหมด การตอบสนองที่ขอบเขตของบริเวณย่อย ๆ เฉพาะที่ได้ถูกกำหนดด้วยกันโดยผลเฉลยสำหรับแบบจำลองรวมและตัวของแบบจำลองย่อย ด้วยภาระใด ๆ ที่กระทำไปยังบริเวณย่อย ๆ เฉพาะที่เพื่อหาผลเฉลยของแบบจำลองย่อย เทคนิคได้ตั้งอยู่บนแบบจำลองรวมที่กำหนดขอบเขตของแบบจำลองย่อยนี้ตอบสนองด้วยความแม่นยำที่เพียงพอ

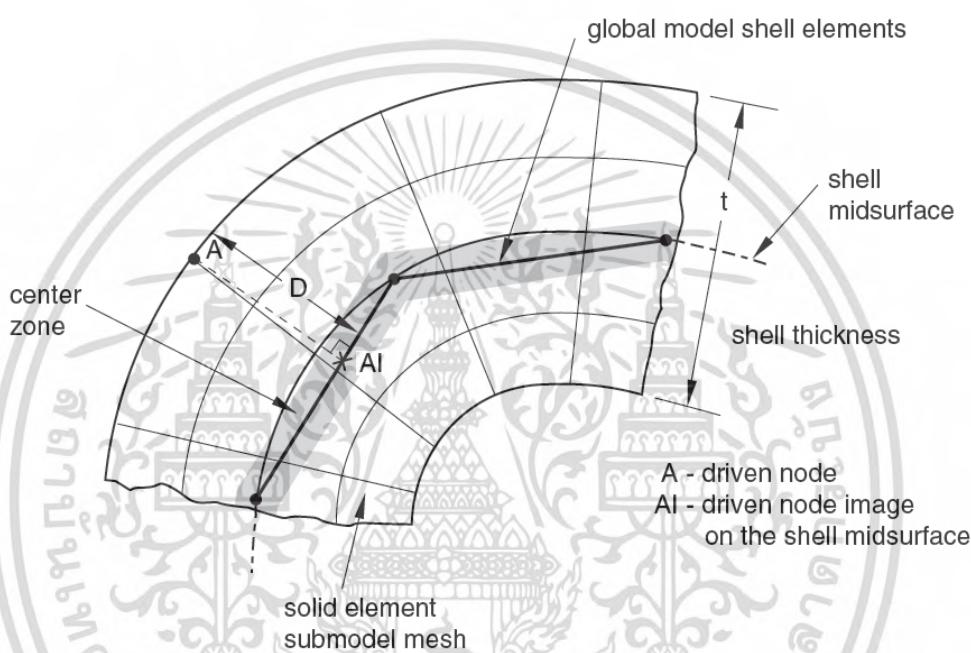
แบบจำลองย่อยได้ถูกวิเคราะห์ซึ่งเป็นการแยกวิเคราะห์ สิ่งที่เชื่อมต่อกันระหว่างแบบจำลองรวมและแบบจำลองย่อยคือการส่งถ่ายค่าของตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent) ไปยังตัวแปรขับเคลื่อนที่เกี่ยวข้องของแบบจำลองย่อยเพียงเท่านั้น

รูปแบบของเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อยมี 2 รูปแบบที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้คือเทคนิค Shell to solid submodeling (Node-based submodeling) ซึ่งเป็นการถ่ายโอนผลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลี่ยของตัวแปรที่ตำแหน่งของโหนดอยู่ โดยส่วนมากจะเป็นการถ่ายโอนการกระจัดจากโหนดของแบบจำลองรวมไปยังโหนดของแบบจำลองย่อย และอีกรูปแบบหนึ่งก็คือ เทคนิค Solid to solid submodeling (Surface-based submodeling) ซึ่งเป็นการส่งถ่ายผลลัพธ์ของความเค้นที่จุด ๆ หนึ่งจากแบบจำลองรวมไปยังจุดรวมของภาชนะในแบบจำลองย่อย

### 3.2.1 เทคนิค Shell to solid submodeling

Shell to solid submodeling โดยทั่วไปเป็นเทคนิคที่ถูกใช้ค่อนข้างมาก ด้วยเทคนิคนี้ การตอบสนองของแบบจำลองรวมได้ถูกใช้กำหนดเป็นสภาพเงื่อนไขขอบเขตที่โหนดขับเคลื่อน (Driven nodes) ในแบบจำลองย่อย



รูปที่ 3.3 กลางโหนดใน Shell to solid submodeling [23]

ในกรณี Shell to solid ตัวขับเคลื่อนของ Degree of freedom (Driven degree of freedom) ได้ถูกเลือกใช้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างโหนดขับเคลื่อนกับผิวกลาง (Midsurface) ของผนังบาง (Shell) ถ้าโหนดตั้งอยู่ภายในกลางโหนด ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3 องค์ประกอบของการกระจัดทั้งหมดได้ถูกขับเคลื่อน

Degree of freedom ทั้งหมดของการกระจัดได้ถูกขับเคลื่อนเมื่อโหนดขับเคลื่อนตั้งอยู่ภายในกลางโหนด สำหรับการวิเคราะห์ในทางรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นการกำหนดการกระจัดเหล่านั้นได้มาจากการกระจัดและการหมุนของโหนดจินตภาพ

### 3.2.2 เทคนิค Solid to solid submodeling

เทคนิคการสร้างแบบจำลองย่อยด้วยพื้นฐานของพื้นผิวการตอบสนองของแบบจำลองรวม ได้ถูกใช้เพื่อที่จะควบคุมฟลักซ์บนพื้นผิวที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนในแบบจำลองย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย่อยชนิด Shell to solid coupling

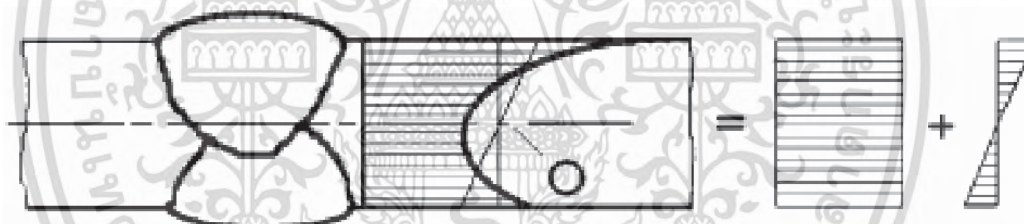
Shell to solid coupling ต้องการข้อสมมุติของการเปลี่ยนแปลงความเค้นผ่านความหนาของผนังบางที่บริเวณที่เชื่อมต่อกัน

### 3.4 การประมาณความเค้นแบบเชิงเส้น (Linearization of stress)

WRC Bulletin 429 [25] และ The ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Div.2 ภาคผนวก 5.A [28] ได้จัดเตรียมข้อแนะนำและวิธีการสำหรับหาค่าความเค้นเชิงเส้นในทรงกระบอกผนังบางที่ซึ่งผลลัพธ์ค่าความเค้นได้มาจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแนะนำวิธีการคำนวณหาความเค้นเชิงเส้นบนพื้นฐานของการรวมความเค้น (Stress integration) ซึ่งคือ

$$\text{ความเค้นเชิงเส้น (Stress linearization)} = \text{Membrin stress} + \text{Bending stress} \quad (3.2)$$

และแผนภาพได้แสดงในรูปที่ 3.4



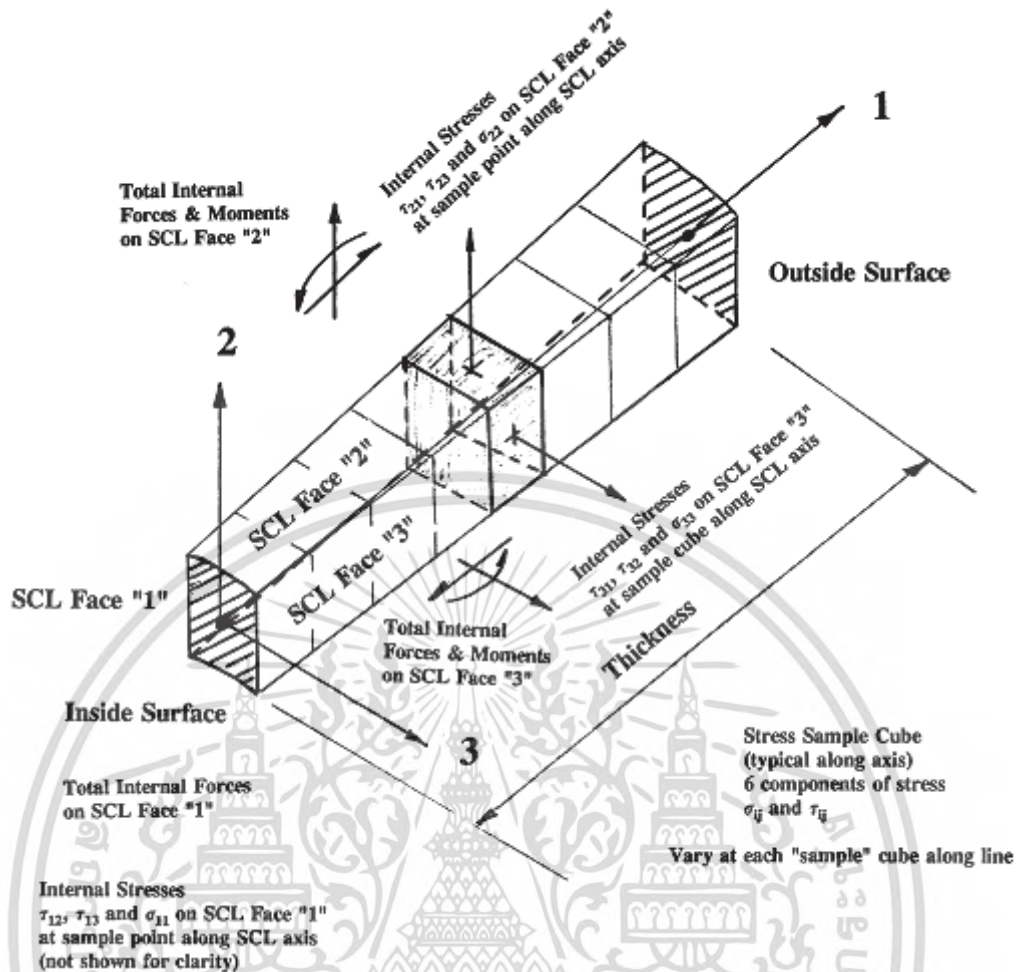
รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของความเค้นเชิงเส้น [30]

การใช้วิธีการประมาณความเค้นแบบเชิงเส้นก็เพื่อที่จะกำจัดองค์ประกอบความเค้นสูงสุด (Peak stress) และความไม่เชิงเส้นขององค์ประกอบความเค้นออกไปจากผลลัพธ์ของความเค้น

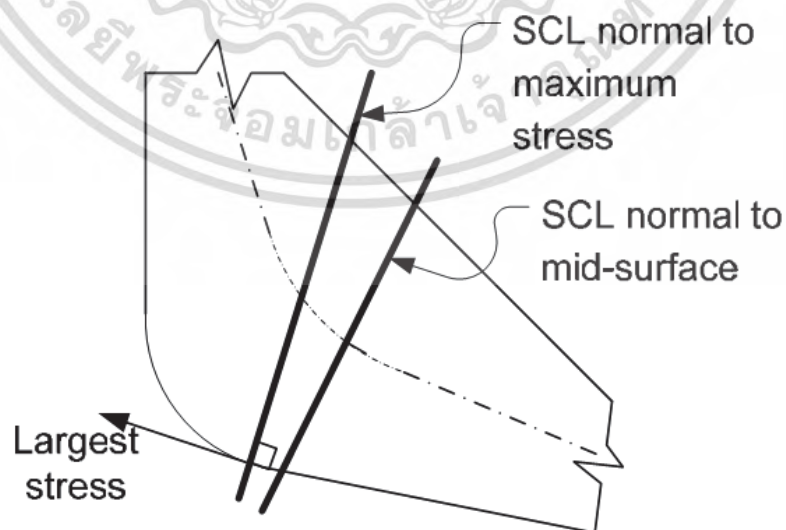
#### 3.4.1 เส้นระดับความเค้น (Stress classification lines)

การใช้เส้นระดับความเค้นต่อจากนี้จะเรียกว่า SCL สำหรับประมาณค่าของ Membrin stress และความเค้นดัดเป็นสิ่งที่เหมาะสมสำหรับรูปทรงทางเรขาคณิตทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปร่างของผนังบาง ชนิดของ SCL ได้แสดงในรูปที่ 3.5 พื้นผิวบน SCL มีขนาดเล็กมาก  $\sigma_{ij}$  จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกวาด (Mapped) ลงบนจุดตัวอย่าง (Sample point) ตามแนวเส้น SCL ซึ่งนั่นคือความเค้นรวมที่ได้ถูกใช้ในกระบวนการคำนวณความเค้นเชิงเส้นต่อไปเพื่อความแม่นยำในการหาค่า Membrin stress และความเค้นดัดนั้น เส้น SCL ควรจะมีแนวเส้นที่ตั้งฉากไปยังผิวด้านนอกและผิวด้านในตามที่แสดงในรูปที่ 3.6 แต่บางทีในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยาก SCL มีแนวเส้นที่ตั้งฉากไปยังผิวด้านตรงกลาง (Midsurface)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เส้นระดับความเค้น [25]



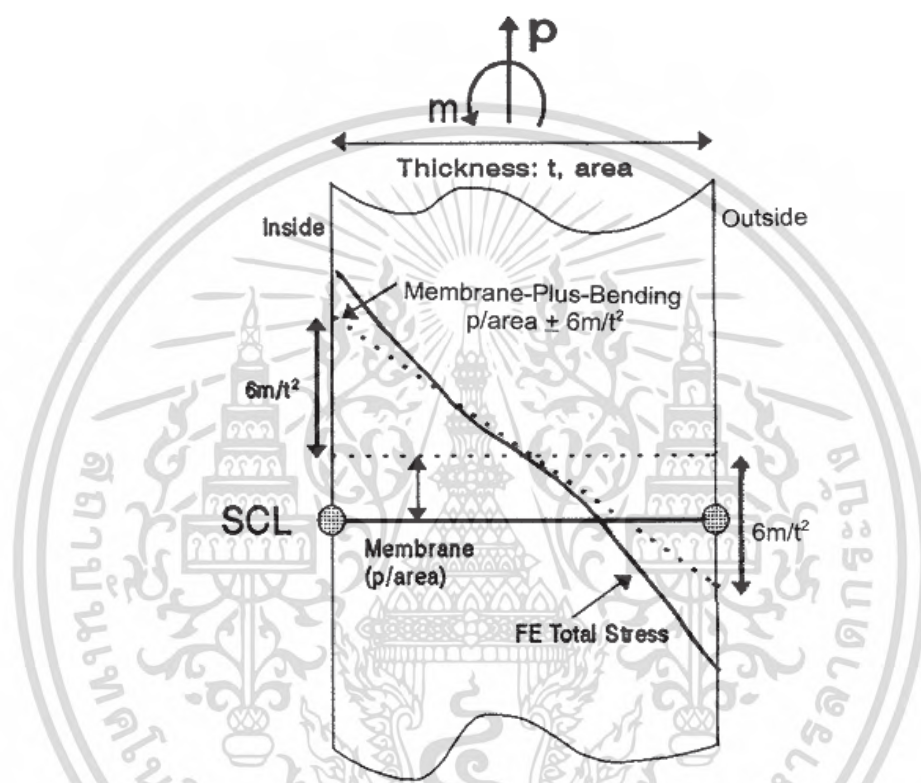
รูปที่ 3.6 แนวเส้นระดับความเค้นที่ลากผ่านผนังความหนา [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การหาความเค้นเชิงเส้นโดยวิธีรวมความเค้น

ผลของความเค้นที่ได้มาจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการใช้ประโยชน์ของเอลิเมนต์ต่อเนื่องแบบ 3 มิติ สามารถที่จะดำเนินการหาความเค้นเชิงเส้นโดยการใช้วิธีการรวมความเค้น โดยที่องค์ประกอบความเค้นได้ถูกรวมไปตามเส้นระดับความเค้นผ่านผนังความหนาท่อเพื่อที่จะหาองค์ประกอบ Membraine stress และความเค้นดัด

วิธีการเพื่อที่จะได้มาของการกระจายตัวสำหรับองค์ประกอบความเค้น Membraine stress, ความเค้นดัดและความเค้นสูงสุดได้แสดงด้านล่างนี้พร้อมกับแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 องค์ประกอบของความเค้น [25]

Membrane stress เป็นส่วนคงที่ของความเค้นปกติ (Normal stress) ซึ่งโมเมนต์ดัดดังกล่าวกระทำลงบนระนาบ โดยที่องค์ประกอบของค่า Membrane stress เป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละองค์ประกอบความเค้นที่อยู่ตามแนวเส้นระดับความเค้น คำนวณได้โดย

$$\sigma_{ij,m} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_{ij} dx \quad (3.3)$$

โดยที่  $\sigma_{ij,m}$  คือความเค้น Membrane stress,  $\sigma_{ij}$  คือความเค้นที่อยู่ตามแนวเส้นระดับความเค้น,  $t$  คือความหนาของผนังบางและ  $x$  เป็นตำแหน่งที่อยู่ตามแนวเส้นระดับความเค้น ตามลำดับ

ความเค้นดัดเป็นส่วนแปรผันของความเค้นปกติซึ่งมีค่าเท่ากับความเค้นสมมูลเชิงเส้น เมื่อไม่มี ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้น ความเค้นดัดเชิงเส้นซึ่งมีการแปรผันที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นของแต่ละ องค์ประกอบของความเค้นที่อยู่ตามแนวเส้นระดับความเค้น ซึ่งคำนวณได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{ij,b} = \frac{6}{t^2} \int_0^t \sigma_{ij} \left( \frac{t}{2} - x \right) dx \quad (3.4)$$

โดยที่  $\sigma_{ij,b}$  เป็นความเค้นดัดเชิงเส้น ซึ่งต่อจากนี้สามารถที่จะหา Membrain stress บวกความเค้นดัด (Membrain plus bending stress) ได้จากการรวมค่าที่ได้จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

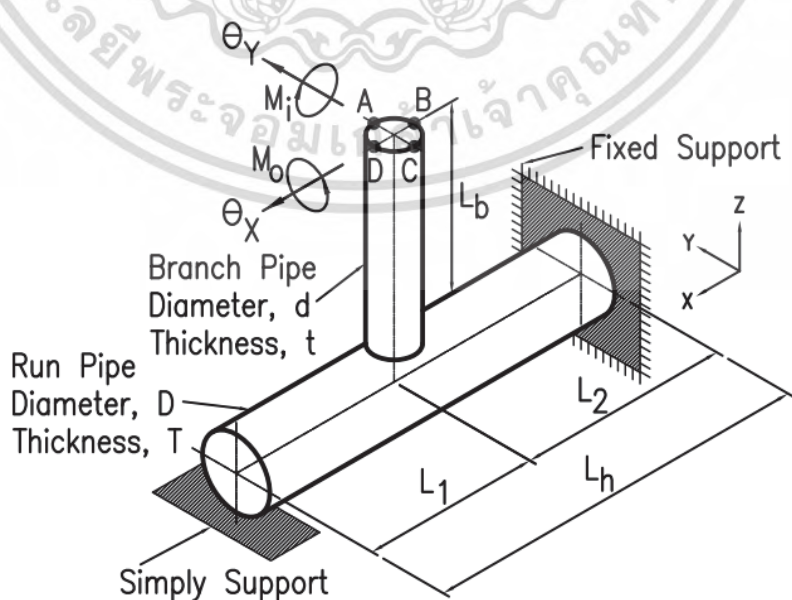
### 3.5 ตัวประกอบยืดหยุ่น (Flexibility factor)

มาตรฐานระบบท่อ ASME B31.3 [7] ได้จัดเตรียมสมการเพื่อคำนวณความเค้น (Displacement stress range) เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่กระทำไปยังองค์ประกอบท่อ (Piping component) ซึ่งค่าที่ถูกคำนวณได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นอนุญาต (Allowable stress) ที่มาตรฐานระบบท่อ ASME B31.3 [7] กำหนดไว้ ถ้าค่าความเค้นที่คำนวณได้ไม่เกินกว่าค่าความเค้นอนุญาต (Allowable stress) ระบบท่อและองค์ประกอบท่อนั้น ๆ ถือได้ว่ามีคุณสมบัติเป็นไปตามที่มาตรฐานระบบท่อกำหนดสำหรับ Displacement stress range

ขนาดของโมเมนต์ดัดที่ใช้ในสมการของมาตรฐานระบบท่อสำหรับคำนวณความเค้นได้มาจากการวิเคราะห์ระบบท่อด้วยวิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural analysis method) บนพื้นฐานของการใช้ Beam-element model ซึ่งในขั้นตอนของการวิเคราะห์จะใช้ตัวประกอบความแข็งเกร็ง (Stiffness factor) ในการวิเคราะห์มากกว่าการใช้ตัวประกอบยืดหยุ่นแบบตรง ๆ อย่างไรก็ตามการแปลงจากตัวประกอบยืดหยุ่นให้เป็นตัวประกอบความแข็งเกร็งนั้นค่อนข้างสะดวก

ภายใต้สภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ปลายข้างหนึ่งของท่อหลักเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed support) ส่วนที่จุดปลายข้างที่เหลือถูกปล่อยแบบธรรมดา (Simply support) และที่จุดปลายของท่อแยกถูกปล่อยแบบอิสระ (Free) โดยให้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบกระทำลงบนจุดปลายของท่อแยกได้แสดงในรูปที่ 3.8

สำหรับความแม่นยำในการวิเคราะห์ระบบท่อ ตัวประกอบยืดหยุ่นของ



รูปที่ 3.8 แผนภาพของการต่อท่อแยกและสภาพเงื่อนไขขอบเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอลิเมนต์ทั้งหมดในระบบท่อเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทราบค่า การวิเคราะห์ก็จะให้ความแม่นยำของโมเมนต์ในระบบท่อสำหรับการวิเคราะห์ความเครียด ส่วนของท่อหลักสำหรับการต่อท่อแยกที่ได้แสดงในรูปที่ 3.8 มุมของการหมุน  $\theta_{Run,i}$  ที่เกิดจากโมเมนต์ดัดในระนาบ ( $M_i$ ) ของจุดปลายท่อหลักที่รองรับแบบธรรมดาเทียบไปยังจุดปลายท่อหลักที่รองรับแบบยึดแน่นคือ

$$\theta_{Run,i} = \frac{M_i}{4EI_h L_h} \left[ (L_h - L_1)(3L_1 - L_h) + \frac{3(L_h^2 - L_1^2)}{L_h^2} \right] \quad (3.5)$$

โดยที่  $M_i$  คือโมเมนต์ดัดในระนาบ,  $E$  คือยังโมดูลัสความยืดหยุ่น,  $I_h$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดท่อหลัก,  $L_h$  คือความยาวรวมของท่อหลักและ  $L_1$  คือความยาวรวมของท่อหลักจากจุดต่อแยกถึงจุดปลายท่อที่รองรับแบบธรรมดา ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกันส่วนของท่อหลักสำหรับการต่อท่อแยก มุมของการหมุน  $\theta_{Run,o}$  ที่เกิดจากโมเมนต์ดัดนอกระนาบ ( $M_o$ ) ของจุดปลายท่อหลักที่รองรับแบบธรรมดาเทียบไปยังจุดปลายท่อหลักที่รองรับแบบยึดแน่นคือ

$$\theta_{Run,o} = 1.3M_o L_2 / EI_h \quad (3.6)$$

โดยที่  $M_o$  คือโมเมนต์ดัดนอกระนาบและ  $L_2$  คือความยาวรวมของท่อหลักจากจุดปลายท่อหลักที่รองรับแบบยึดแน่นถึงจุดต่อแยก ตามลำดับ

ในส่วนของการต่อท่อแยกสำหรับการต่อท่อแยก มุมของการหมุนทั้ง  $\theta_{branch,i}$  และ  $\theta_{branch,o}$  ที่เกิดจากโมเมนต์ดัดในระนาบ ( $M_i$ ) และโมเมนต์ดัดนอกระนาบ ( $M_o$ ) ของจุดปลายท่อแยกเทียบไปยังเส้นปกติมีค่าเท่ากันคือ

$$\theta_{Branch,i} = M_i L_b / EI_b \quad (3.7)$$

และ

$$\theta_{Branch,o} = M_o L_b / EI_b \quad (3.8)$$

โดยที่  $I_h$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดท่อแยก

จากนิยามพื้นฐานและวิธีการที่ใช้สำหรับการพัฒนาตัวประกอบยึดหยุ่นด้วยการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎียืดหยุ่น (Theory of elasticity) ซึ่งได้จัดเตรียมไว้ใน WRC Bulletin 463 [10] ตัวประกอบยึดหยุ่น ( $K$ ) ของท่อต่อแยกได้นิยามให้เป็นการหมุนของสปริงเสมือน [3] ได้แสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งมีค่าเป็น

$$K = \theta EI_b / Md_o \quad (3.9)$$

โดยที่  $d_o$  เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อหลัก และ  $M$  เป็นโมเมนต์ดัดในระนาบหรือนอกระนาบที่กระทำลงบนท่อแยกตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประกอบยึดหยุ่นที่เราสนใจนั้น ก็เนื่องมาจากการเกิดการเสียรูปในบริเวณเฉพาะ (Local deformation) บริเวณการเชื่อมต่อกันของท่อแยกและท่อหลักแบบไม่เสริมแรง กล่าวคือมีเอลิเมนต์สั้น ๆ ที่บริเวณการต่อท่อแยกลงบนผิวหน้าของท่อหลักขนาด  $d_o$  ซึ่งมีค่ามุมของการหมุนเนื่องจากโมเมนต์ดัดที่กระทำบนท่อแยกเป็น  $\theta_L = Md_o/EI_b$  โดยที่  $\theta_L$  ค่ามุมของการหมุนเนื่องจาก Local deformation ของเอลิเมนต์สั้น ๆ นอกจากนี้ยังมีการหมุนอันเนื่องมาจากการยุบตัวบนผิวหน้าของท่อหลักในบริเวณขอบเขตของการยุบตัว (Decay distance region) ตัวแปรนี้กำหนดให้เป็นค่าตัวประกอบยึดหยุ่น ( $K$ ) ซึ่งมุมของการหมุนทั้งหมดตรงบริเวณการเชื่อมต่อกันของท่อแยกและท่อหลักจะมีค่าเป็น  $\theta = K\theta_L = KMd_o/EI_b$  โดยค่าความยืดหยุ่นแสดงถึงการหมุนเนื่องมาจาก Local deformation ในบริเวณที่เชื่อมต่อกันของท่อแยกและท่อหลัก

เนื่องจาก  $\theta_{FEA} = \theta_{Beam} + \theta$  และ  $\theta_{Beam} = \theta_{Branch} + \theta_{Run}$  สมการที่ 3.9 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$K = (\theta_{FEA} - \theta_{Branch} - \theta_{Run})EI_b/Md_o \quad (3.10)$$

โดยที่  $\theta_{FEA}$  ได้มาจากผลลัพธ์การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่ง  $\theta_{FEA,i} = \theta_Y$  ซึ่งวัดที่จุด A และ C ส่วน  $\theta_{FEA,o} = \theta_X$  ซึ่งวัดที่จุด B และ D ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 3.8 ในขณะที่  $\theta_{Branch}$  กับ  $\theta_{Run}$  ได้มาจากสมการที่ 3.7 ถึง สมการที่ 3.10 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบคานด้วยวิธีทฤษฎียึดหยุ่น [16] และจากที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ตามสมการด้านล่างนี้

สำหรับโมเมนต์ดัดในระนาบ ( $M_i$ ) :

$$\theta_{FEA(i)} = \theta_Y \quad (3.11)$$

$$\theta_{Branch,i} = M_i L_b / EI_b \quad (3.12)$$

$$\theta_{Run,i} = \frac{M_i}{4EI_h L_h} \left[ (L_h - L_1)(3L_1 - L_h) + \frac{3(L_h^2 - L_1^2)}{L_h^2} \right] \quad (3.13)$$

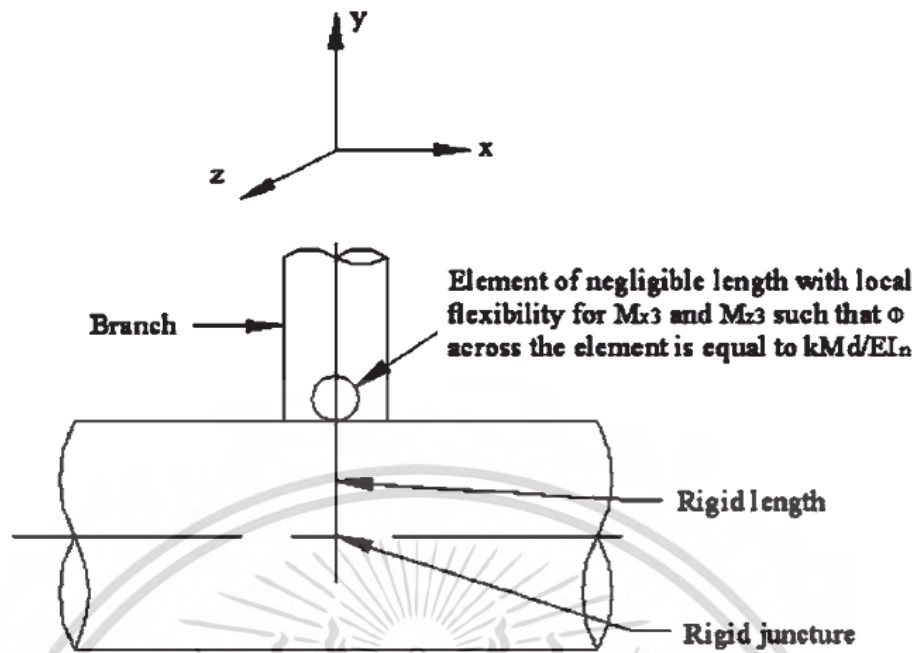
สำหรับโมเมนต์ดัดนอกระนาบ ( $M_o$ ) :

$$\theta_{FEA(o)} = \theta_X \quad (3.14)$$

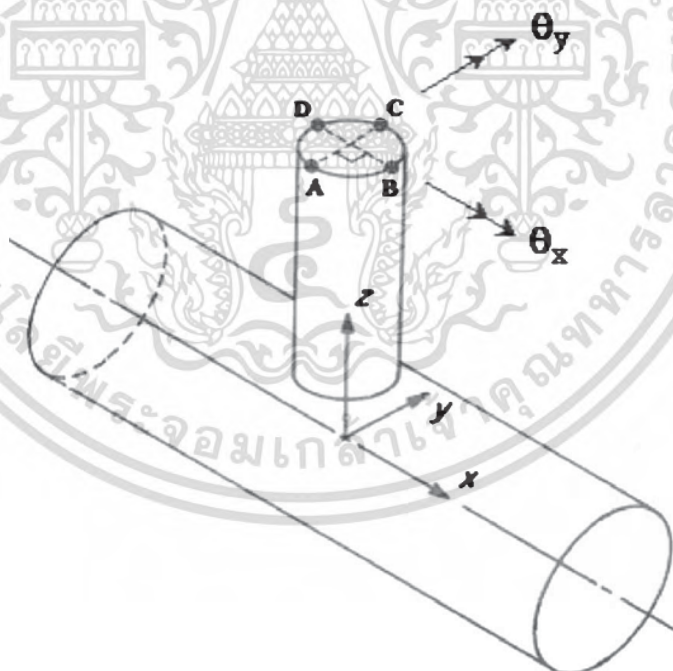
$$\theta_{Branch,o} = M_o L_b / EI_b \quad (3.15)$$

$$\theta_{Run,o} = 1.3M_o L_2 / EI_h \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แนวความคิดของตัวประกอบยืดหยุ่น [10]



รูปที่ 3.10 การหมุนที่จุดปลายของท่อแยก [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ขั้นตอนของการศึกษา

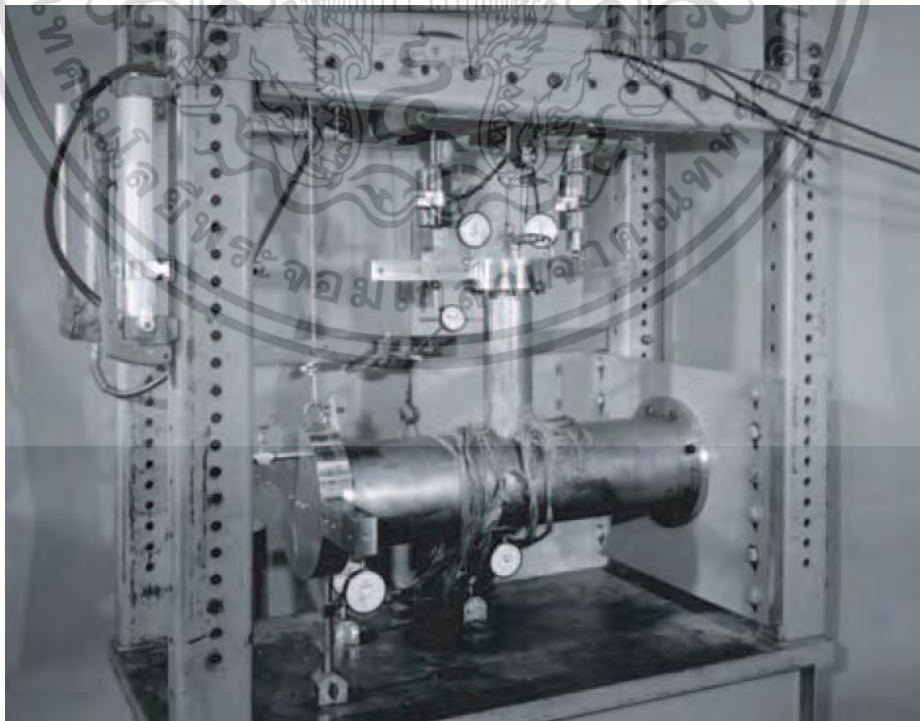
#### 4.1 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element model)

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของความเค้นเชิงเส้นในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง และการเปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย่อยแบบต่าง ๆ รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตกับตัวประกอบยึดหยุ่นที่เกิดขึ้นบนการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรง ภายใต้สภาพเงื่อนไขขอบเขตของจุดปลายและภาระโมเมนต์ดัดตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1

##### 4.1.1 การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง (Benchmark study)

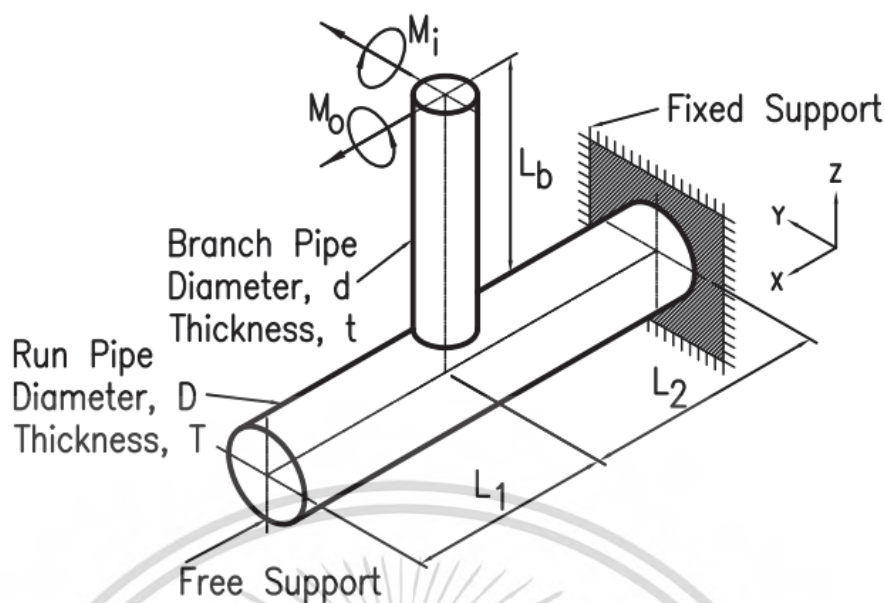
การวิเคราะห์การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองได้ถูกดำเนินการก่อนที่จะศึกษาพฤติกรรมของความเค้นเชิงเส้นและตัวประกอบยึดหยุ่น จุดประสงค์ก็เพื่อจะตรวจสอบความถูกต้องและเหมาะสมของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้สร้างขึ้นกับข้อมูลผลการทดลองแล้วดูแนวโน้มของความเค้นที่ได้จากทั้งทางไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดลองว่าสอดคล้องกันหรือไม่

ในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองของงานวิจัยนี้ เราจะใช้ข้อมูลผลการทดลองจากการทดลองของปัญหาของ ORNL-1 [27] เป็นตัวเทียบมาตรฐาน ซึ่งการทดลองของ ORNL-1 [27] นี้เป็นการทดลองเพื่อหาค่าความเค้นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบ



รูปที่ 4.1 ภาพของจัดวางในการทดลองของปัญหา ORNL-1 [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



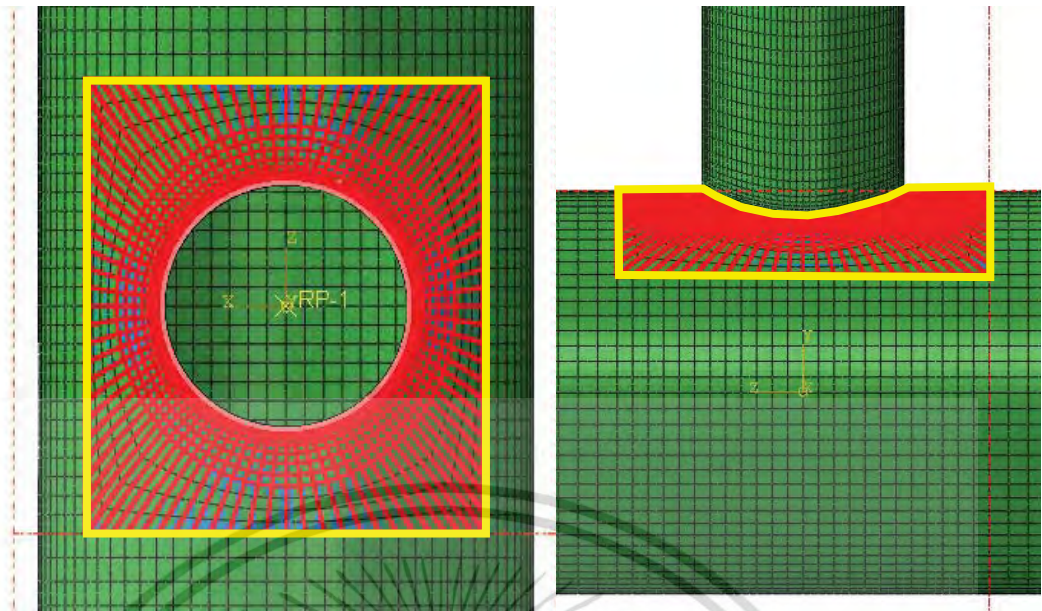
รูปที่ 4.2 แผนภาพของการต่อท่อแยก, สภาพเงื่อนไขขอบเขตและการกระทำของโมเมนต์ตัดจากภายนอกของปัญหา ORNL-1 [27]

และโมเมนต์ตัดนอกระนาบด้วยอัตราส่วนระหว่างท่อแยกและท่อหลัก ( $d/D$ ) ที่ 0.5 โดยกำหนดให้ที่ปลายข้างหนึ่งของท่อหลักเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed support) ส่วนจุดปลายข้างที่เหลือเป็นจุดรองรับแบบอิสระ (Free support) และที่จุดปลายของท่อแยกถูกปล่อยแบบอิสระ (Free) เช่นกัน โดยให้โมเมนต์ตัดในระนาบและโมเมนต์ตัดนอกระนาบกระทำลงบนที่จุดปลายของท่อแยกตามรูปที่ 4.1 โดยที่แผนภาพของการต่อท่อแยกและสภาพเงื่อนไขขอบเขตรวมทั้งการกระทำของโมเมนต์ตัดจากภายนอกของปัญหา ORNL-1 [27] เพื่อใช้ในการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.2

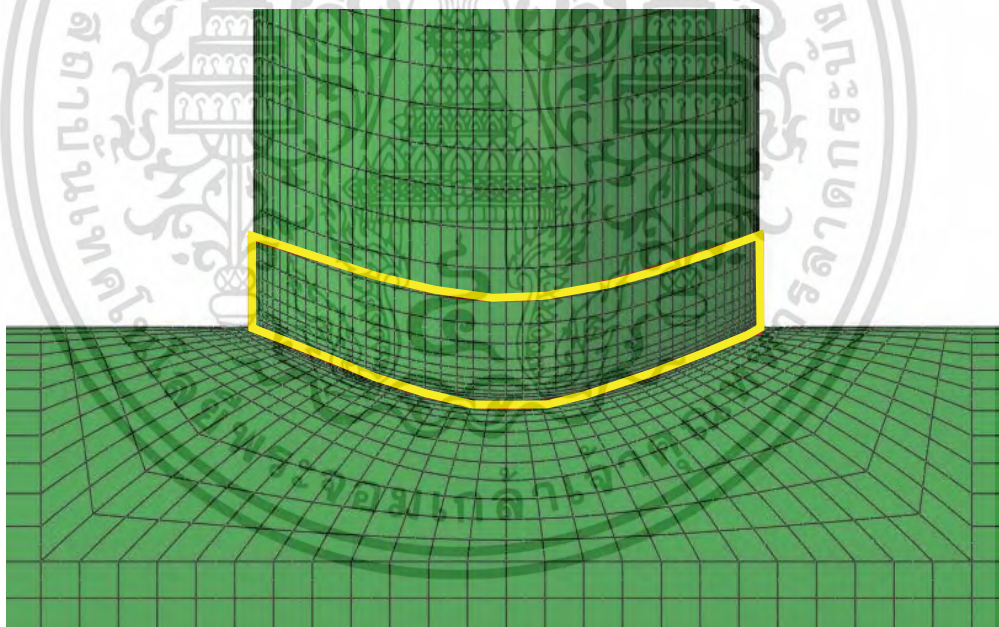
สร้างแบบจำลองตัวแปรทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีการที่ได้แนะนำไว้ใน WRC Bulletin 493 [15] ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick และใช้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ( $E$ ) เป็น  $30 \times 10^6$  ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) และอัตราส่วนพัวซอง ( $\nu$ ) มีค่าเท่ากับ 0.3 ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการเทียบมาตรฐานที่ใช้เหมือนกันกับปัญหาของ ORNL-1 [27] ซึ่งก็คือ  $d/D = 0.5$ ,  $t/T = 0.5$ ,  $D/T = 99$ ,  $L_1 = 14.5$  นิ้ว,  $L_2 = 14.5$  นิ้ว,  $L_b = 19.5$  นิ้ว และ  $D = 9.9$  นิ้ว ตามลำดับ โดยที่ปลายข้างหนึ่งของท่อหลักถูกยึดแน่น (Fixed support) ส่วนที่ปลายข้างที่เหลือรองรับแบบอิสระ (Free support) และที่จุดปลายของท่อแยกปล่อยแบบอิสระ (Free) โดยที่โมเมนต์ตัดจากภายนอกกระทำที่จุดปลายของท่อแยกดังแสดงในรูปที่ 4.2 ขนาดของโมเมนต์ตัดในระนาบเป็น 2400 ปอนด์-นิ้ว และขนาดของโมเมนต์ตัดนอกระนาบมีค่า 600 ปอนด์-นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งที่กระทำลงบนปลายของท่อแยก

วิธีการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามข้อแนะนำสำหรับการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรูปทรงกระบอกเชื่อมต่อกับรูปทรงกระบอก WRC Bulletin 493 [15] เพื่อสร้างแบบจำลองและโครงข่ายของจุดต่อ (Mesh) ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากข้อแนะนำดังกล่าว [15] นั้น กำหนดให้ระยะขอบเขตของการยุบตัว (Decay distance region) บนท่อหลักมีค่าเท่ากับ  $3.0\sqrt{RT}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และท่อแยกมีค่าเท่ากับ  $3.0\sqrt{rt}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



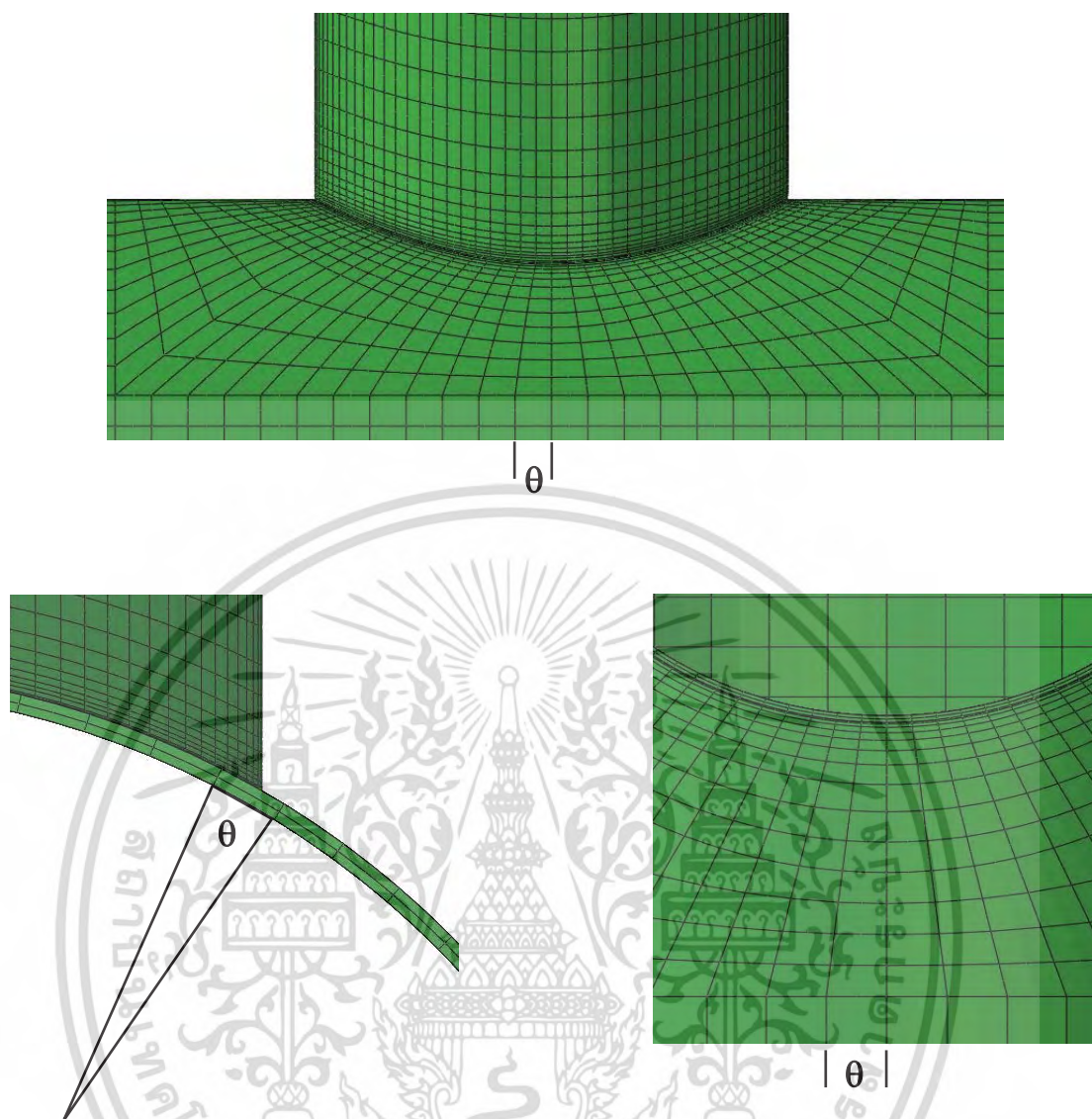
รูปที่ 4.3 ระยะขอบเขตของการยู่ตัวบนท่อหลัก  $3.0\sqrt{RT}$



รูปที่ 4.4 ระยะขอบเขตของการยู่ตัวบนท่อแยก  $3.0\sqrt{rt}$

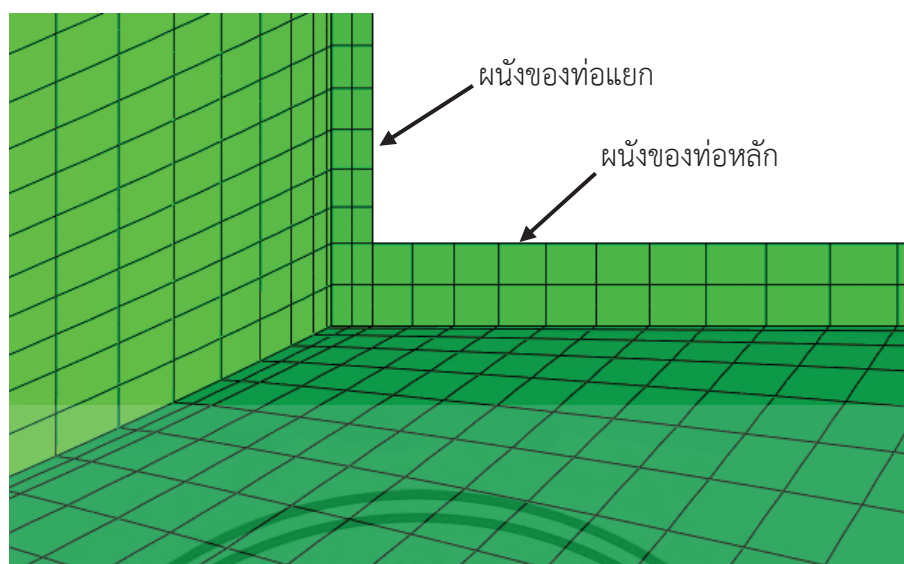
ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวง (Circumferential direction) ของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 3.75 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) กับรอยเชื่อมต่อบริเวณรอยเชื่อมมีค่าเท่ากับ  $0.054\sqrt{RT}$  และ  $0.108\sqrt{rt}$  ตามลำดับ และขนาดของเอลิเมนต์ได้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าประมาณ  $0.5\sqrt{RT}$  ภายในระยะขอบเขตของการยู่ตัว  $3.0\sqrt{RT}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

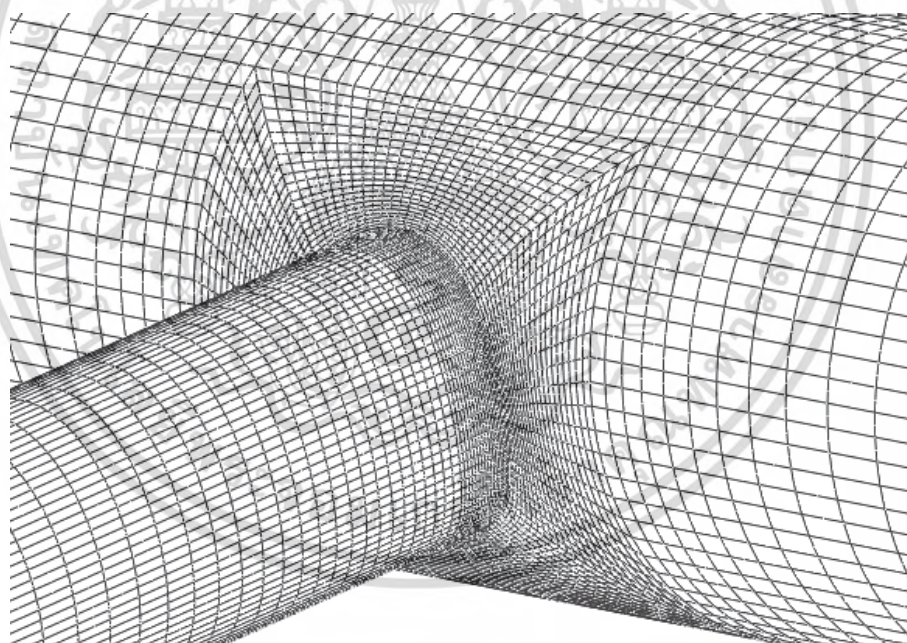


รูปที่ 4.5 ขนาดความกว้างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวง ( $\theta$ )

ขนาดความหนาของเอลิเมนต์ใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต่อมีค่าน้อยกว่า 5 และขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมต่อที่อยู่ภายนอกกระยะขอบเขตของการยุบตัวมีค่ามากกว่า  $\sqrt{RT}$  และ  $\sqrt{rt}$  ตามลำดับ รูปที่ 4.7 ได้แสดงรูปแบบของการสร้างโครงข่ายจุดของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในบริเวณของการเชื่อมต่อของท่อหลักและท่อแยก ส่วนรูปที่ 4.8 ได้แสดงแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นจากปัญหาของ ORNL-1 [27] เพื่อใช้สำหรับการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองและตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง

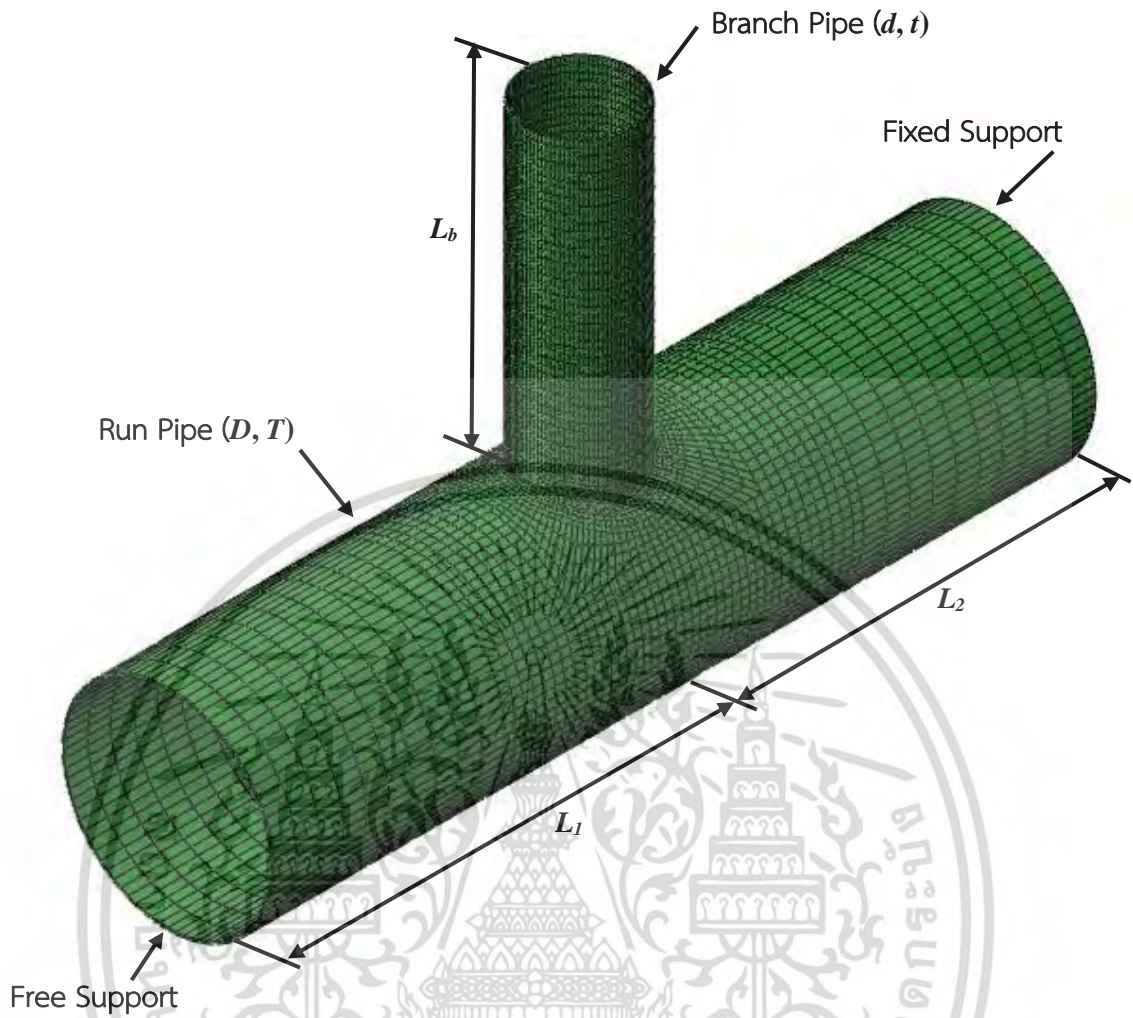


รูปที่ 4.6 จำนวนเอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยก



รูปที่ 4.7 รูปแบบการ Mesh สำหรับการศึกษาระบบเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหา ORNL-1 [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง

ORNL-1 [27] Problem Definition

$D_i$ (in)	$T$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$d_i$ (in)	$t$ (in)	$L_b$ (in)	$M_i$ (Lb.in)	$M_o$ (Lb.in)	Fillet (in)	$E$ (psi)	$\nu$
9.80	0.10	39.00	39.00	4.90	0.05	14.50	952.70	952.70	0.05	30000000.00	0.30

WRC 493 [15] Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
2.110687	1.055344	0.014071	0.007036	0.351781	0.175891	0.703562	0.351781

Span Element Circumferencial Nozzle	7.5
Number Element Circumferencial Nozzle	48
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

## 4.2 เทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อย (Sub-model technique)

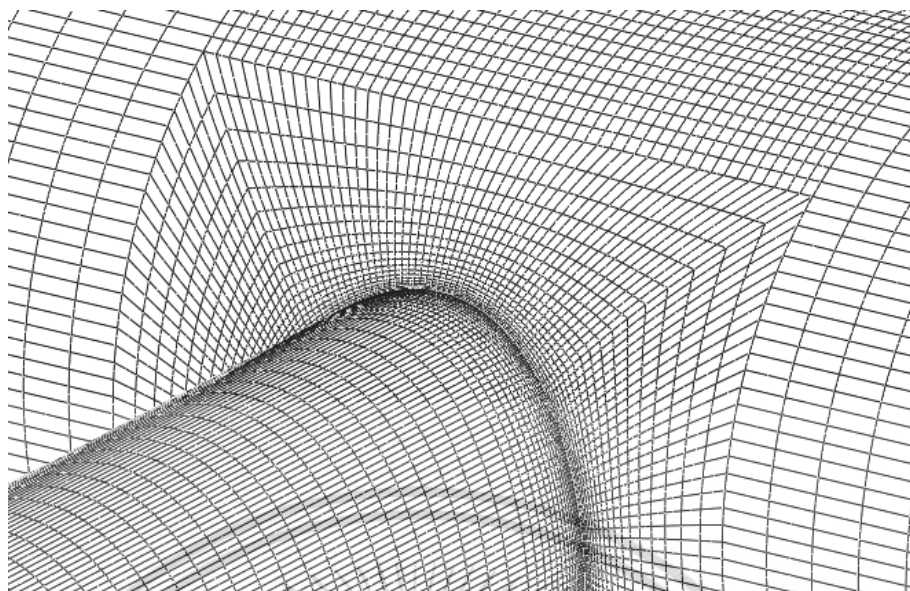
การใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย่อยมาวิเคราะห์ความเค้นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรง ก็เพื่อที่จะศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำและเวลาที่ใช้ในแต่ละเทคนิค ประโยชน์ของการใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองย่อยก็คือช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์และช่วยลดเวลาในการสร้างแบบจำลองและเวลาในการประมวลผล เพราะเราจะสนใจเฉพาะจุดวิกฤตที่สุด ทำให้เราสามารถที่จะสร้างโครงข่ายจุดต่อของแบบจำลองได้ละเอียดมากยิ่งขึ้น ทั้งยังใช้เวลาในการประมวลผลที่น้อยกว่าในความละเอียดของจุดวิกฤตที่เท่ากัน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ดำเนินการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อย 4 เทคนิคคือ

- 4.2.1 Whole modeling
- 4.2.2 Solid to solid submodeling
- 4.2.3 Shell to solid submodeling
- 4.2.4 Shell to solid coupling

ซึ่งในแต่ละเทคนิคนั้นใช้ค่าตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระของปัญหา ORNL-1 [27] ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.2, 4.8 ตามลำดับ ซึ่งได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ โดยการดำเนินการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อยในแต่ละเทคนิคนั้นได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

### 4.2.1 Whole modeling

เทคนิคนี้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาถูกสร้างขึ้นและวิเคราะห์จากทั้งหมดของปัญหา ซึ่งเป็นการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผู้คนส่วนใหญ่โดยทั่วไปใช้ โดยการสร้างแบบจำลองตัวแปรทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ และใช้ค่าตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระของปัญหา ORNL-1 [27] ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick ซึ่งกำหนดให้ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 1.875 องศา และขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมต่อที่บริเวณรอยเชื่อมต้อมีค่าเท่ากับ  $0.026\sqrt{RT}$  และ  $0.052\sqrt{rt}$  โดยใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยก และให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต้อมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวและแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคนี้ได้แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับและตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Whole model



รูปที่ 4.9 รูปแบบการ Mesh สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์ เอลิเมนต์ แบบ Whole model



รูปที่ 4.10 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Whole model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Whole model

ORNL-1 [27] Problem Definition

$D_i$ (in)	$T$ (in)	$d_i$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_i$ (Lb.in)	$M_o$ (Lb.in)	Fillet (in)	$E$ (psi)	$\nu$
9.80	0.10	4.90	0.05	39.00	39.00	14.50	952.70	952.70	0.05	30000000.00	0.30

WRC 493 [15] Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
2.110687	1.055344	0.014071	0.007036	0.351781	0.175891	0.703562	0.351781

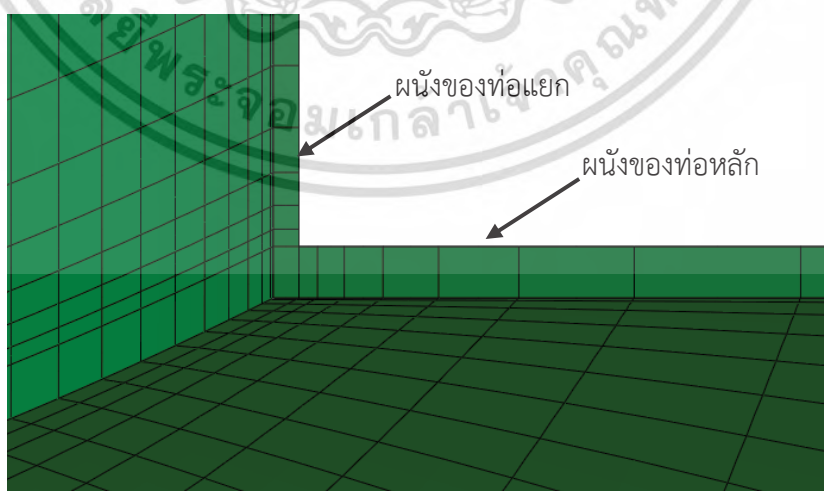
Span Element Circumferencial Nozzle	1.875
Number Element Circumferencial Nozzle	24
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

## 4.2.2 Solid to solid submodeling

สำหรับเทคนิคนี้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาทั้งหมดถูกสร้างขึ้นมาจากด้วยโครงข่ายจุดต่อแบบหยาบ (Coarse) และทำการวิเคราะห์จากทั้งหมดของปัญหา (Whole model) เพื่อหาผลเฉลยของฟังก์ชันความเค้น ซึ่งเรียกแบบจำลองนี้ว่า แบบจำลองรวม (Global model) หลังจากนั้นคัดเลือกส่วนที่สนใจที่ต้องการหาความเค้นแบบละเอียด เพื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลองย่อย (Submodel) แล้วดำเนินการสร้างโครงข่ายจุดต่อแบบละเอียด (Fine) และทำการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ผลเฉลยฟังก์ชันความเค้นของแบบจำลองรวมเป็นสภาพขอบเขตเงื่อนไขของแบบจำลองย่อย

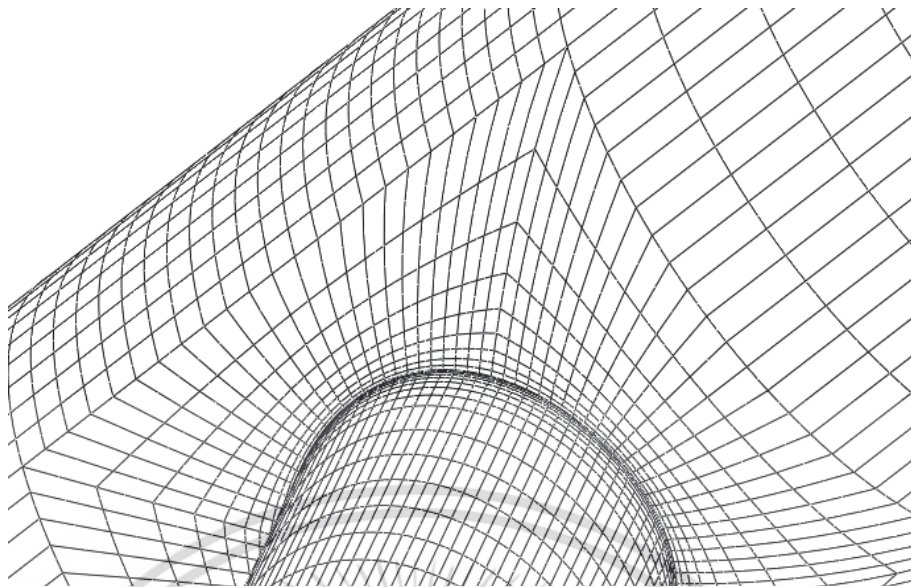
### 4.2.2.1 แบบจำลองรวม (Global model)

สร้างแบบจำลองรวมด้วยโครงข่ายจุดต่อแบบหยาบด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick โดยการสร้างแบบจำลองตัวแปรทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้และใช้ค่าตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระของปัญหา ORNL-1 [27] ด้วยขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 3.75 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) ก็บรอยเชื่อมต่อที่บริเวณรอยเชื่อมต้อมีค่าเท่ากับ  $0.054\sqrt{RT}$  และ  $0.108\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่งใช้จำนวน 1 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกดังแสดงในรูปที่ 4.11 และให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต้อมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวและแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองรวมนี้ได้แสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ และตารางที่ 4.3 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองแบบรวม



รูปที่ 4.11 จำนวนเอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกในแบบจำลองรวม (Solid element)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 รูปแบบการ Mesh สำหรับแบบจำลองรวม (Solid element)



รูปที่ 4.13 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองรวม (Solid element)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.2 แบบจำลองย่อย (Submodel)

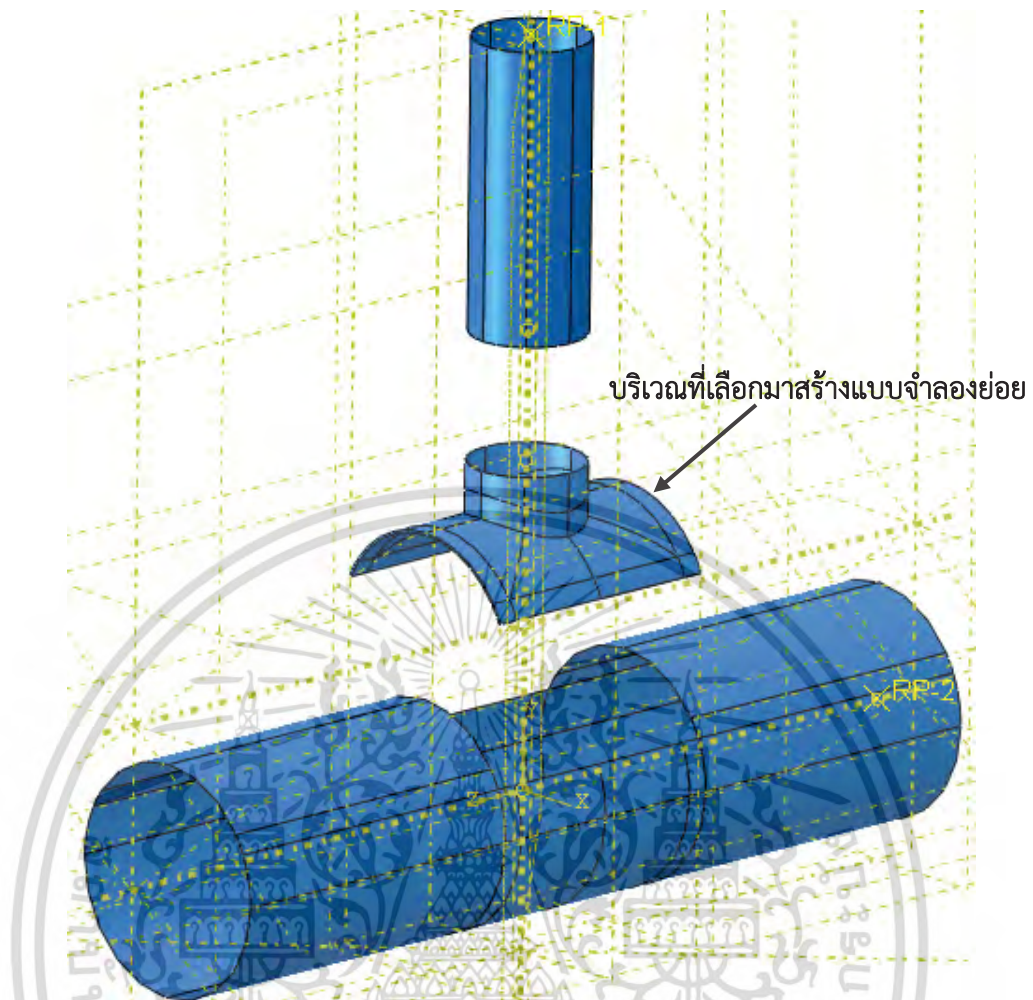
หลังจากที่เราดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลองรวมและได้ผลเฉลยของแบบจำลองรวมมาแล้วนั้น ซึ่งผลเฉลยเหล่านั้นจะถูกนำมาใช้เป็นสภาพเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองย่อยต่อไป ขั้นตอนต่อไปนั้นเป็นกำหนดบริเวณที่สนใจที่ต้องการหาความเค้นโดยละเอียดโดยการเลือกส่วนหนึ่งของแบบจำลองรวมและทำการสร้างโครงข่ายจุดต่อแบบละเอียดและวิเคราะห์หาความเค้นต่อไป

ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการทราบค่าความเค้นที่มากที่สุดของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบ ซึ่งบริเวณที่วิกฤติมากที่สุดคือบริเวณรอยเชื่อมต่อของท่อหลักกับท่อแยก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกบริเวณของการเชื่อมต่อที่อยู่ภายในระยะขอบเขตของการยุบตัวมาสร้างเป็นแบบจำลองย่อย ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 เพื่อดำเนินการสร้างโครงข่ายจุดต่อแบบละเอียดและวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป



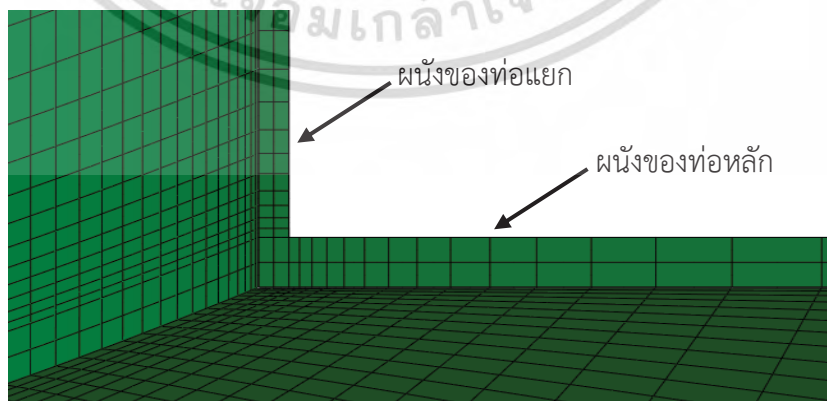
รูปที่ 4.14 บริเวณที่สนใจของการเชื่อมต่อที่อยู่ภายในระยะขอบเขตของการยุบตัว

สร้างแบบจำลองย่อยด้วยโครงข่ายจุดต่อแบบละเอียดด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick โดยการสร้างแบบจำลองตัวแปรทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้และใช้ค่าตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและภาวะของปัญหา ORNL-1 [27] ด้วยสภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ได้จากแบบจำลองรวม กำหนดให้ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 1.875 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) ก็บรอยเชื่อมต่อที่บริเวณรอยเชื่อมต้อมีค่าเท่ากับ  $0.026\sqrt{RT}$  และ  $0.052\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่งใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกดังแสดงในรูปที่ 4.16 และให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต้อมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวและแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองย่อยนี้ได้แสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



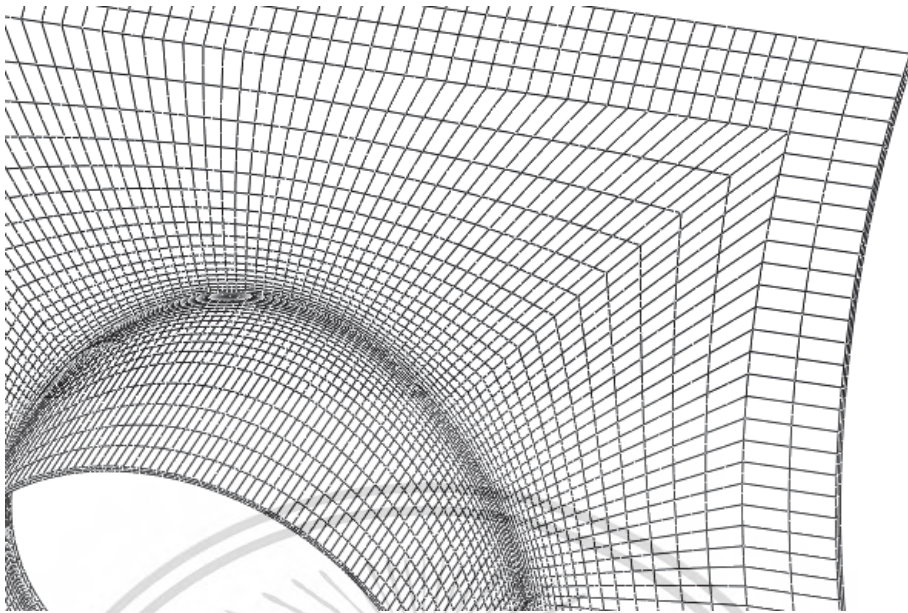
รูปที่ 4.15 บริเวณของแบบจำลองย่อยที่เลือก

ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ และตารางที่ 4.4 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อย

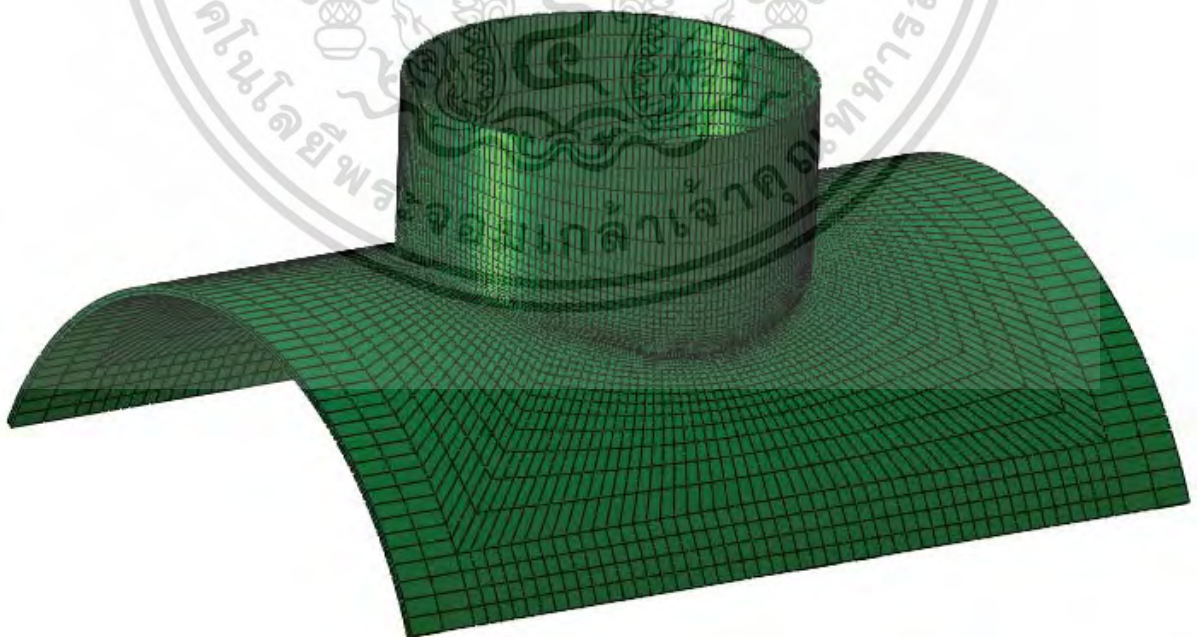


รูปที่ 4.16 จำนวนเอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งห้องหลักและห้องแยกในแบบจำลองย่อย (Solid element)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 รูปแบบการ Mesh สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element)



รูปที่ 4.18 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองแบบรวม (Solid element)

ORNL-1 [27] Problem Definition

$D_i$ (in)	$T$ (in)	$d_i$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_i$ (Lb.in)	$M_o$ (Lb.in)	Fillet (in)	$E$ (psi)	$\nu$
9.80	0.10	4.90	0.05	39.00	39.00	14.50	952.70	952.70	0.05	30000000.00	0.30

WRC 493 [15] Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
2.110687	1.055344	0.014071	0.007036	0.351781	0.175891	0.703562	0.351781

Span Element Circumferencial Nozzle	3.75
Number Element Circumferencial Nozzle	12
Element Through Wall	1
Aspect Ratio	Less than 5

**ตารางที่ 4.4** แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element)

ORNL-1 [27] Problem Definition

$D_i$ (in)	$T$ (in)	$d_i$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_i$ (Lb.in)	$M_o$ (Lb.in)	Fillet (in)	$E$ (psi)	$\nu$
9.80	0.10	4.90	0.05	39.00	39.00	14.50	952.70	952.70	0.05	30000000.00	0.30

WRC 493 [15] Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
2.110687	1.055344	0.014071	0.007036	0.351781	0.175891	0.703562	0.351781

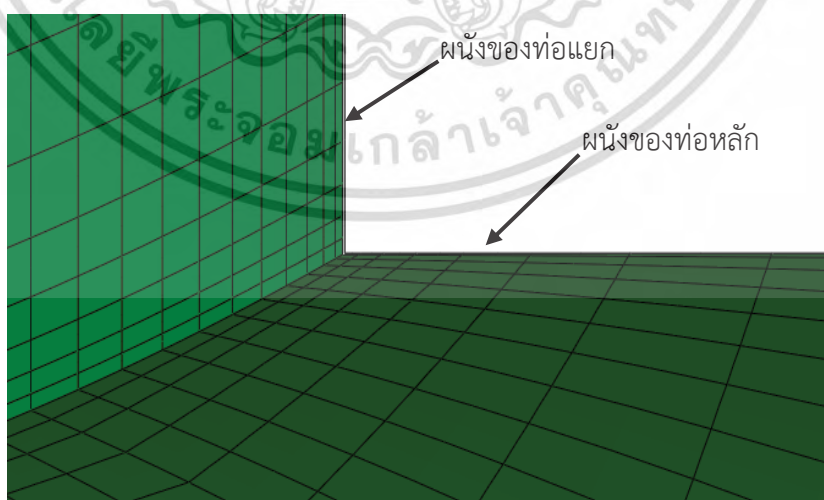
Span Element Circumferencial Nozzle	1.875
Number Element Circumferencial Nozzle	24
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

### 4.2.3 Shell to solid submodeling

สำหรับเทคนิคนี้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาทั้งหมดถูกสร้างขึ้นมาจากด้วยโครงข่ายจุดต่อแบบหยาบ (Coarse) ด้วย Shell element และทำการวิเคราะห์จากทั้งหมดของปัญหา (Whole model) เพื่อหาผลเฉลยของการกระจัด ซึ่งเรียกแบบจำลองนี้ว่า แบบจำลองรวม (Global model) หลังจากนั้นคัดเลือกส่วนที่สนใจที่ต้องการหาความเค้นแบบละเอียด เพื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลองย่อย (Submodel) ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick แล้วดำเนินการสร้างโครงข่ายจุดต่อแบบละเอียด (Fine) และทำการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ผลเฉลยการกระจัดของแบบจำลองรวมเป็นสภาพขอบเขตเงื่อนไขของแบบจำลองย่อย ซึ่งวิธีดำเนินการคล้าย ๆ กับเทคนิคก่อนหน้านี้

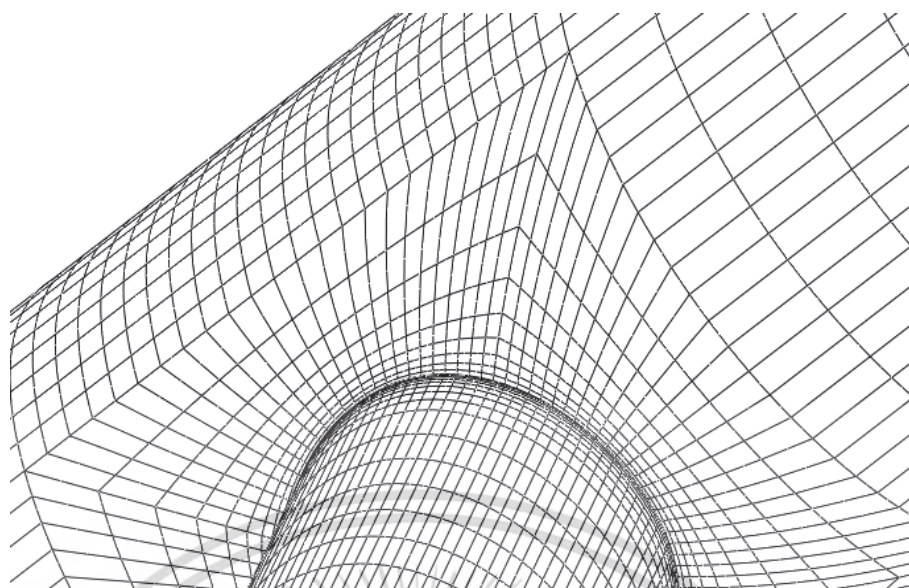
#### 4.2.3.1 แบบจำลองรวม (Global model)

สร้างแบบจำลองรวมด้วยโครงข่ายจุดต่อแบบหยาบด้วยชนิดเอลิเมนต์แบบ shell 8-nodes quadratic quadrilateral โดยการสร้างแบบจำลองตัวแปรทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้และใช้ค่าตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระของปัญหา ORNL-1 [27] ด้วยขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 3.75 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) กับรอยเชื่อมต่อที่บริเวณรอยเชื่อมมีค่าเท่ากับ  $0.054\sqrt{RT}$  และ  $0.108\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่งใช้จำนวน 1 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกดังแสดงในรูปที่ 4.19 และให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวและแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองรวมนี้ได้แสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ และตารางที่ 4.5 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองแบบรวม



รูปที่ 4.19 การเชื่อมต่อของเอลิเมนต์แบบ shell ของท่อหลักและท่อแยกในแบบจำลองรวม (Shell element)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 รูปแบบการ Mesh สำหรับแบบจำลองรวม (Shell element)



รูปที่ 4.21 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองรวม (Shell element)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3.2 แบบจำลองย่อย (Submodel)

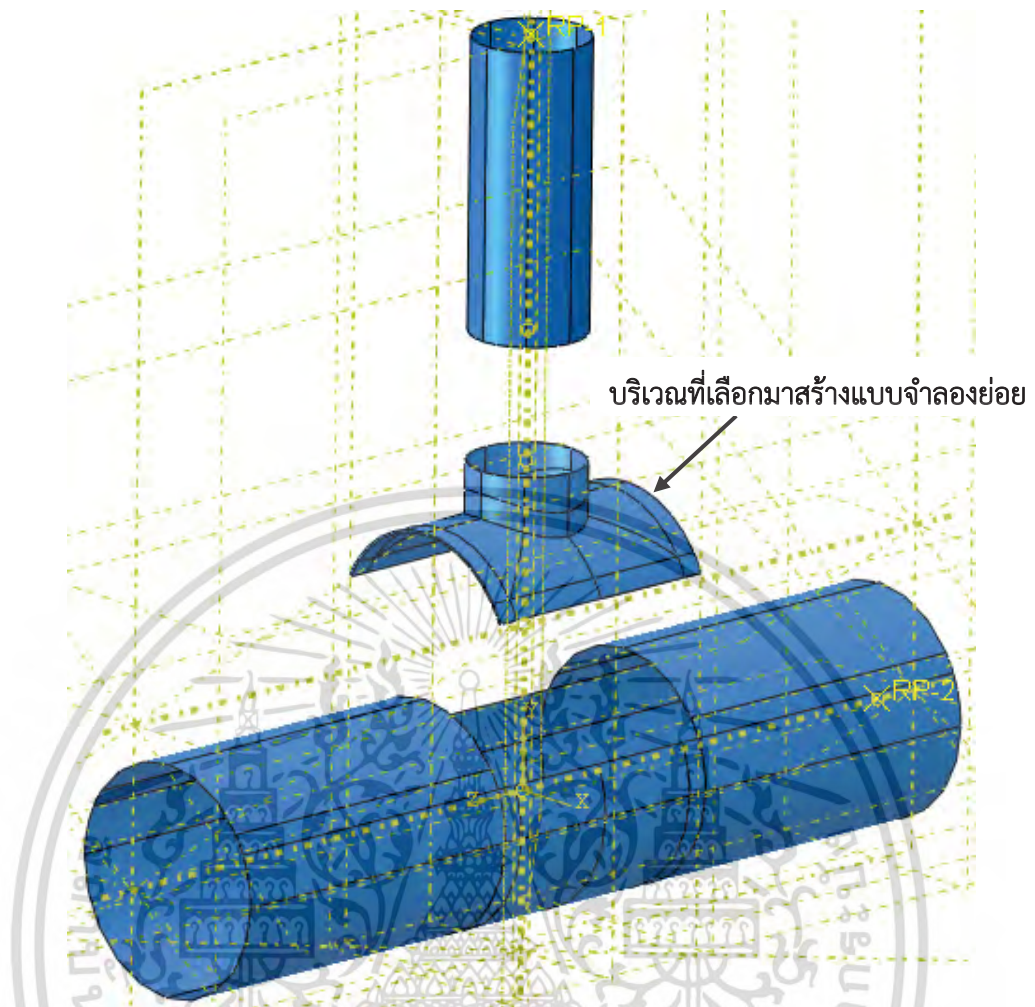
หลังจากที่เราดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลองรวมและได้ผลเฉลยของแบบจำลองรวมมาแล้วนั้น ซึ่งผลเฉลยเหล่านั้นจะถูกนำมาใช้เป็นสภาพเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองย่อยต่อไป ขั้นตอนต่อไป นั้นเป็นกำหนดบริเวณที่สนใจที่ต้องการหาความเค้นโดยละเอียดโดยการเลือกส่วนหนึ่งของแบบจำลองรวมและทำการสร้างโครงข่ายจุดต่อแบบละเอียดและวิเคราะห์หาความเค้นต่อไป

ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการทราบค่าความเค้นที่มากที่สุดของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบ ซึ่งบริเวณที่วิกฤติมากที่สุดคือบริเวณรอยเชื่อมต่อของท่อหลักกับท่อแยก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกบริเวณของการเชื่อมต่อที่อยู่ภายในระยะขอบเขตของการยุบตัวมาสร้างเป็นแบบจำลองย่อย ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 เพื่อดำเนินการสร้างโครงข่ายจุดต่อแบบละเอียดและวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป



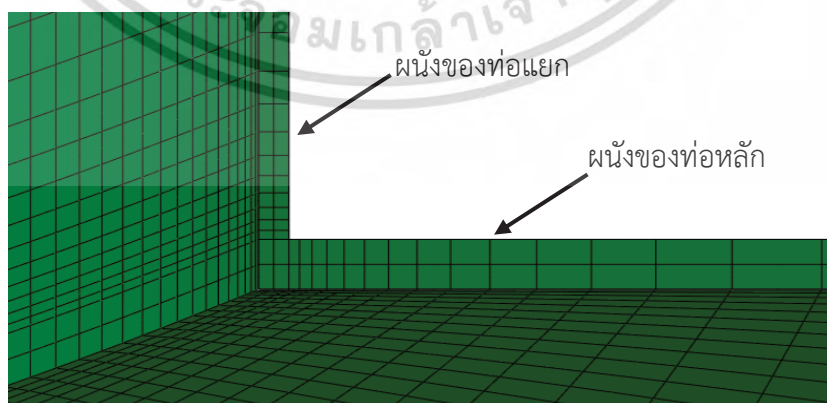
รูปที่ 4.22 บริเวณที่สนใจของการเชื่อมต่อที่อยู่ภายในระยะขอบเขตของการยุบตัว

สร้างแบบจำลองย่อยด้วยโครงการจุดต่อแบบละเอียดด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick โดยการสร้างแบบจำลองตัวแปรทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีการที่ได้ นำเสนอไปก่อนหน้านี้และใช้ค่าตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและภาวะของปัญหา ORNL-1 [27] ด้วยสภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ได้จากแบบจำลองรวม กำหนดให้ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 1.875 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) ก็บรอยเชื่อมต่อที่บริเวณรอยเชื่อมต้อมีค่าเท่ากับ  $0.026\sqrt{RT}$  และ  $0.052\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่งใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกดังแสดงในรูปที่ 4.24 และให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต้อมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวและแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองย่อยนี้ได้แสดง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



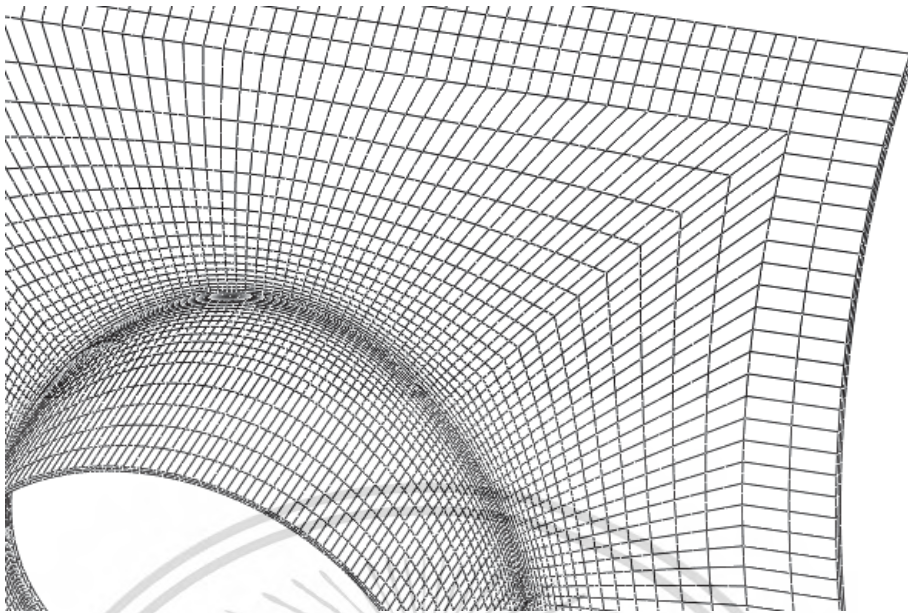
รูปที่ 4.23 บริเวณของแบบจำลองย่อที่เลือก

ในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ และตารางที่ 4.6 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อ

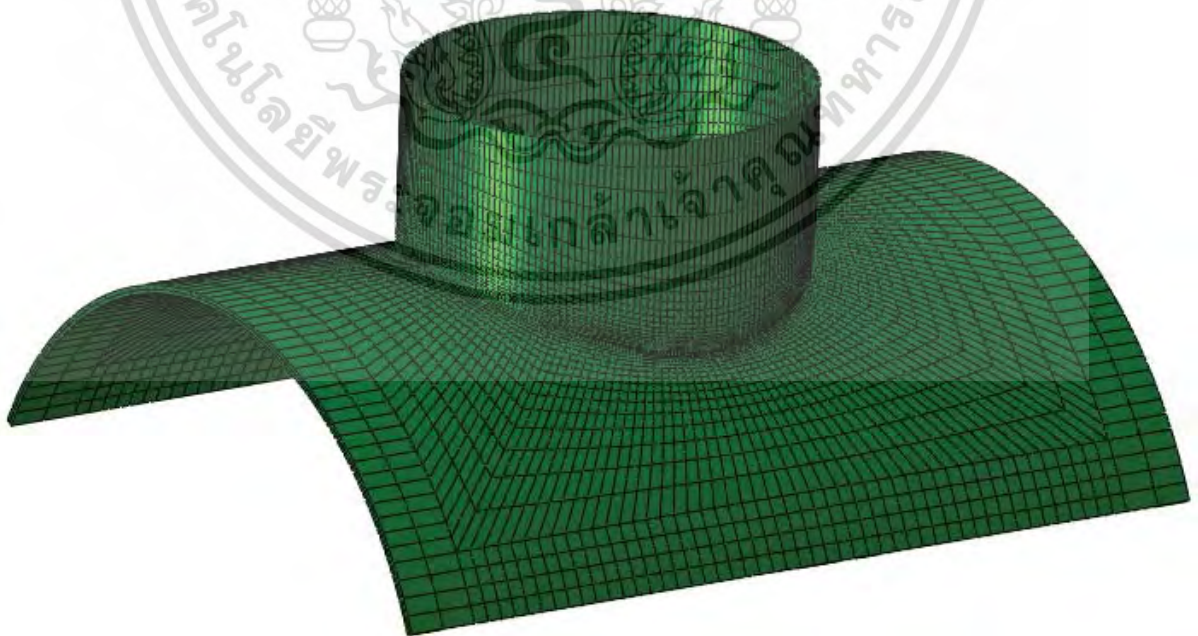


รูปที่ 4.24 จำนวนเอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งห้องหลักและห้องแยกในแบบจำลองย่อ (Solid element)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 รูปแบบการ Mesh สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element)



รูปที่ 4.26 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองแบบรวม (Shell element)

ORNL-1 [27] Problem Definition

$D_i$ (in)	$T$ (in)	$d_i$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_i$ (Lb.in)	$M_o$ (Lb.in)	Fillet (in)	$E$ (psi)	$\nu$
9.80	0.10	4.90	0.05	39.00	39.00	14.50	952.70	952.70	0.05	30000000.00	0.30

WRC 493 [15] Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
2.110687	1.055344	0.014071	0.007036	0.351781	0.175891	0.703562	0.351781

Span Element Circumferencial Nozzle	3.75
Number Element Circumferencial Nozzle	12
Element Through Wall	1
Aspect Ratio	Less than 5

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองย่อย (Solid element)

ORNL-1 [27] Problem Definition

$D_i$ (in)	$T$ (in)	$d_i$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_i$ (Lb.in)	$M_o$ (Lb.in)	Fillet (in)	$E$ (psi)	$\nu$
9.80	0.10	4.90	0.05	39.00	39.00	14.50	952.70	952.70	0.05	30000000.00	0.30

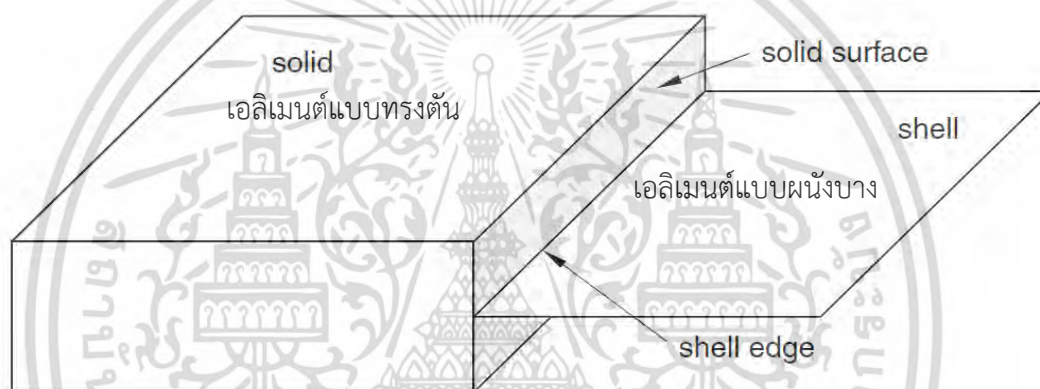
WRC 493 [15] Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
2.110687	1.055344	0.014071	0.007036	0.351781	0.175891	0.703562	0.351781

Span Element Circumferencial Nozzle	1.875
Number Element Circumferencial Nozzle	24
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

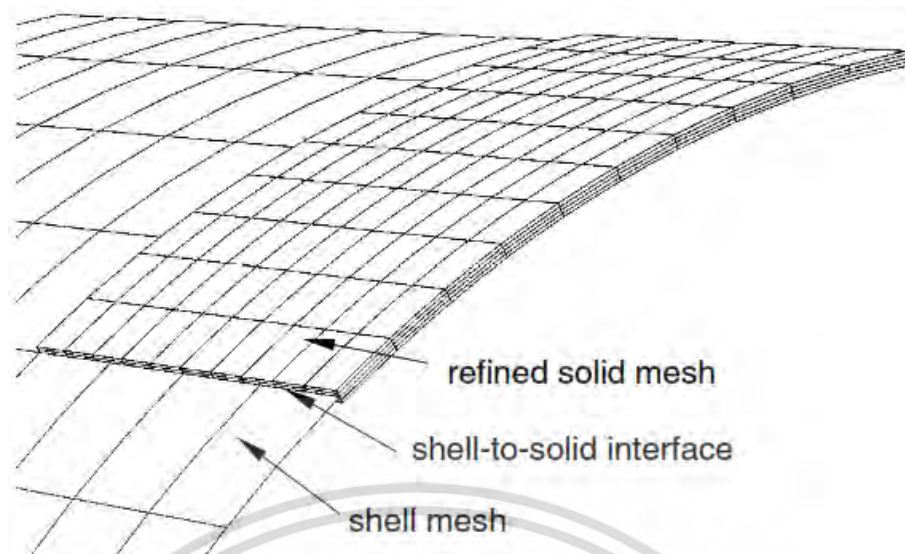
#### 4.2.4 Shell to solid coupling

สำหรับเทคนิคนี้เป็นการสร้างและวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบใช้ร่วมกันของเอลิเมนต์ที่มีมิติต่ำ (Reduced dimensional elements) กับเอลิเมนต์ที่มีมิติสูง (Higher dimensional elements) โดยใช้เอลิเมนต์ที่มีมิติต่ำสำหรับสร้างแบบจำลองที่ไม่ได้สนใจส่วนเอลิเมนต์ที่มีมิติสูงใช้สำหรับสร้างแบบจำลองในส่วนที่สนใจ การ coupling ของเอลิเมนต์แบบผนังบาง (Shell element) กับเอลิเมนต์แบบทรงตัน (Solid element) นั้นต้องการข้อสมมุติที่ว่า การเปลี่ยนแปลงของความเค้นตลอดความหนาของเอลิเมนต์แบบผนังบาง ที่จุดเชื่อมต่อกับเอลิเมนต์แบบทรงตัน ทฤษฎีของผนังบางได้สมมุติให้อัตราส่วนระหว่างความหนาผนังของผนังบางกับรัศมีความโค้งของพื้นผิวกลาง (Midsurface) นั้นค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบกับ 1 หรืออีกนัยหนึ่งคือพื้นผิวตรงกลางของส่วนที่เป็นเอลิเมนต์แบบทรงตันจะต้องตรงกันกับพื้นผิวตรงกลางของส่วนที่เป็นเอลิเมนต์แบบผนังบางตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 การเชื่อมต่อกันของเอลิเมนต์แบบทรงตันกับเอลิเมนต์แบบผนังบาง [23]

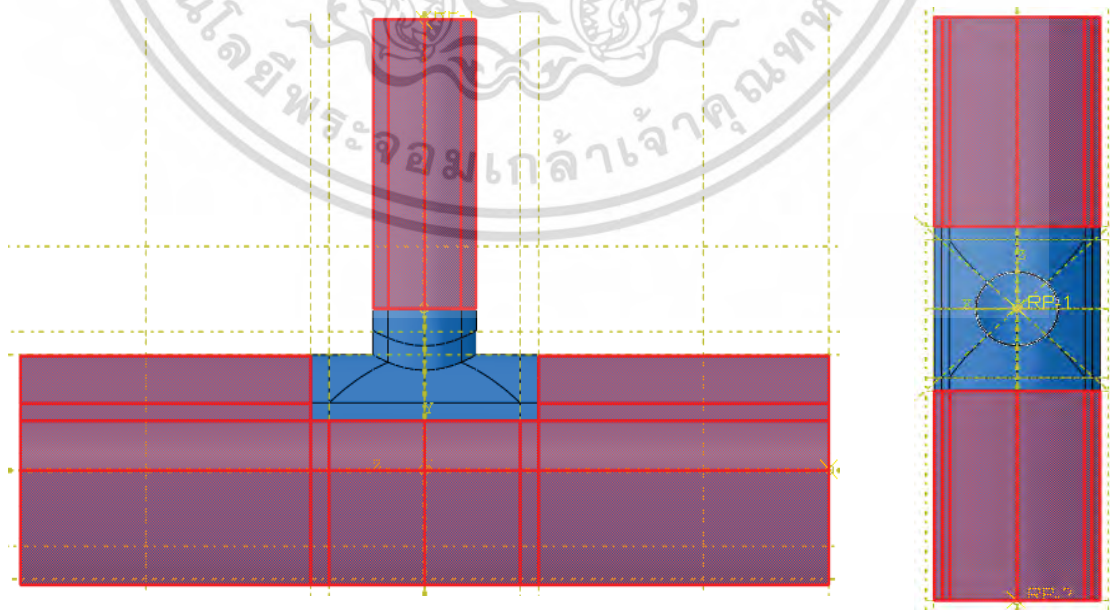
เทคนิคนี้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาถูกสร้างขึ้นมาด้วยการยึดติดกันของชนิดเอลิเมนต์แบบผนังบางกับเอลิเมนต์แบบทรงตัน โดยให้ส่วนที่พิจารณาศึกษาความเค้นใช้เอลิเมนต์แบบทรงตันในการสร้างแบบจำลอง ส่วนที่เหลือของแบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาใช้เอลิเมนต์แบบผนังบาง ในการสร้างแบบจำลอง คล้าย ๆ กับการสร้างแบบจำลองก่อนหน้านี้ โครงข่ายจุดต่อ (Mesh) แบบหยาบได้ถูกสร้างขึ้นที่บริเวณเอลิเมนต์แบบผนังบางและโครงตาข่ายแบบละเอียดถูกสร้างขึ้นที่บริเวณเอลิเมนต์แบบทรงตันและดำเนินการวิเคราะห์จากทั้งหมดของปัญหาส่วนบริเวณที่เชื่อมต่อกันของทั้งสองชนิดเอลิเมนต์นั้นใช้การยึดแบบ Shell to solid coupling ซึ่งเป็นเทคนิค Surface-based สำหรับยึดเอลิเมนต์ผนังบางไปยังเอลิเมนต์ทรงตัน (Solid element แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 โดยที่ Shell to solid coupling นี้อนุญาตให้ติดตามการเคลื่อนที่ของขอบของผนังบางไปยังการเคลื่อนที่ของพื้นผิวของของแข็งที่อยู่ในบริเวณที่ติดกัน



รูปที่ 4.28 Surface-based สำหรับยึดเอลิเมนต์ผิบบางไปยังเอลิเมนต์ทรงตัน [23]

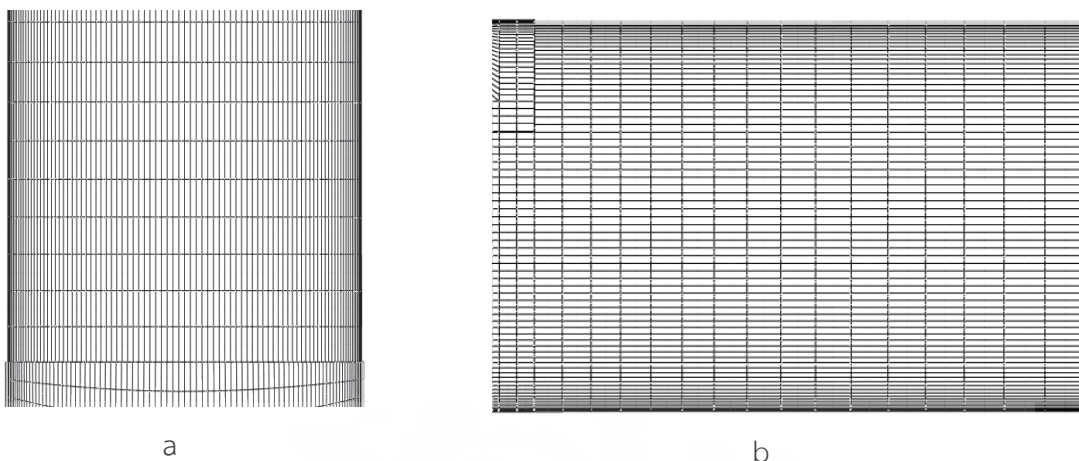
#### 4.2.4.1 แบบจำลองเอลิเมนต์ผิบบาง (Shell model)

สร้างแบบจำลองตัวแปรทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้และใช้ค่าตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระของปัญหา ORNL-1 [27] ด้วยชนิดเอลิเมนต์แบบ Shell 8-nodes quadratic quadrilateral สำหรับส่วนที่ต้องการสร้างโครงข่ายจุดต่อแบบหยาดตั้งแสดงในรูปที่ 4.29 กำหนดให้ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 1.875 องศาและขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมต่อที่อยู่ภายนอกขอบเขตของการยุบตัวมีค่ามากกว่า  $\sqrt{RT}$  และ  $\sqrt{rt}$  ตามลำดับ โดยใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนา



รูปที่ 4.29 บริเวณแบบจำลองที่สร้างด้วยเอลิเมนต์ผิบบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

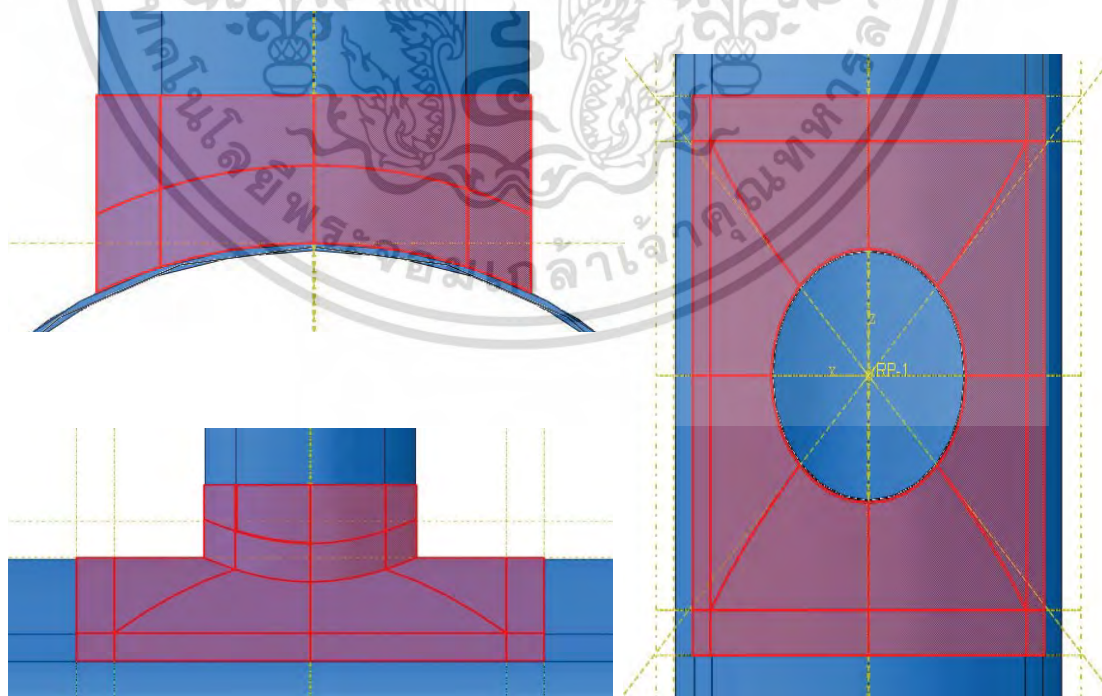


รูปที่ 4.30 รูปแบบของโครงข่ายจุดต่อของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเอลิเมนต์ผนังบาง (a) ท่อแยก (b) ท่อหลัก

ผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยก ซึ่งรูปที่ 4.30 ได้แสดงรูปแบบของโครงข่ายจุดต่อของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเอลิเมนต์ผนังบาง

#### 4.2.4.2 แบบจำลองเอลิเมนต์ทรงตัน (Solid model)

สร้างแบบจำลองตัวแปรทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้และใช้ค่าตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระของปัญหา ORNL-1 [27] ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick สำหรับส่วนที่ต้องการสร้างโครงข่ายจุดต่อแบบละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 บริเวณแบบจำลองที่สร้างด้วยเอลิเมนต์ทรงตัน

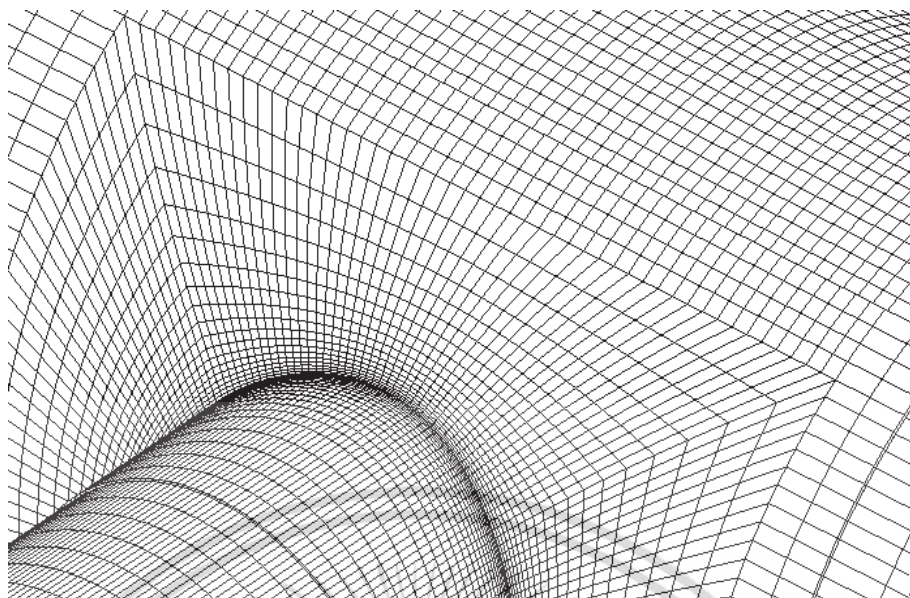
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 1.875 องศาและขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) ก็บรอยเชื่อมต่อที่บริเวณรอยเชื่อมต้อมีค่าเท่ากับ  $0.026\sqrt{RT}$  และ  $0.052\sqrt{rt}$  ตามลำดับ โดยใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกดังแสดงในรูปที่ 4.32 และให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต้อมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบของโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวได้แสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.32 จำนวนเอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

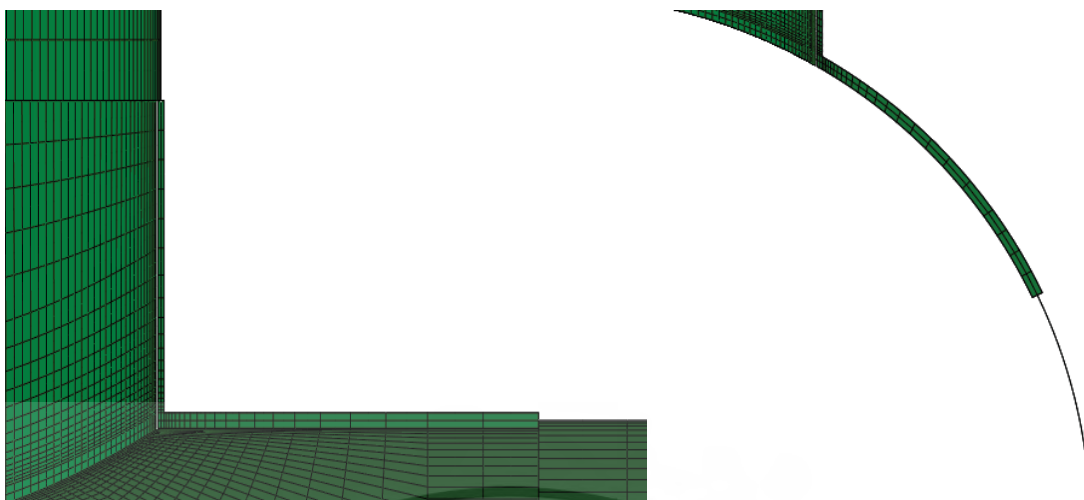


รูปที่ 4.33 โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยวบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเอลิเมนต์ทรงตัน

แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลอง Shell to solid coupling นี้ได้แสดงในรูปที่ 4.34 และ 4.35 และตารางที่ 4.7 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลอง Shell to solid coupling นี้



รูปที่ 4.34 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลอง Shell to solid coupling  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34a รายละเอียดแสดงส่วน Solid element และ Shell element

ตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบสามารถหาได้ด้วยการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสม จากนั้นสมการความสัมพันธ์สามารถพัฒนาขึ้นได้โดยใช้ค่าตัวประกอบเหล่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลอง Shell to solid coupling

ORNL-1 [27] Problem Definition

$D_i$ (in)	$T$ (in)	$d_i$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_i$ (Lb.in)	$M_o$ (Lb.in)	Fillet (in)	$E$ (psi)	$\nu$
9.80	0.10	4.90	0.05	39.00	39.00	14.50	952.70	952.70	0.05	30000000.00	0.30

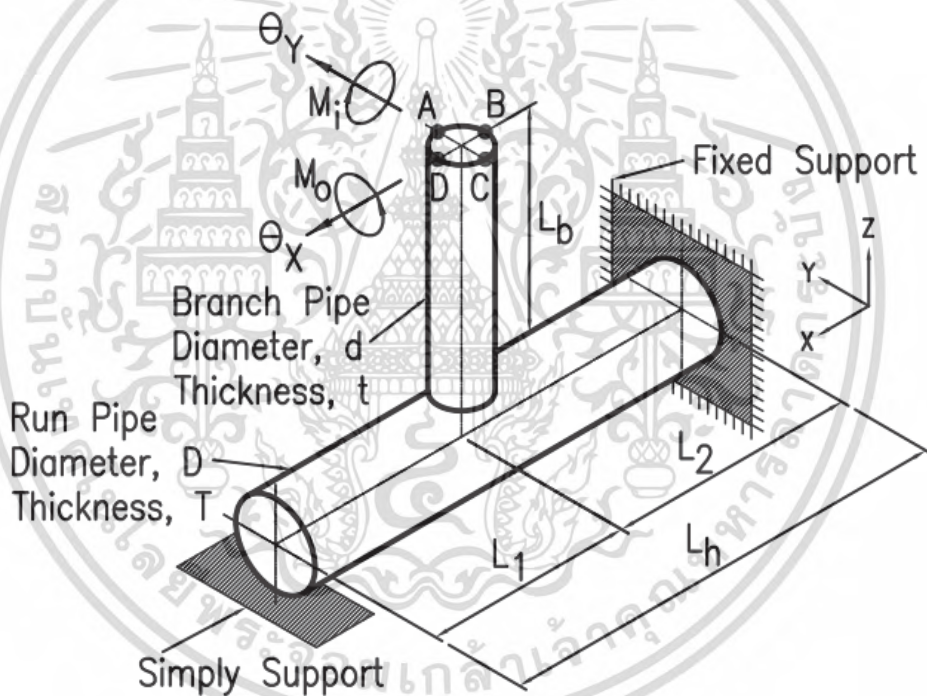
WRC 493 [15] Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
2.110687	1.055344	0.014071	0.007036	0.351781	0.175891	0.703562	0.351781

Span Element Circumferencial Nozzle	1.875
Number Element Circumferencial Nozzle	24
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

### 4.3 การหาความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม

เพื่อกำจัดผลกระทบของความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่มีผลต่อตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบด้วยสภาพจุดปลายที่จุดปลายข้างที่ติดกับ  $L_2$  ถูกรองรับแบบยึดแน่นและที่จุดปลายข้างที่ติดกับ  $L_1$  ถูกรองรับแบบธรรมดา โดยที่จุดปลายของท่อแยกถูกโมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบกระทำดังแสดงในรูปที่ 4.35 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาถูกสร้างขึ้นมาด้วยโครงตาข่ายละเอียดเพียงพอและวิเคราะห์จากทั้งหมดของปัญหา โดยการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองซึ่งได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ด้วย  $d/D = 0.1, 0.2, 0.333, 0.5, 0.75$  และ  $1$  รวมทั้ง  $D/T = 100$  และ  $t/T = d/D$  โดยให้  $D = 100$  นิ้ว เพื่อหาความยาวของทั้งท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม โดยพิจารณาการลู่เข้าของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบที่ได้จากสมการที่ 3.10 ผลลัพธ์ทั้งหมดได้เหล่านี้จะได้ออกใช้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นต่อไป



รูปที่ 4.35 แผนภาพของการต่อท่อแยก, สภาพจุดปลายและการกระทำของโมเมนต์ดัดของการศึกษา

#### 4.3.1 ขั้นตอนการดำเนินการหาความยาวของท่อแยก ( $L_b$ ) ที่เหมาะสม

4.3.1.1 สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน  $d/D$

4.3.1.2 กำหนดความยาวของท่อหลัก ( $L_1, L_2$ ) ให้มีค่าเริ่มต้นเป็น  $12D$  ส่วนความยาวของท่อแยก ( $L_b$ ) ให้มีค่าเริ่มต้นเป็น  $1D$

4.3.1.3 ดำเนินการหาความยาวของท่อแยกที่เหมาะสม ด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีภาระโมเมนต์ดัดทั้งในระนาบและนอกระนาบกระทำที่ปลายของท่อแยก แล้วเก็บค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.4 พิจารณาการลู่เข้าของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบ ถ้าค่าตัวประกอบยึดหยุ่นนอกระนาบไม่มีการลู่เข้า ให้ยึดการลู่เข้าของค่าตัวประกอบยึดหยุ่นในระนาบเป็นหลัก เก็บค่าความยาวของท่อแยก  $L_b$  เมื่อมีการลู่เข้า แล้วไปหาความยาวของท่อหลัก  $L_1$  ต่อไป ถ้ายังไม่มีการลู่เข้า ดำเนินการเพิ่มความยาวของท่อแยก ( $L_b$ ) ครั้งละ  $0.5D$  แล้วกลับไปดำเนินการตามในข้อที่ 4.3.1.3 และดำเนินการเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่าความยาวของท่อแยกที่เหมาะสม โดยที่ยังคงความยาวของท่อหลัก ( $L_1, L_2$ ) ไว้เท่าเดิม

#### 4.3.2 ขั้นตอนการดำเนินการหาความยาวของท่อหลัก ( $L_1$ ) ที่เหมาะสม

4.3.2.1 กำหนดความยาวของท่อแยก ( $L_b$ ) ให้มีค่าเริ่มต้นตามที่ได้มาจากข้อที่ 4.3.1.4 ความยาวของท่อหลัก  $L_1$  ให้มีค่าเริ่มต้นเป็น  $1D$  ส่วนความยาวของท่อหลัก  $L_2$  ให้มีค่าเริ่มต้นเป็น  $12D$

4.3.2.2 ดำเนินการหาความยาวของท่อหลัก  $L_1$  ที่เหมาะสม ด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีภาระโมเมนต์ดัดทั้งในระนาบและนอกระนาบกระทำที่ปลายของท่อแยก แล้วเก็บค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบ

4.3.2.3 พิจารณาการลู่เข้าของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบ ถ้าค่าตัวประกอบยึดหยุ่นนอกระนาบไม่มีการลู่เข้า ให้ยึดการลู่เข้าของค่าตัวประกอบยึดหยุ่นในระนาบเป็นหลัก เก็บค่าความยาวของท่อหลัก  $L_1$  เมื่อมีการลู่เข้า แล้วไปหาความยาวของท่อหลัก  $L_2$  ต่อไป ถ้ายังไม่มีการลู่เข้า ดำเนินการเพิ่มความยาวของท่อหลัก  $L_1$  ครั้งละ  $0.5D$  แล้วกลับไปดำเนินการตามในข้อที่ 4.3.2.2 และดำเนินการเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่าความยาวของท่อหลัก  $L_1$  ที่เหมาะสม โดยที่ยังคงความยาวของท่อหลัก  $L_2$  และท่อแยก ( $L_b$ ) ไว้เท่าเดิม

#### 4.3.3 ขั้นตอนการดำเนินการหาความยาวของท่อหลัก ( $L_2$ ) ที่เหมาะสม

4.3.3.1 กำหนดความยาวของท่อแยก ( $L_b$ ) ให้มีค่าเริ่มต้นตามที่ได้มาจากข้อที่ 4.3.1.4 และความยาวของท่อหลัก  $L_1$  ให้มีค่าเริ่มต้นตามที่ได้มาจากข้อที่ 4.3.2.3 ส่วนความยาวของท่อหลัก  $L_2$  ให้มีค่าเริ่มต้นเป็น  $1D$

4.3.3.2 ดำเนินการหาความยาวของท่อหลัก  $L_2$  ที่เหมาะสม ด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีภาระโมเมนต์ดัดทั้งในระนาบและนอกระนาบกระทำที่ปลายของท่อแยก แล้วเก็บค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบ

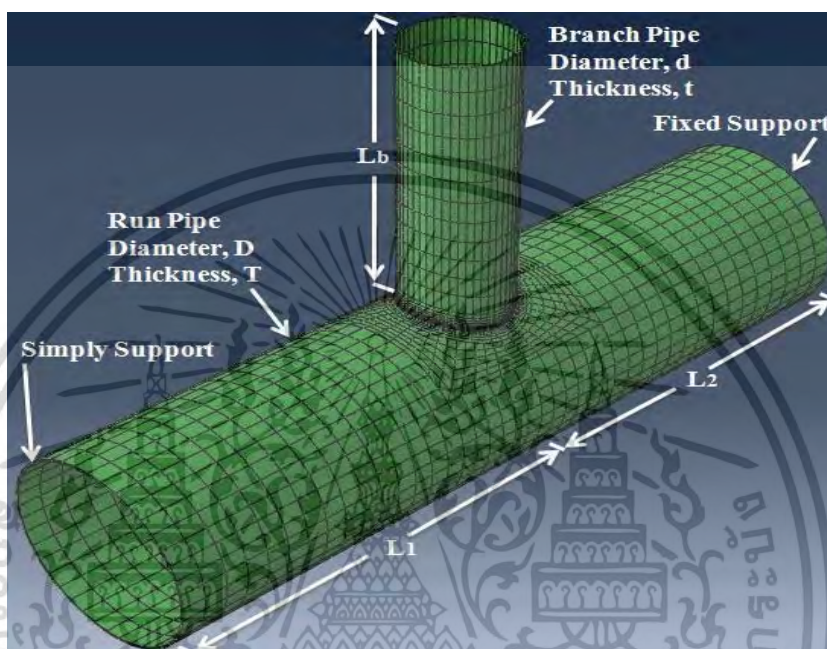
4.3.3.3 พิจารณาการลู่เข้าของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบ ถ้าค่าตัวประกอบยึดหยุ่นนอกระนาบไม่มีการลู่เข้า ให้ยึดการลู่เข้าของค่าตัวประกอบยึดหยุ่นในระนาบเป็นหลัก เก็บค่าความยาวของท่อหลัก  $L_2$  เมื่อมีการลู่เข้า กลับไปดำเนินการตามข้อที่ 4.3.1 สำหรับอัตราส่วน  $d/D$  ต่อไป ถ้ายังไม่มีการลู่เข้า ดำเนินการเพิ่มความยาวของท่อหลัก  $L_2$  ครั้งละ  $0.5D$  แล้วกลับไปดำเนินการตามในข้อที่ 4.3.3.2 และดำเนินการเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่าความยาวของท่อหลัก  $L_2$  ที่เหมาะสม โดยที่ยังคงความยาวของท่อหลัก  $L_1$  และท่อแยก ( $L_b$ ) ไว้เท่าเดิม

ดำเนินการหาความยาวที่เหมาะสมของท่อหลักและท่อแยกตามขั้นตอนในหัวข้อ 4.3.1, 4.3.2 และ 4.3.3 ไปเรื่อย ๆ จนครบทุกอัตราส่วน  $d/D$

#### 4.3.4 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 0.1$

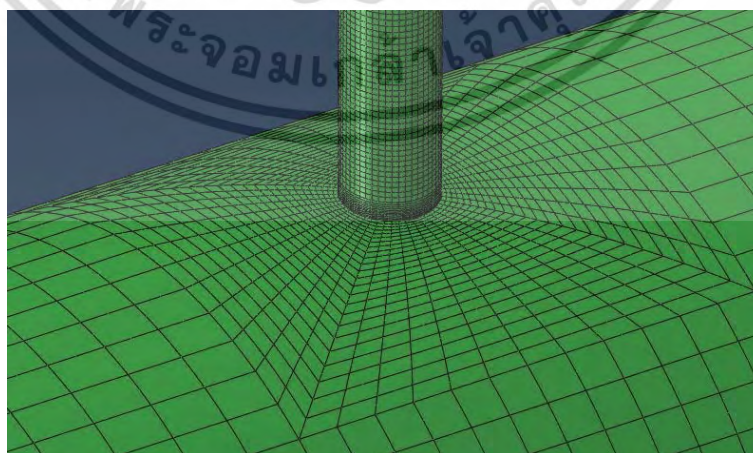
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามวิธีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองซึ่งได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ด้วย  $d/D = 0.1$ ,  $D/T = 100$  และ  $t/T = d/D$  โดยให้  $D = 100$  นิ้ว ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick ด้วยสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระตามที่ได้กล่าวไว้และที่ได้แสดงในรูปที่ 4.35 ก่อนหน้านี้ และรูปที่ 4.36 แสดงแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และสภาพเงื่อนไขขอบเขตของการรองรับ กำหนดให้ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่าง



รูปที่ 4.36 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และสภาพเงื่อนไขขอบเขตของการรองรับ

เอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 3.75 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) กับรอย



รูปที่ 4.37 โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน  $d/D = 0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.1$

Problem Definition

$D_o$ (in)	$T$ (in)	$d_o$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_n$ (Lb.in)	Normal Stress (psi)	$I_v$ (in <sup>4</sup> )	$I_n$ (in <sup>4</sup> )	$E$ (psi)	$\nu$
101	1.0	10.1	0.1	1200.0	1200.0	1200.0	7.85E+04	1.00E+04	3.93E+05	3.93E+01	3.00E+07	0.30

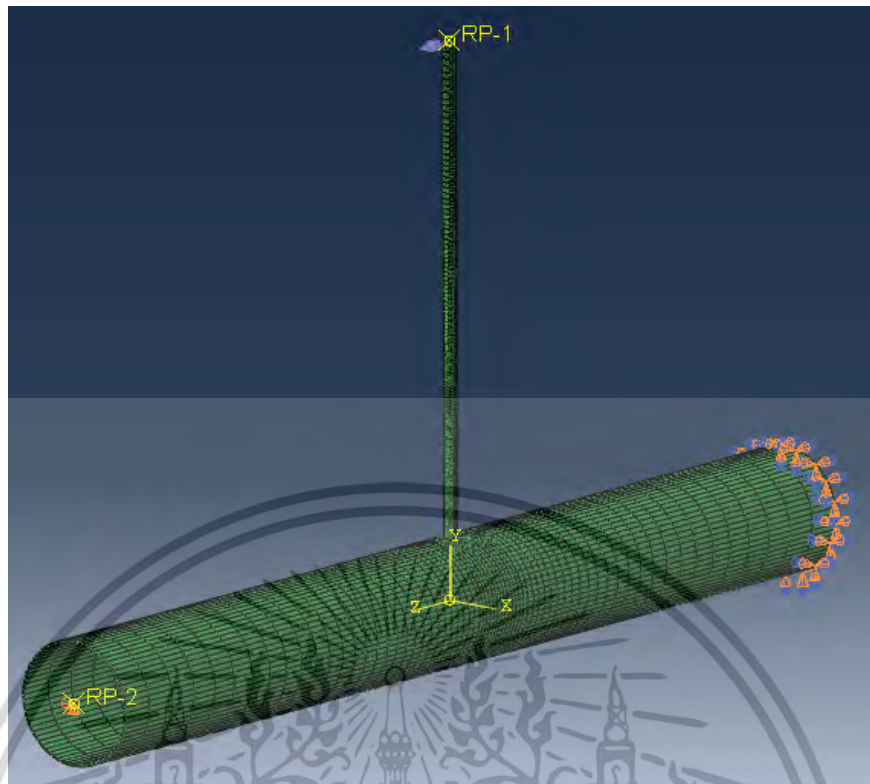
Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
21.213203	2.121320	0.141421	0.014142	3.535534	0.353553	7.071068	0.707107

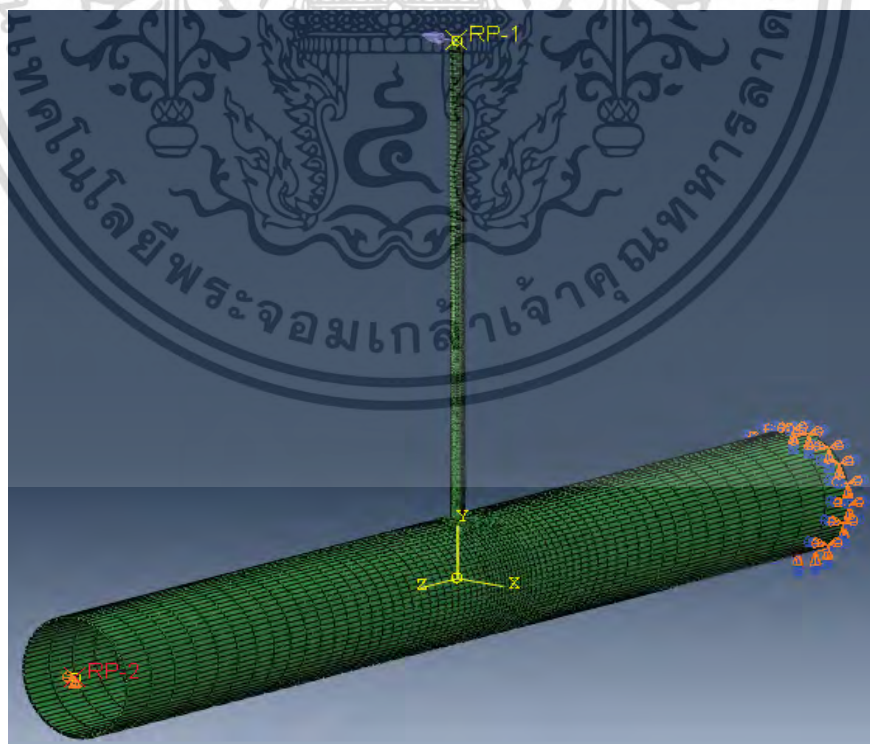
Span Element Circumferencial Nozzle	7.5
Number Element Circumferencial Nozzle	48
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

ตารางที่ 4.9 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.1$

หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_b$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_1$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_2$			
No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)
1	10	10	2	10	3	10	4	16	4.5	4	4
2	10	10	2.5	11	3.5	10	4	17	4.5	4.5	4
3	10	10	3	12	4	10	4	18	4.5	5	4
4	10	10	3.5	13	4.5	10	4	19	4.5	5.5	4
5	10	10	4	14	5	10	4	20	4.5	6	4
6	10	10	4.5	15	5.5	10	4	21	4.5	6.5	4
7	10	10	5					22	4.5	7	4
8	10	10	5.5					23	4.5	7.5	4
9	10	10	6								



รูปที่ 4.38 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ตัดในระนาบที่อัตราส่วน  $d/D = 0.1$

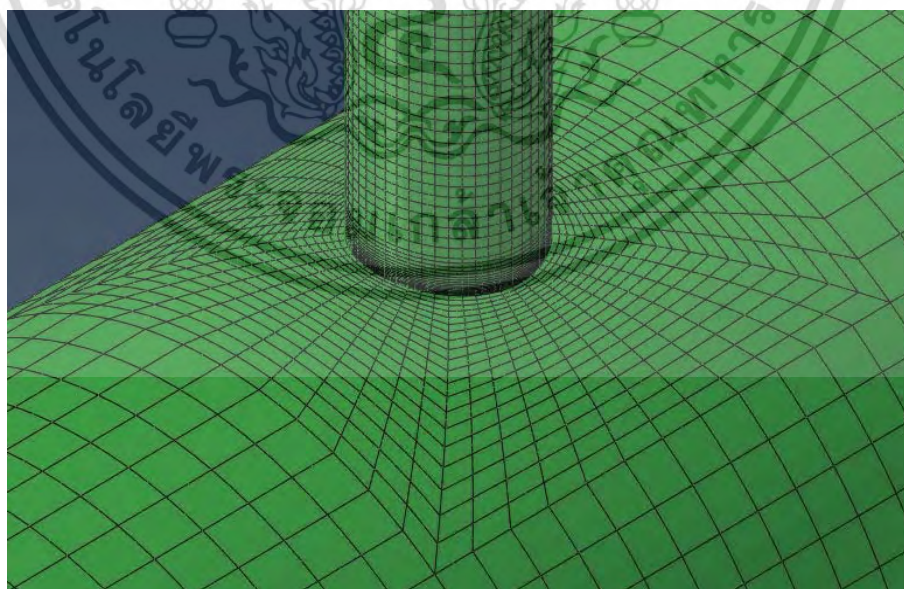


รูปที่ 4.39 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ตัดนอกระนาบที่อัตราส่วน  $d/D = 0.1$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมต่อกับบริเวณรอยเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ  $0.054\sqrt{RT}$  และ  $0.108\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่งใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกและให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต้อมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวได้แสดงในรูปที่ 4.37 และแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ที่อัตราส่วน  $d/D=0.1$  นี้ได้แสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ และตารางที่ 4.8 และ 4.9 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และแสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 1$  นี้

#### 4.3.5 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 0.2$

สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามวิธีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองซึ่งได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ด้วย  $d/D = 0.2$ ,  $D/T = 100$  และ  $t/T = d/D$  โดยให้  $D = 100$  นิ้ว ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick ด้วยสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระตามที่ได้กล่าวไว้และที่ได้แสดงในรูปที่ 4.35 และ 4.36 ก่อนหน้านี้ กำหนดให้ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 3.75 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) ก็บรอยเชื่อมต่อกับบริเวณรอยเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ  $0.054\sqrt{RT}$  และ  $0.108\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่งใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกและให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต้อมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวได้แสดงในรูปที่ 4.40 และตารางที่ 4.10 และ 4.11 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และแสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 2$  นี้

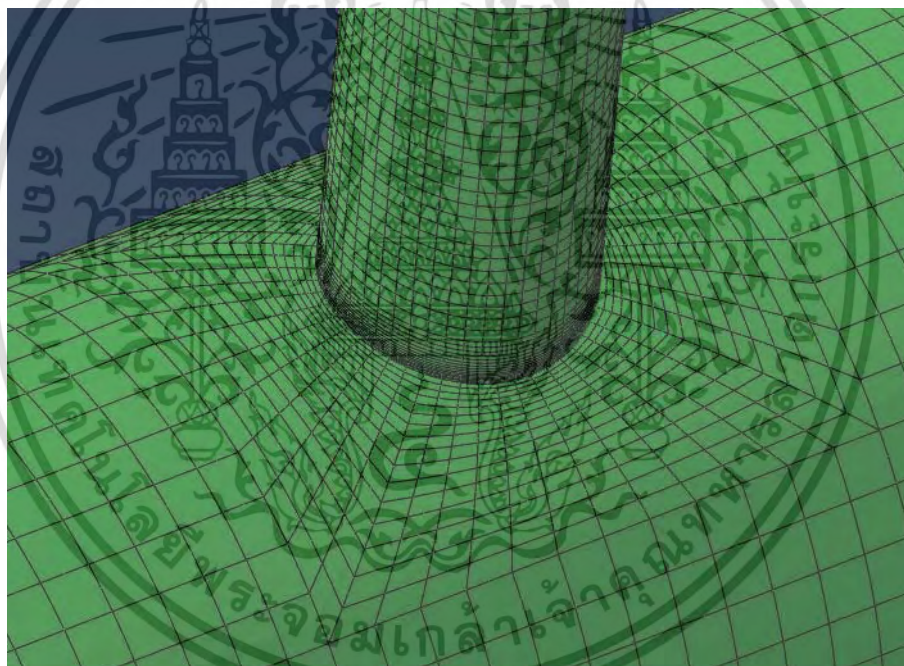


รูปที่ 4.40 โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน  $d/D = 0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.6 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 0.333$

สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามวิธีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองซึ่งได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ด้วย  $d/D = 0.333$ ,  $D/T = 100$  และ  $t/T = d/D$  โดยให้  $D = 100$  นิ้ว ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick ด้วยสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระตามที่ได้กล่าวไว้และที่ได้แสดงในรูปที่ 4.35 และ 4.36 ก่อนหน้านี้ กำหนดให้ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 3.75 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) ก็บรอยเชื่อมต่อกันที่บริเวณรอยเชื่อมต่อกันมีค่าเท่ากับ  $0.054\sqrt{RT}$  และ  $0.108\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่งใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกและให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต่อกันมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวได้แสดงในรูปที่ 4.41 และตารางที่ 4.12 และ 4.13 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และแสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.333$  นี้



รูปที่ 4.41 โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน  $d/D = 0.333$

#### 4.3.7 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 0.5$

สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามวิธีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองซึ่งได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ด้วย  $d/D = 0.5$ ,  $D/T = 100$  และ  $t/T = d/D$  โดยให้  $D = 100$  นิ้ว ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick ด้วยสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระตามที่ได้กล่าวไว้และที่ได้แสดงในรูปที่ 4.35 และ 4.36 ก่อนหน้านี้ กำหนดให้ขนาดความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.2$

Problem Definition

$D_o$ (in)	$T$ (in)	$d_o$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_n$ (Lb.in)	Normal Stress (psi)	$I_y$ (in <sup>4</sup> )	$I_z$ (in <sup>4</sup> )	$E$ (psi)	$\nu$
101	1.0	20.2	0.2	1200.0	1200.0	1200.0	6.28E+05	1.00E+04	3.93E+05	6.28E+02	3.00E+07	0.30

Parametric Definition

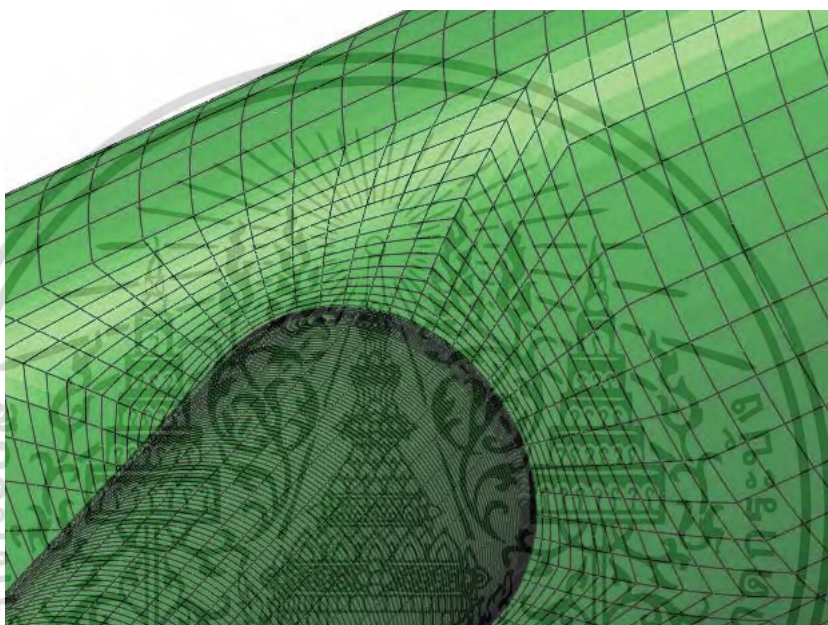
$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
21.213203	4.242641	0.141421	0.028284	3.535534	0.707107	7.071068	1.414214

Span Element Circumferencial Nozzle	7.5
Number Element Circumferencial Nozzle	48
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

ตารางที่ 4.11 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.2$

หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_b$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_1$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_2$			
No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)
1	10	10	3	9	3	10	4.5	19	5	5	4.5
2	10	10	3.5	10	3.5	10	4.5	20	5	5.5	4.5
3	10	10	4	11	4	10	4.5	21	5	6	4.5
4	10	10	4.5	12	4.5	10	4.5	22	5	6.5	4.5
5	10	10	5	13	5	10	4.5	23	5	7	4.5
6	10	10	5.5	14	5.5	10	4.5	24	5	7.5	4.5
7	10	10	6	15	6	10	4.5	25	5	8	4.5
8	10	10	6.5	16	6.5	10	4.5				
				17	7	10	4.5				
				18	7.5	10	4.5				

กว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 3.75 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) กับรอยเชื่อมต่อบริเวณรอยเชื่อมต่อกับค่าเท่ากับ  $0.054\sqrt{RT}$  และ  $0.108\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่งใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกและให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต่อกับค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวได้แสดงในรูปที่ 4.42 และตารางที่ 4.14 และ 4.15 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และแสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.5$  นี้



รูปที่ 4.42 โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน  $d/D = 0.5$

#### 4.3.8 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 0.75$

สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามวิธีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองซึ่งได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ด้วย  $d/D = 0.75$ ,  $D/T = 100$  และ  $t/T = d/D$  โดยให้  $D = 100$  นิ้ว ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick ด้วยสภาพเงื่อนไขขอบเขตและภาระตามที่ได้กล่าวไว้และที่ได้แสดงในรูปที่ 4.35 และ 4.36 ก่อนหน้านี้ กำหนดให้ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 3.75 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) กับรอยเชื่อมต่อบริเวณรอยเชื่อมต่อกับค่าเท่ากับ  $0.054\sqrt{RT}$  และ  $0.108\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่งใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกและให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต่อกับค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวได้แสดงในรูปที่ 4.43 และตารางที่ 4.16 และ 4.17 แสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.333$

Problem Definition

$D_o$ (in)	$T$ (in)	$d_o$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_n$ (Lb.in)	Normal Stress (psi)	$I_y$ (in <sup>4</sup> )	$I_z$ (in <sup>4</sup> )	$E$ (psi)	$\nu$
101	1.0	20.2	0.2	1200.0	1200.0	1200.0	6.28E+05	1.00E+04	3.93E+05	6.28E+02	3.00E+07	0.30

Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
21.213203	4.242641	0.141421	0.028284	3.535534	0.707107	7.071068	1.414214

Span Element Circumferencial Nozzle	7.5
Number Element Circumferencial Nozzle	48
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

ตารางที่ 4.13 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.333$

หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_b$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_1$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_2$			
No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)
1	10	10	3	9	3	10	4.5	19	5	5	4.5
2	10	10	3.5	10	3.5	10	4.5	20	5	5.5	4.5
3	10	10	4	11	4	10	4.5	21	5	6	4.5
4	10	10	4.5	12	4.5	10	4.5	22	5	6.5	4.5
5	10	10	5	13	5	10	4.5	23	5	7	4.5
6	10	10	5.5	14	5.5	10	4.5	24	5	7.5	4.5
7	10	10	6	15	6	10	4.5	25	5	8	4.5
8	10	10	6.5	16	6.5	10	4.5				
				17	7	10	4.5				
				18	7.5	10	4.5				

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.5$

Problem Definition

$D_o$ (in)	$T$ (in)	$d_o$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_n$ (Lb.in)	Normal Stress (psi)	$I_v$ (in <sup>4</sup> )	$I_n$ (in <sup>4</sup> )	$E$ (psi)	$\nu$
101	1.0	20.2	0.2	1200.0	1200.0	1200.0	6.28E+05	1.00E+04	3.93E+05	6.28E+02	3.00E+07	0.30

Parametric Definition

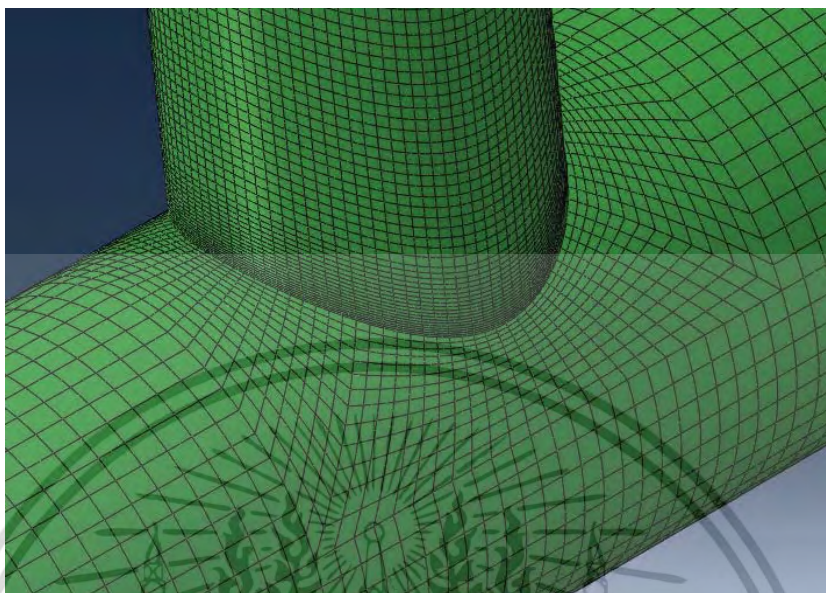
$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
21.213203	4.242641	0.141421	0.028284	3.535534	0.707107	7.071068	1.414214

Span Element Circumferencial Nozzle	7.5
Number Element Circumferencial Nozzle	48
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

ตารางที่ 4.15 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.5$

หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_b$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_1$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_2$			
No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)
1	10	10	3	9	3	10	4.5	19	5	5	4.5
2	10	10	3.5	10	3.5	10	4.5	20	5	5.5	4.5
3	10	10	4	11	4	10	4.5	21	5	6	4.5
4	10	10	4.5	12	4.5	10	4.5	22	5	6.5	4.5
5	10	10	5	13	5	10	4.5	23	5	7	4.5
6	10	10	5.5	14	5.5	10	4.5	24	5	7.5	4.5
7	10	10	6	15	6	10	4.5	25	5	8	4.5
8	10	10	6.5	16	6.5	10	4.5				
				17	7	10	4.5				
				18	7.5	10	4.5				

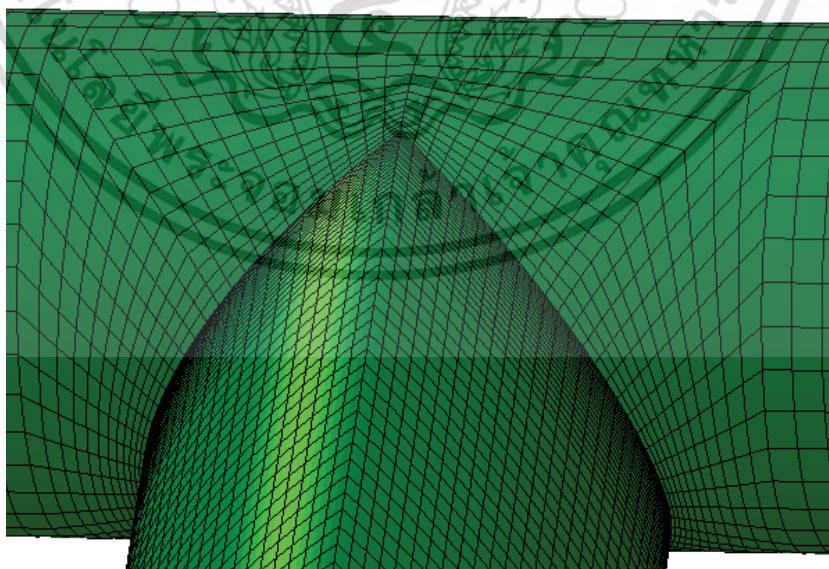
ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และแสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.75$  นี้



รูปที่ 4.43 โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน  $d/D = 0.75$

#### 4.3.9 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน $d/D = 1$

สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามวิธีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองซึ่งได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ด้วย  $d/D = 1$ ,  $D/T = 100$  และ  $t/T = d/D$  โดยให้  $D = 100$  นิ้ว ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick ด้วยสภาพเงื่อนไขขอบเขต



รูปที่ 4.44 โครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อัตราส่วน  $d/D = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และภาวะตามที่ได้กล่าวไว้และที่ได้แสดงในรูปที่ 4.35 และ 4.36 ก่อนหน้านี้ กำหนดให้ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่าเป็น 3.75องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉาก (Perpendicular direction) กับรอยเชื่อมต่อบริเวณรอยเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ  $0.054\sqrt{RT}$  และ  $0.108\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่งใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยกและให้อัตราส่วนของด้านมากที่สุด (Maximum aspect ratio) ที่บริเวณการเชื่อมต่อมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งรูปแบบการสร้างโครงข่ายจุดต่อในบริเวณระยะการยุบตัวได้แสดงในรูปที่ 4.44 และตารางที่ 4.18 และ 4.19 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และแสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 1$  นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.75$

Problem Definition

$D_o$ (in)	$T$ (in)	$d_o$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_n$ (Lb.in)	Normal Stress (psi)	$I_v$ (in <sup>4</sup> )	$I_n$ (in <sup>4</sup> )	$E$ (psi)	$\nu$
101	1.0	20.2	0.2	1200.0	1200.0	1200.0	6.28E+05	1.00E+04	3.93E+05	6.28E+02	3.00E+07	0.30

Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
21.213203	4.242641	0.141421	0.028284	3.535534	0.707107	7.071068	1.414214

Span Element Circumferencial Nozzle	7.5
Number Element Circumferencial Nozzle	48
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

ตารางที่ 4.17 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 0.75$

หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_b$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_1$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_2$			
No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_1$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)
1	10	10	3	9	3	10	4.5	19	5	5	4.5
2	10	10	3.5	10	3.5	10	4.5	20	5	5.5	4.5
3	10	10	4	11	4	10	4.5	21	5	6	4.5
4	10	10	4.5	12	4.5	10	4.5	22	5	6.5	4.5
5	10	10	5	13	5	10	4.5	23	5	7	4.5
6	10	10	5.5	14	5.5	10	4.5	24	5	7.5	4.5
7	10	10	6	15	6	10	4.5	25	5	8	4.5
8	10	10	6.5	16	6.5	10	4.5				
				17	7	10	4.5				
				18	7.5	10	4.5				

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 1$

Problem Definition

$D_o$ (in)	$T$ (in)	$d_o$ (in)	$t$ (in)	$L_1$ (in)	$L_2$ (in)	$L_b$ (in)	$M_n$ (Lb.in)	Normal Stress (psi)	$I_v$ (in <sup>4</sup> )	$I_n$ (in <sup>4</sup> )	$E$ (psi)	$\nu$
101	1.0	20.2	0.2	1200.0	1200.0	1200.0	6.28E+05	1.00E+04	3.93E+05	6.28E+02	3.00E+07	0.30

Parametric Definition

$3.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$3.0*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.02*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.02*\text{Sqrt}(r*t)$	$0.5*\text{Sqrt}(R*T)$	$0.5*\text{Sqrt}(r*t)$	$1.0*\text{Sqrt}(R*T)$	$1.0*\text{Sqrt}(r*t)$
21.213203	4.242641	0.141421	0.028284	3.535534	0.707107	7.071068	1.414214

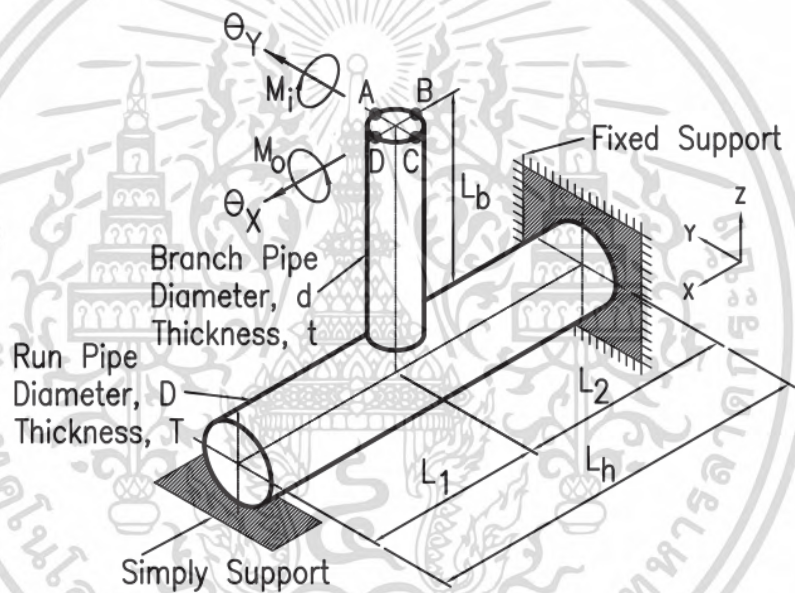
Span Element Circumferencial Nozzle	7.5
Number Element Circumferencial Nozzle	48
Element Through Wall	2
Aspect Ratio	Less than 5

ตารางที่ 4.19 แสดงจำนวนแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างและวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วน  $d/D = 1$

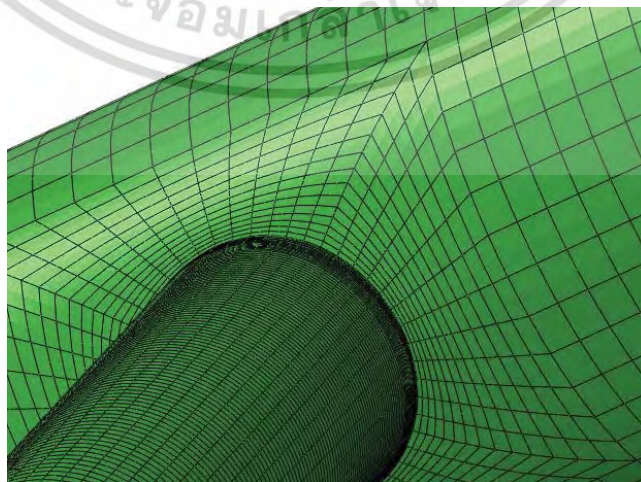
หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_b$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_l$				หาความยาวที่เหมาะสมของ $L_2$			
No. models	$L_l$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_l$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)	No. models	$L_l$ (xD)	$L_2$ (xD)	$L_b$ (xD)
1	10	10	3	9	3	10	4.5	19	5	5	4.5
2	10	10	3.5	10	3.5	10	4.5	20	5	5.5	4.5
3	10	10	4	11	4	10	4.5	21	5	6	4.5
4	10	10	4.5	12	4.5	10	4.5	22	5	6.5	4.5
5	10	10	5	13	5	10	4.5	23	5	7	4.5
6	10	10	5.5	14	5.5	10	4.5	24	5	7.5	4.5
7	10	10	6	15	6	10	4.5	25	5	8	4.5
8	10	10	6.5	16	6.5	10	4.5				
				17	7	10	4.5				
				18	7.5	10	4.5				

#### 4.4 ตัวประกอบยึดหยุน

70 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามแนวทางก่อนหน้านี้ เพื่อหาตัวประกอบยึดหยุนของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบด้วยสภาพจุดปลายที่จุดปลายข้างที่ติดกับ  $L_2$  ถูกรองรับแบบยึดแน่นและที่จุดปลายข้างที่ติดกับ  $L_1$  ถูกรองรับแบบธรรมดา โดยที่จุดปลายของท่อแยกถูกโมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบกระทำดังแสดงในรูปที่ 4.45 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาถูกสร้างขึ้นมาจากโครงตาข่ายละเอียดเพียงพอและวิเคราะห์จากทั้งหมดของปัญหา สำหรับช่วงของตัวแปรที่อยู่ในตารางที่ 4.20 โดยใช้ค่าความยาวของท่อหลักและท่อแยกจากที่ได้ในการดำเนินการหาความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสมก่อนหน้านี้ดังแสดงในตารางที่ 4.21 เพื่อหาค่าตัวประกอบยึดหยุน ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการที่ 20 ซึ่งค่าตัวประกอบยึดหยุนเหล่านี้จะถูกใช้เพื่อพัฒนาหาสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุนต่อไป



รูปที่ 4.45 แผนภาพของการต่อท่อแยกสำหรับหาค่าตัวประกอบยึดหยุน



รูปที่ 4.46 โครงข่ายจุดต่อบริเวณระยะการยุบตัวของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 แสดงช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต

Number of models	$t/T$	$D/T$	$d/D$
13(*)	0.1, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.1
14(**)	0.2, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.2
14(***)	0.333, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.333
14(****)	0.5, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.5
12	0.75, 1, 3	20, 60, 100, 150	0.75
3	1	20, 60, 100	1

(\*) ยกเว้น  $d/D = 0.1$  ด้วย  $D/T = 20$  และ  $t/T = 1$ .

(\*\*) ยกเว้น  $d/D = 0.2$  ด้วย  $D/T = 20$  และ  $t/T = 3$ .

(\*\*\*) ยกเว้น  $d/D = 0.333$  ด้วย  $D/T = 20$  และ  $t/T = 3$ .

(\*\*\*\*) ยกเว้น  $d/D = 0.5$  ด้วย  $D/T = 20$  และ  $t/T = 3$ .

ตารางที่ 4.21 แสดงความยาวท่อหลักและท่อแยกสำหรับการวิเคราะห์ตัวประกอบยึดหยุ่นด้วย FEA

$d/D$	$L_b$	$L_1$	$L_2$	Number of models
0.1	$4D$	$4.5D$	$6.5D$	23
0.2	$4.5D$	$5D$	$7D$	25
0.333	$5D$	$6.5D$	$7.5D$	29
0.5	$5.5D$	$7.5D$	$8.5D$	32
0.75	$7D$	$8.5D$	$10D$	26
1	$8.5D$	$11.5D$	$11.5D$	34

#### 4.5 สมการความสัมพันธ์

เพื่อความสะดวกในการนำค่าตัวประกอบยึดหยุ่นไปใช้งาน การพัฒนาหาสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นได้ถูกดำเนินการต่อมาด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นในชุดโปรแกรม **R** [13] โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.22 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินการหาตัวประกอบยึดหยุ่นก่อนหน้านี้

ตารางที่ 4.22 ตัวประกอบยึดหยุ่น  $K_i$  และ  $K_o$  ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA)

Model	$d/D$	$D/T$	$t/T$	$K_i$	$K_o$
1	0.1	20	0.1	0.426	0.534
2	0.1	60	0.1	1.744	2.902
3	0.1	60	1	6.405	13.540
4	0.1	60	3	11.265	28.647
5	0.1	100	0.1	3.501	6.889
6	0.1	100	1	12.917	33.147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 (ต่อ)

Model	$d/D$	$D/T$	$t/T$	$K_i$	$K_o$
7	0.1	100	3	24.196	72.886
8	0.1	150	0.1	5.885	13.532
9	0.1	150	1	21.580	65.590
10	0.1	150	3	43.146	151.692
11	0.1	250	0.1	10.688	30.870
12	0.1	250	1	39.131	149.609
13	0.1	250	3	84.248	368.145
14	0.2	20	0.2	1.160	1.928
15	0.2	20	1	2.339	4.541
16	0.2	60	0.2	4.299	11.681
17	0.2	60	1	9.200	30.438
18	0.2	60	3	16.762	65.263
19	0.2	100	0.2	7.349	26.094
20	0.2	100	1	15.946	70.166
21	0.2	100	3	31.728	163.193
22	0.2	150	0.2	10.837	48.031
23	0.2	150	1	23.888	132.644
24	0.2	150	3	50.252	325.352
25	0.2	250	0.2	17.044	100.331
26	0.2	250	1	38.513	287.021
27	0.2	250	3	85.140	740.211
28	0.333	20	0.333	1.921	4.369
29	0.333	20	1	3.020	7.504
30	0.333	60	0.333	5.704	24.230
31	0.333	60	1	9.460	45.836
32	0.333	60	3	18.257	102.388
33	0.333	100	0.333	8.938	52.023
34	0.333	100	1	15.094	103.099
35	0.333	100	3	31.238	249.417
36	0.333	150	0.333	12.504	93.900
37	0.333	150	1	21.387	192.784
38	0.333	150	3	46.001	488.726
39	0.333	250	0.333	18.678	191.077
40	0.333	250	1	32.423	406.826
41	0.333	250	3	71.991	1074.769

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 (ต่อ)

Model	$d/D$	$D/T$	$t/T$	$K_i$	$K_o$
42	0.5	20	0.5	2.377	6.665
43	0.5	20	1	3.213	9.337
44	0.5	60	0.5	6.161	34.951
45	0.5	60	1	8.670	53.336
46	0.5	60	3	17.258	121.653
47	0.5	100	0.5	9.250	74.582
48	0.5	100	1	13.148	117.942
49	0.5	100	3	27.641	290.293
50	0.5	150	0.5	12.550	134.434
51	0.5	150	1	17.985	218.777
52	0.5	150	3	38.862	562.191
53	0.5	250	0.5	18.072	269.614
54	0.5	250	1	25.994	449.302
55	0.5	250	3	57.284	1197.779
56	0.75	20	0.75	2.814	7.520
57	0.75	20	1	3.215	8.700
58	0.75	20	3	5.083	13.823
59	0.75	60	0.75	6.413	36.867
60	0.75	60	1	7.470	44.500
61	0.75	60	3	14.459	99.626
62	0.75	100	0.75	9.083	76.944
63	0.75	100	1	10.617	94.314
64	0.75	100	3	21.611	229.660
65	0.75	150	0.75	11.799	133.158
66	0.75	150	1	13.814	164.916
67	0.75	150	3	28.773	419.761
68	1	20	1	4.156	6.418
69	1	60	1	11.137	24.590
70	1	100	1	16.571	40.780

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

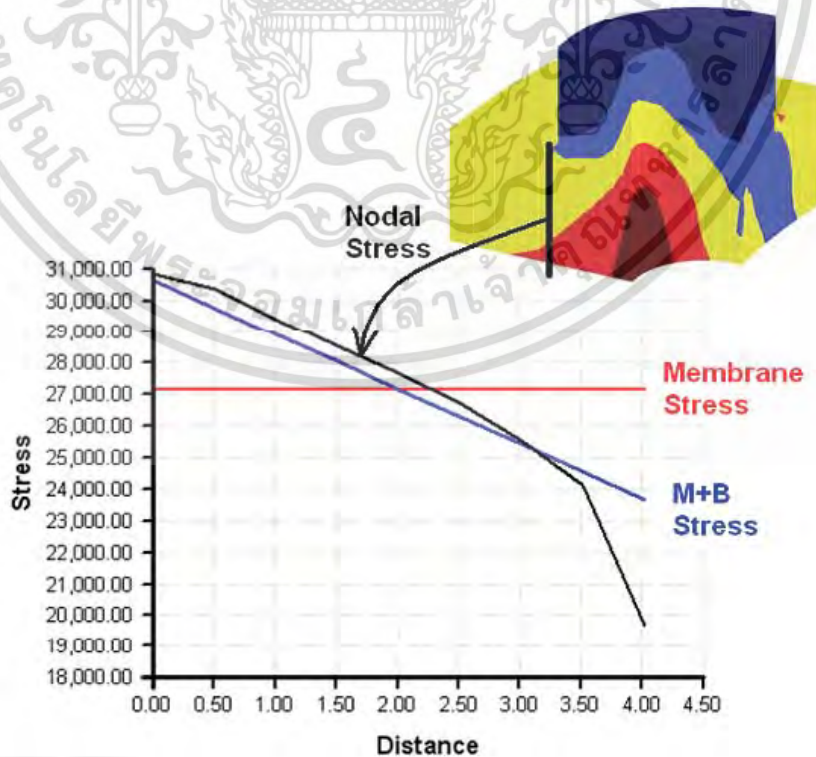
## ผลการวิจัย

### 5.1 บทนำ

ในบทนี้ นำเสนอผลการวิจัย 5 ส่วน ได้แก่ 1) ผลของการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง 2) ผลของการศึกษาเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อย (Submodeling) 3) ผลของการหาความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม 4) ผลของการหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่น 5) ผลของการหาสมการความสัมพันธ์

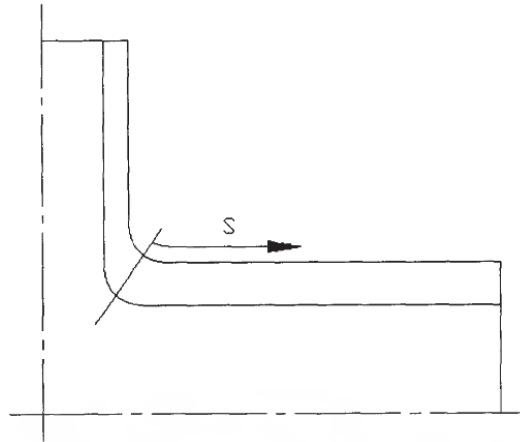
### 5.2 ผลของการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง

จากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง ความเค้นตามแนวยาว (Longitudinal stress) ความเค้นตามแนวขวาง (Transverse stress) และความเค้นหลักมากที่สุด (Maximum principal stress) ของการต่อท่อแยกเนื่องจากโมเมนต์ตัดในระนาบและโมเมนต์ตัดนอกระนาบจากภายนอก ซึ่งค่าความเค้นที่ได้มาจากการใช้วิธีการประมาณความเค้นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นผลบวกของ Membrin stress + Bending stress ที่อยู่ตามแนวเส้นระดับความเค้น ซึ่งรูปที่ 5.1 ได้แสดงตัวอย่างขององค์ประกอบของความเค้นเชิงเส้นที่แยกออกมาเป็น Membrin stress และ Bending stress จากการกระจายตัวของความเค้นตลอดความหนาผนังของท่อหลักและท่อแยกจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างขององค์ประกอบความเค้นเชิงเส้น [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

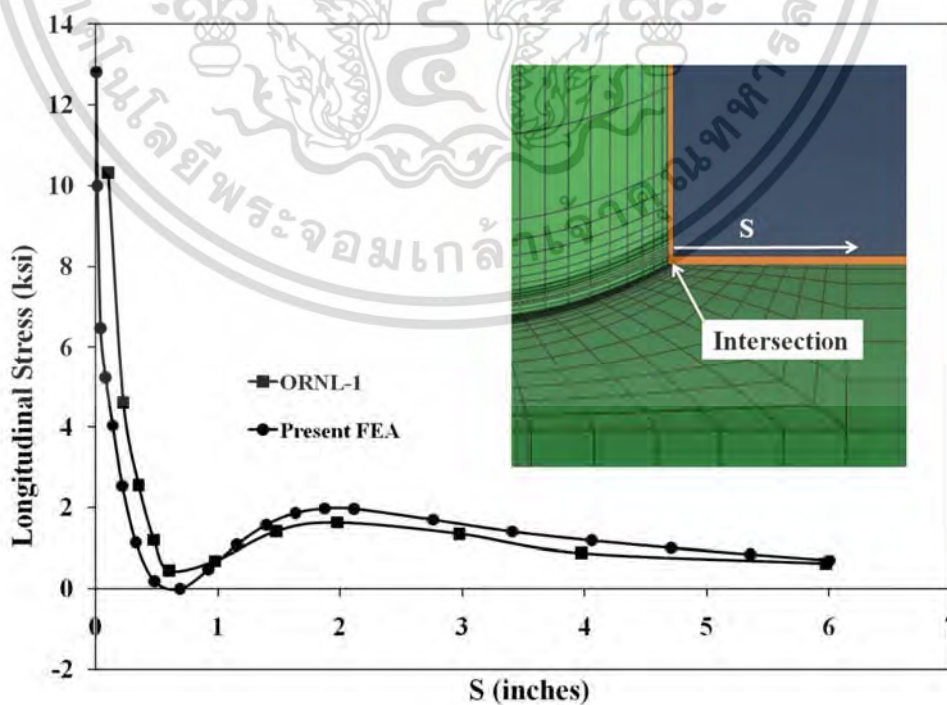


รูปที่ 5.2 นิยามของระยะทาง  $S$  [15]

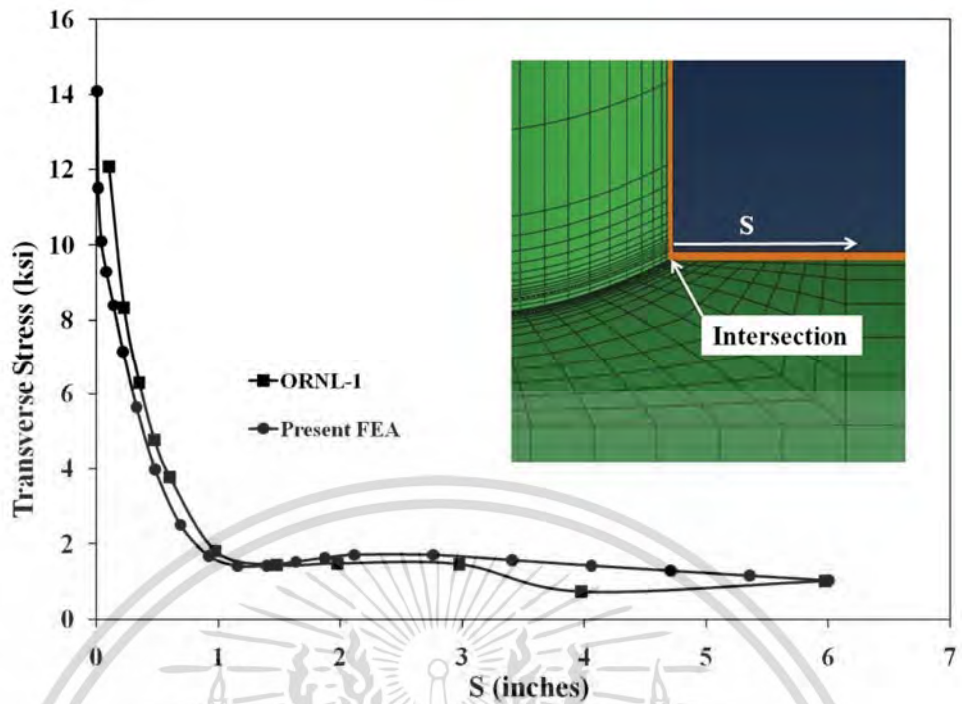
รูปที่ 5.2 แสดงระยะทางจากจุดยอด  $S$  ซึ่งมีจุดเริ่มต้นที่จุดตัดกันของท่อหลักและท่อแยก ความเค้นตามแนวได้ถูกนำมาจากความเค้นในทิศทางของ  $S$  ในขณะที่ความเค้นตามแนวขวางคือความเค้นที่ตั้งฉากกับความเค้นตามแนวยาว

### 5.2.1 การประเมินตัดในระนาบ

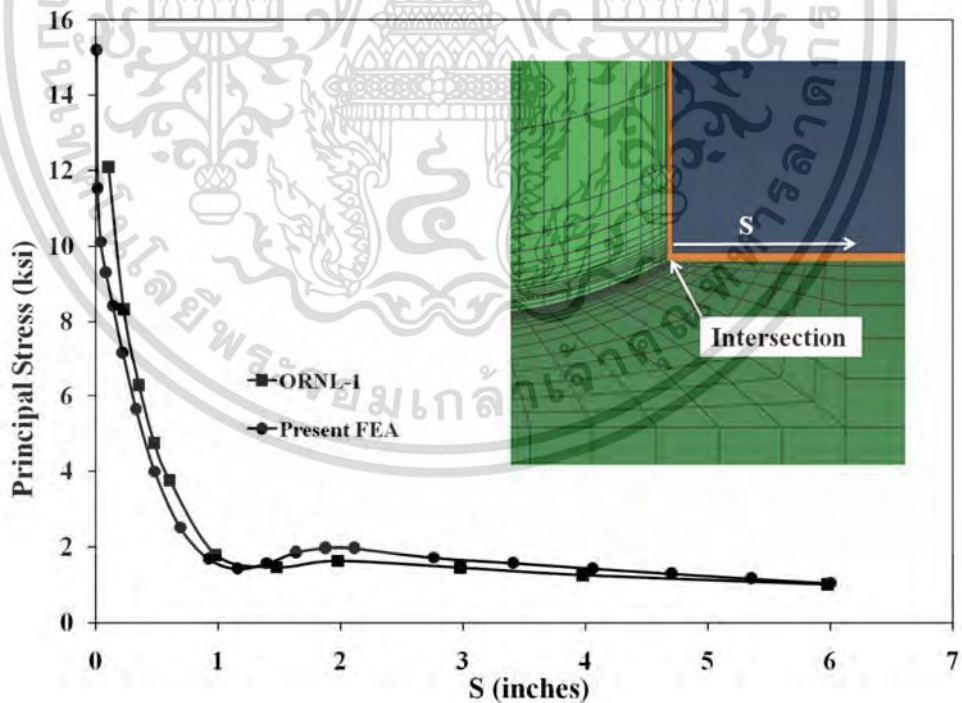
รูปที่ 5.3-5.8 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นที่ได้จากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการวิจัยนี้กับข้อมูลของผลการทดลอง ORNL-1 [27] ของความเค้นตามแนวยาวและความเค้นตามแนวขวางรวมทั้งความเค้นหลักมากที่สุดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกในระนาบตามแนวยาวของท่อหลักและท่อแยกที่อยู่ภายใต้การประเมินตัดในระนาบด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick



รูปที่ 5.3 การกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาวในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

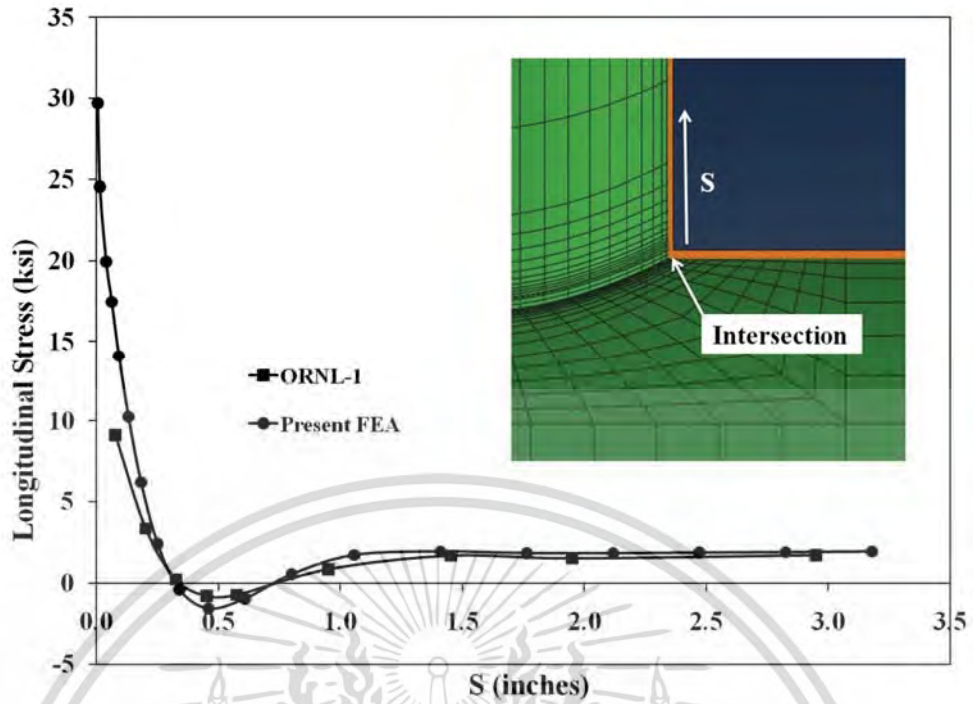


รูปที่ 5.4 การกระจายตัวของความเค้นตามแนวขวางในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก

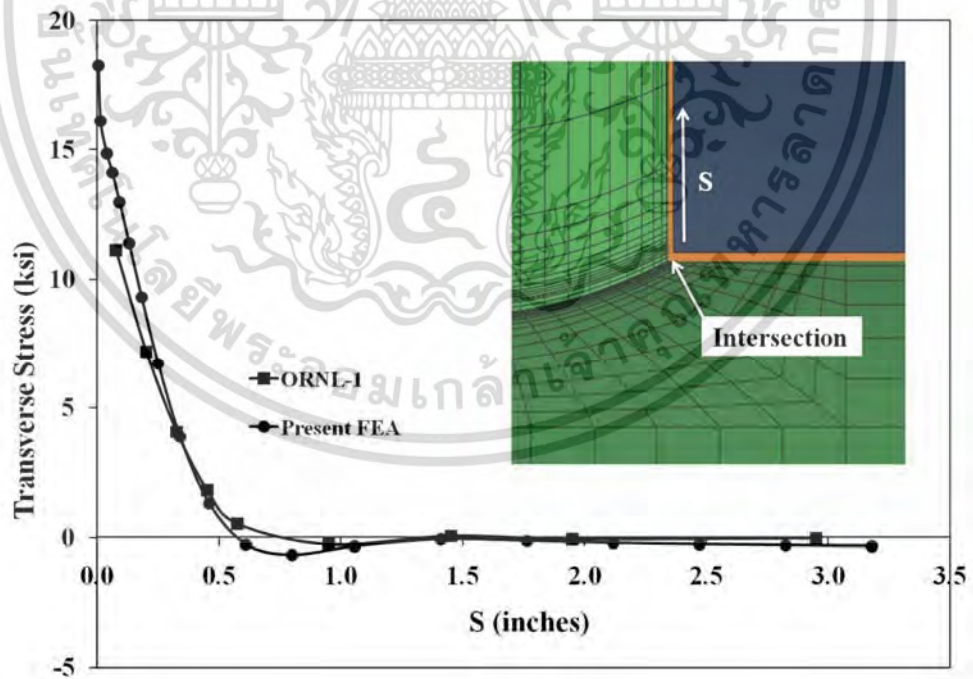


รูปที่ 5.5 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

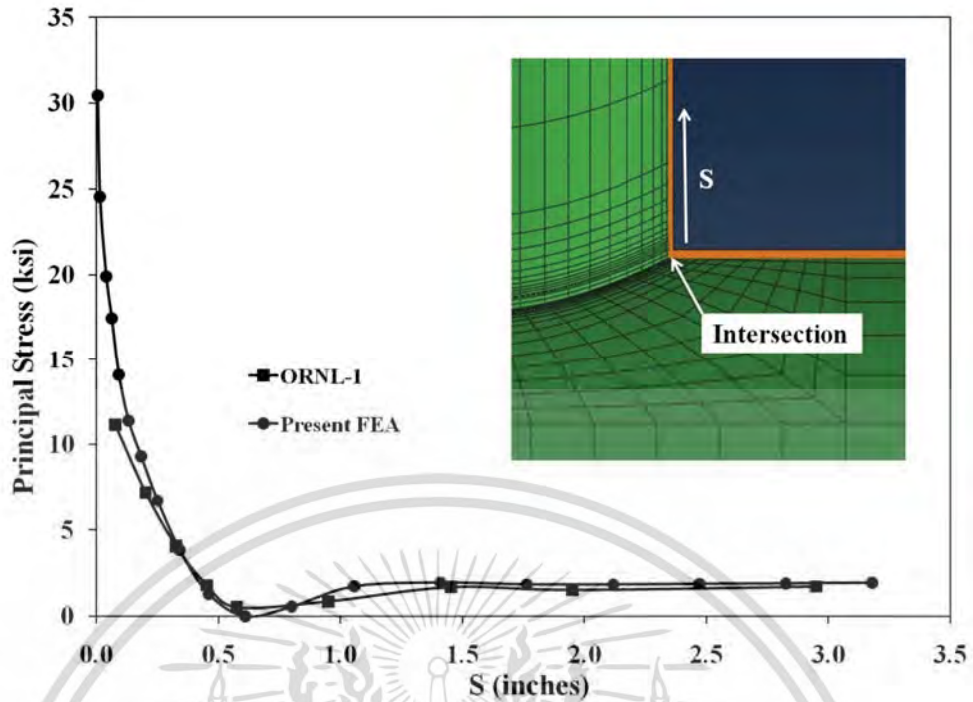


รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาวในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก



รูปที่ 5.7 การกระจายตัวของความเค้นตามแนวขวางในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก

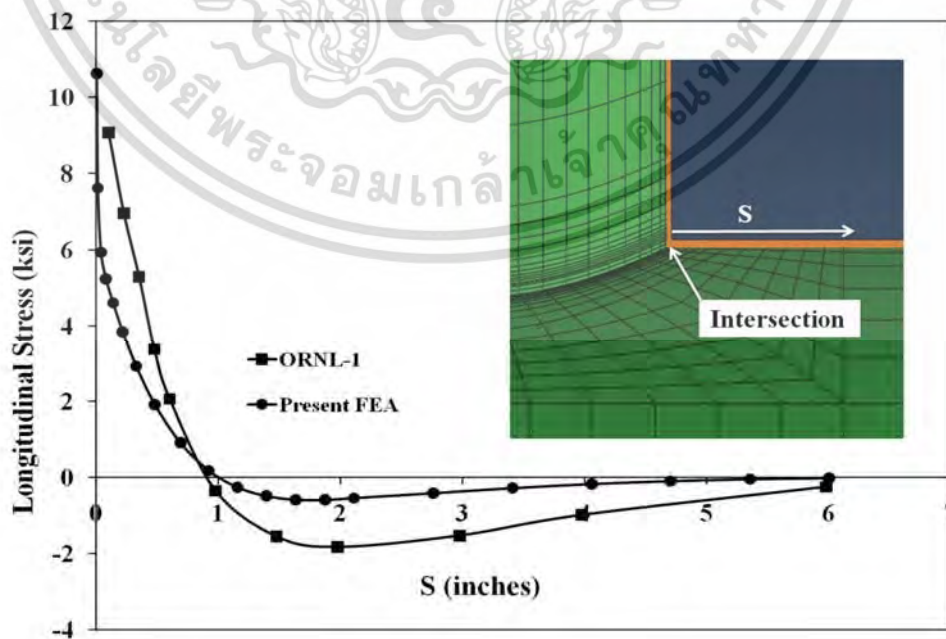
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 การกระจายตัวของความเค้นเค้นหลักสูงสุดในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก

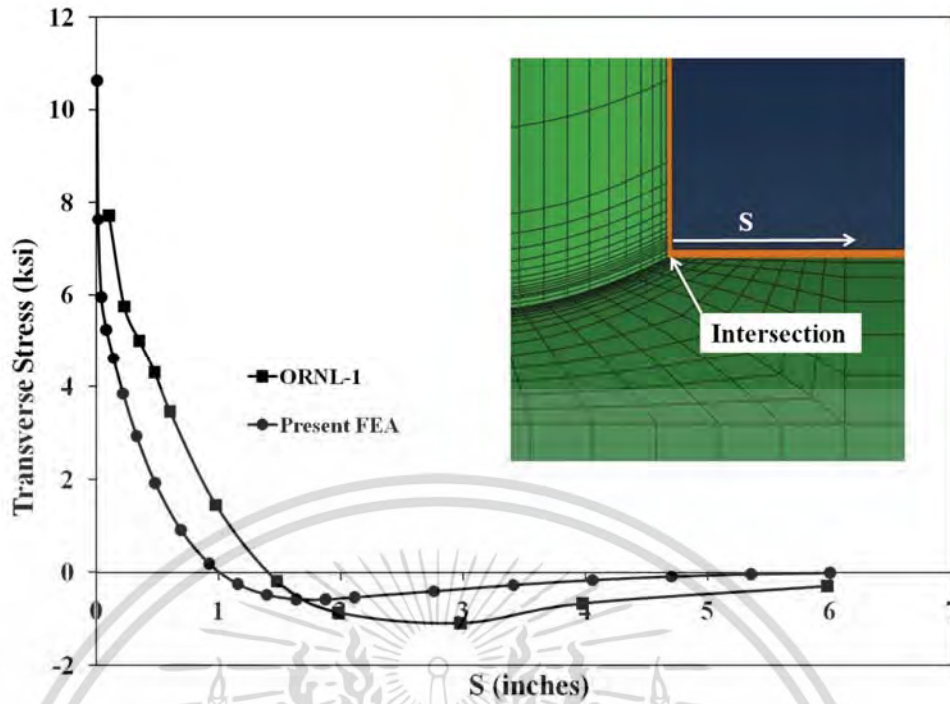
### 5.2.2 การประเมินตัดต้นอกระนาบ

รูปที่ 5.9-5.14 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นที่ได้จากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการวิจัยนี้กับข้อมูลของผลการทดลอง ORNL-1 [27] ของความเค้นตามแนวยาวและความเค้นตามแนวขวางรวมทั้งความเค้นหลักมากที่สุดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกในระนาบตามแนวยาวของท่อหลักและท่อแยกที่อยู่ภายใต้การประเมินตัดต้นอกระนาบด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick

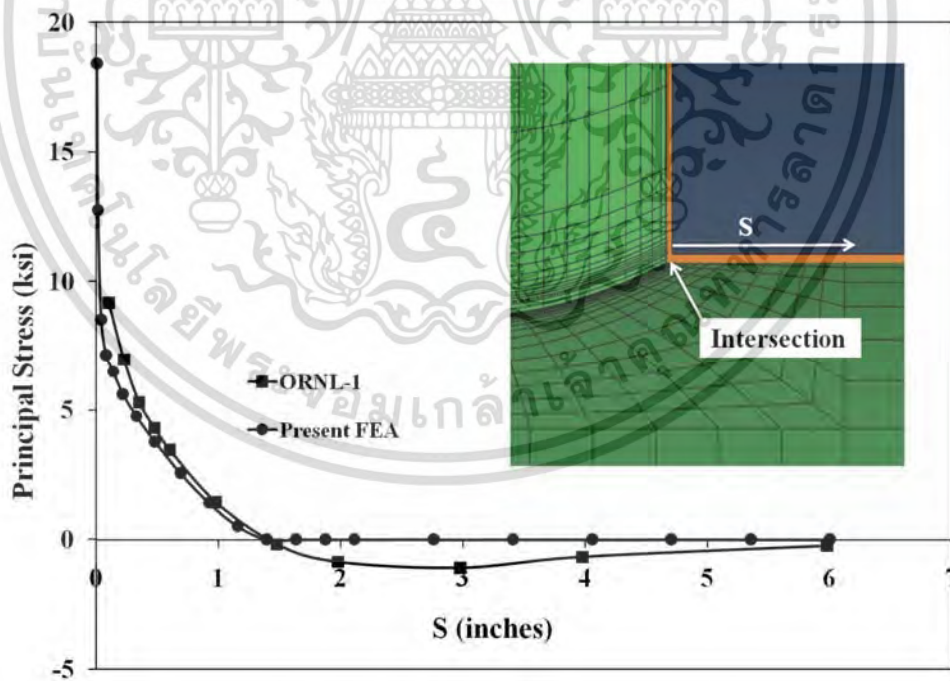


รูปที่ 5.9 การกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาวในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

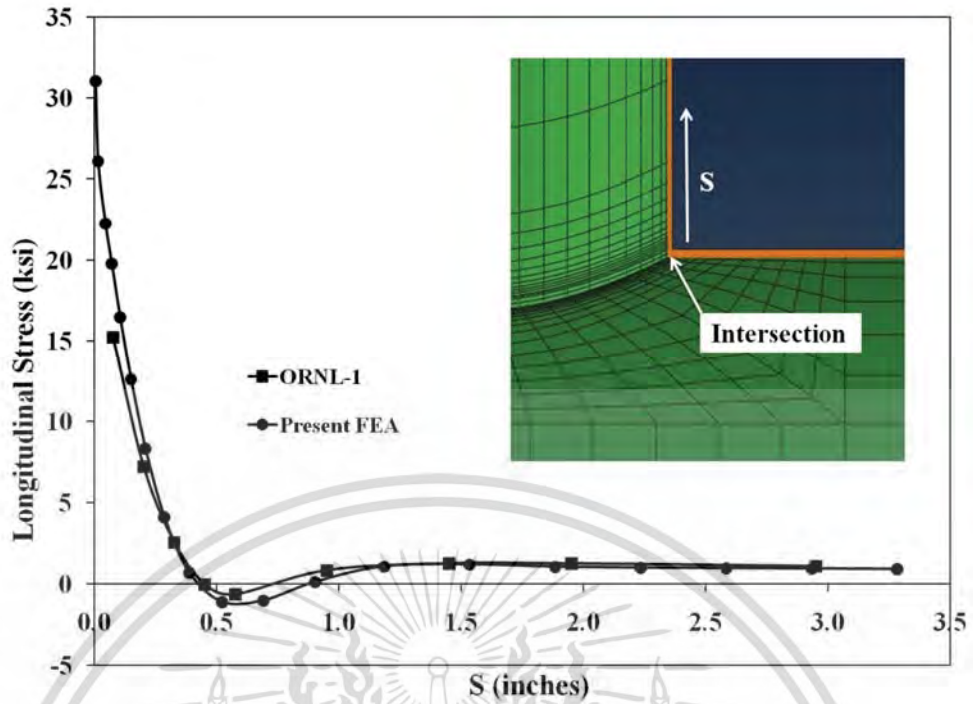


รูปที่ 5.10 การกระจายตัวของความเค้นตามแนวขวางในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก

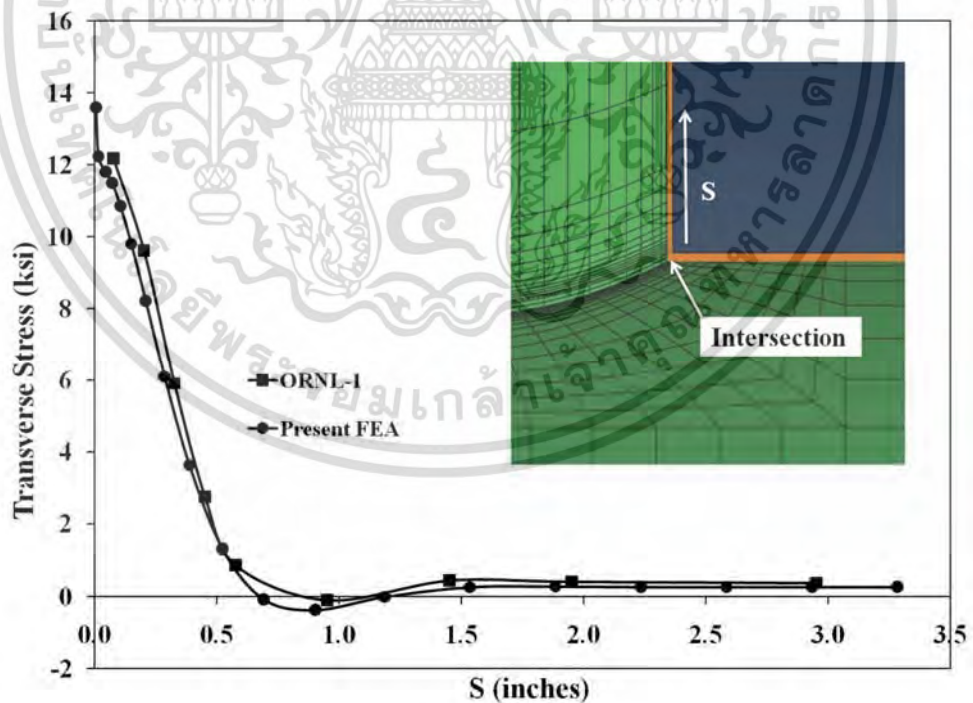


รูปที่ 5.11 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

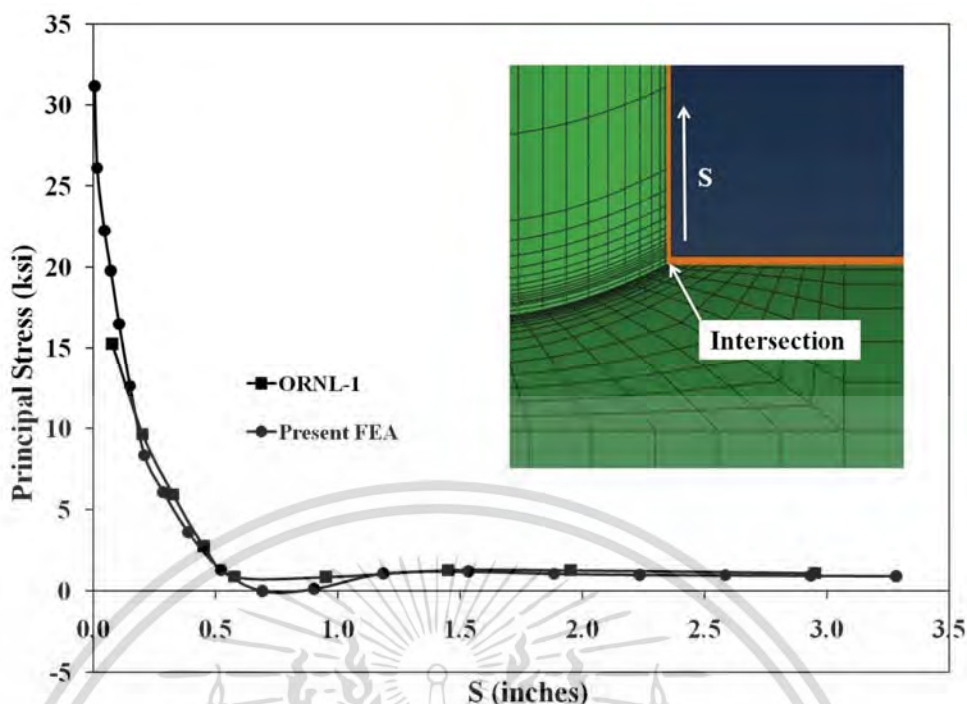


รูปที่ 5.12 การกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาวในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก



รูปที่ 5.13 การกระจายตัวของความเค้นตามแนวขวางในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



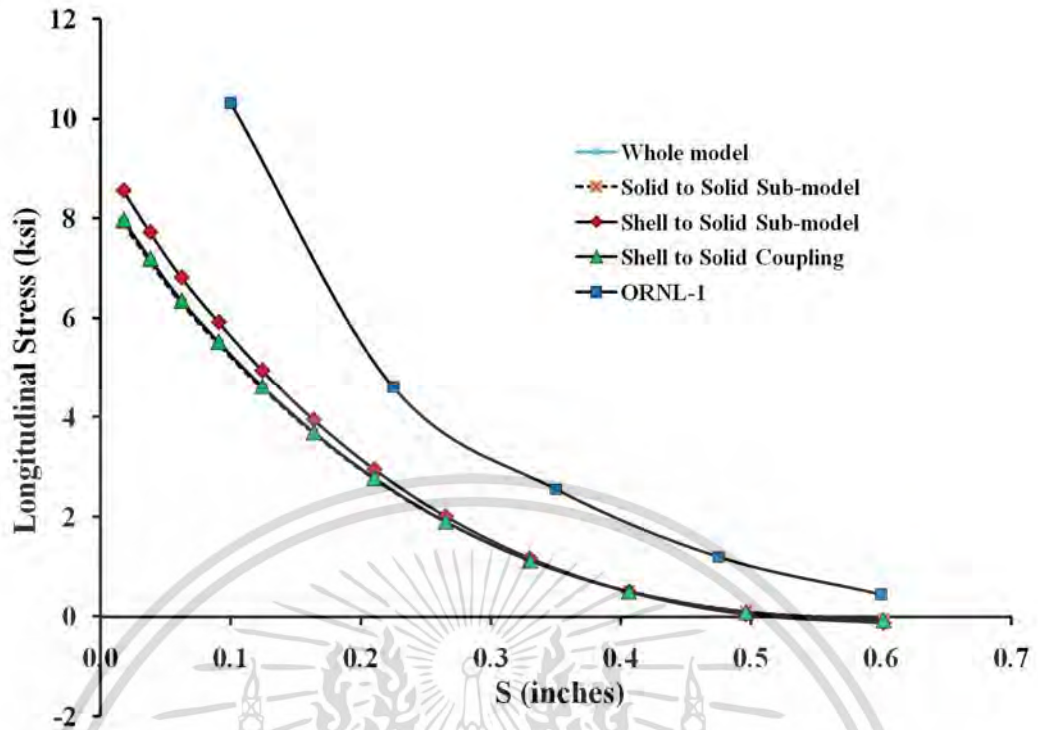
รูปที่ 5.14 การกระจายตัวของความเค้นเค้นหลักสูงสุดในระนาบตามแนวยาวของท่อแยก

จากผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความเค้นตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.3-5.14 พบว่าการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวด้านนอกตามแนวยาวของท่อหลักและท่อแยกกับข้อมูลผลการทดลองได้แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี ตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบสามารถหาได้ด้วยการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสม จากนั้นสมการความสัมพันธ์สามารถพัฒนาขึ้นได้โดยใช้ค่าตัวประกอบเหล่านั้น

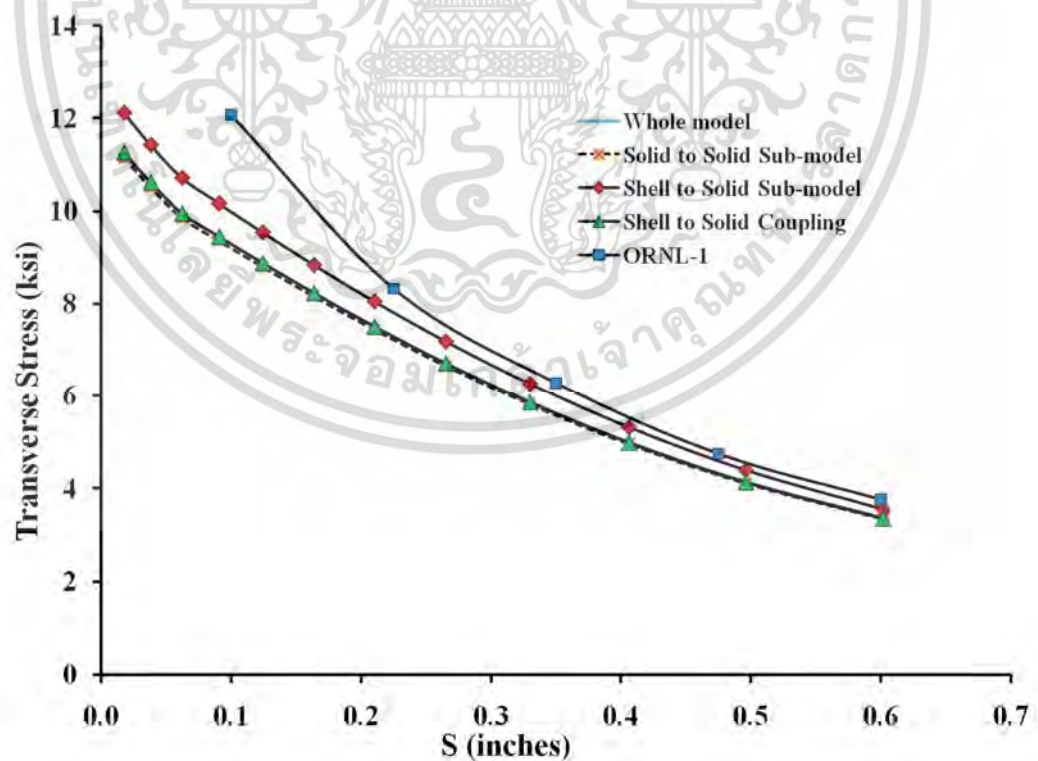
### 5.3 ผลของการศึกษาเทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อย

จากการศึกษาการใช้เทคนิคการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองย่อยมาวิเคราะห์ความเค้นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบ เพื่อที่จะศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำและเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยพิจารณาความเค้นเชิงเส้นจากการกระจายตัวของความเค้นตลอดความหนาผนังจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 5.15-5.17 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นที่ได้จากแต่ละเทคนิคด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของความเค้นตามแนวยาวและความเค้นตามแนวขวางรวมทั้งความเค้นหลักมากที่สุดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกในระนาบตามแนวยาวของท่อหลักและท่อแยกที่อยู่ภายใต้ภาระโมเมนต์ดัดในระนาบด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ชนิด 20-nodes isoparametric brick โดยใช้ข้อมูลของผลการทดลอง ORNL-1 [27] เป็นค่าอ้างอิงและรูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบเวลารวมที่ใช้ในการประมวลผลของแต่ละเทคนิค

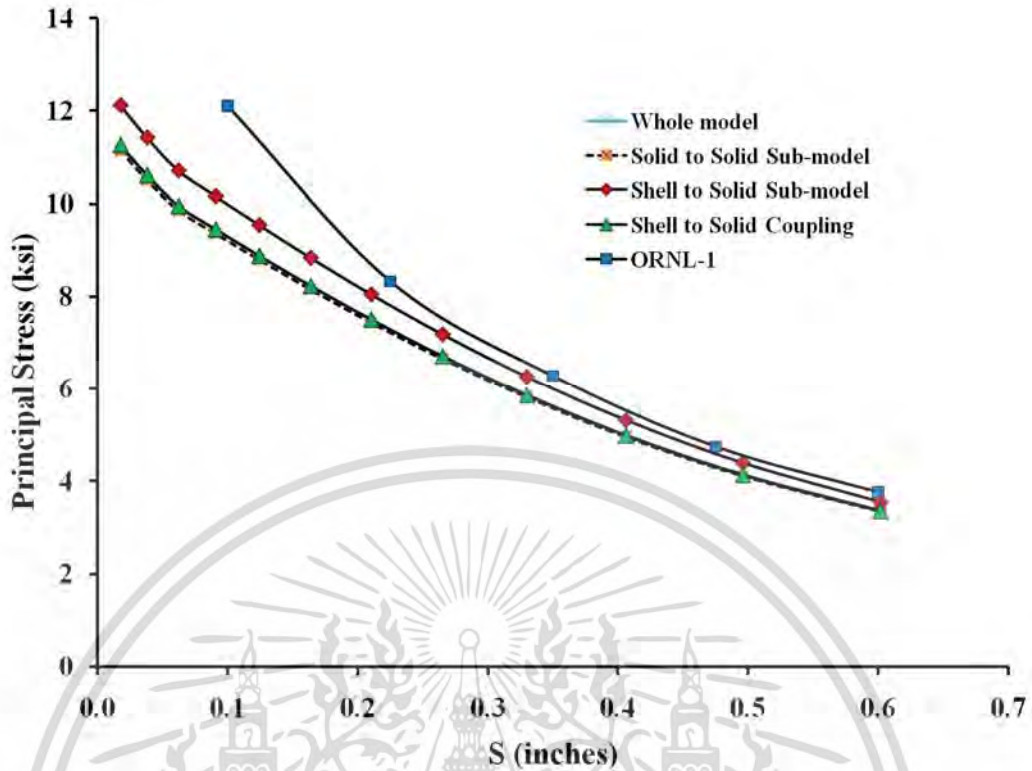


รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาวในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก

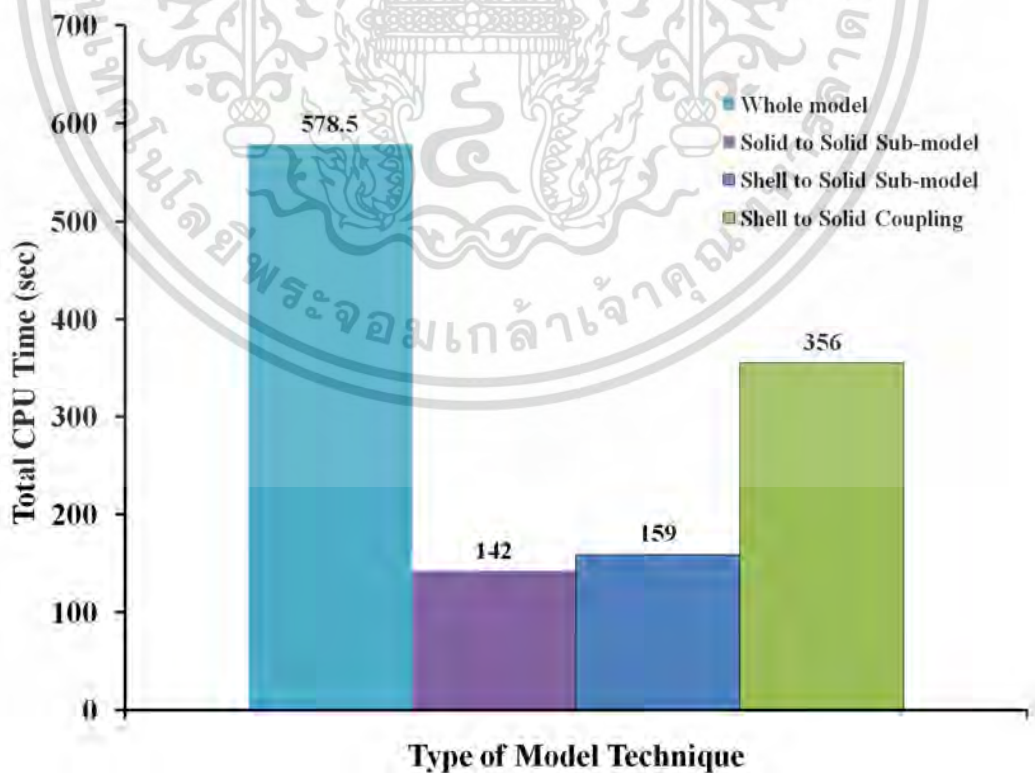


รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นตามแนวขวางในระนาบตามแนวยาวของท่อหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดในระยะตามแนวยาวของท่อหลัก



รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบเวลารวมที่ใช้ในการประมวลผลของแต่ละเทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

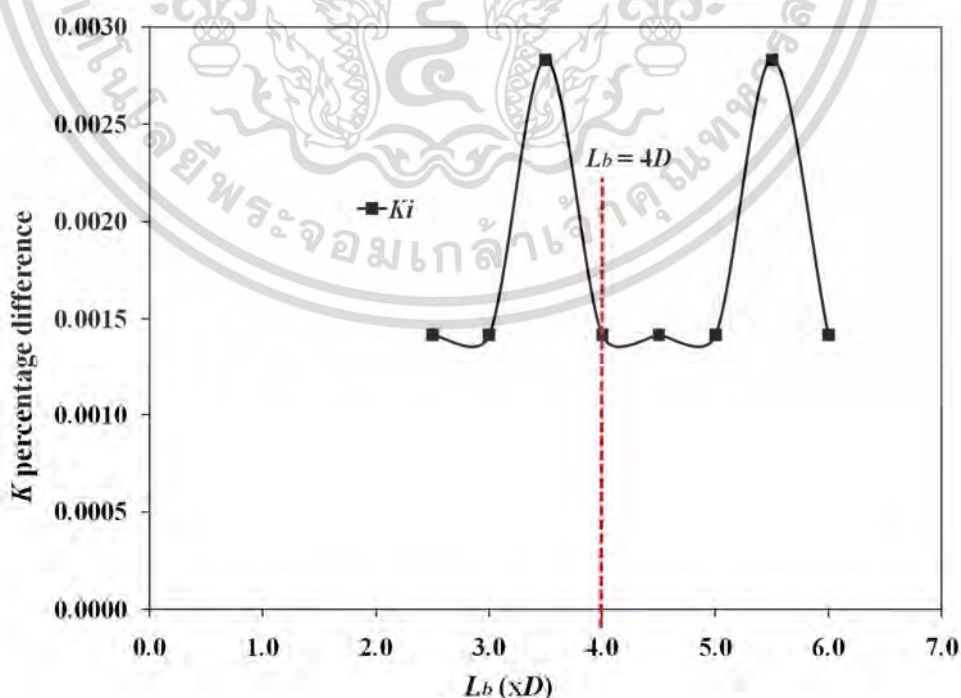
จากกราฟในรูปที่ 5.15-5.17 เห็นได้ว่าการใช้เทคนิค Shell to Solid Submodel นั้นจะให้ค่าความเค้นเชิงเส้นเข้าใกล้ข้อมูลผลการทดลองมากกว่าวิธีอื่นและรูปที่ 5.18 ก็แสดงให้เห็นถึงเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของเทคนิค Shell to Solid Submodel นั้นน้อยสุดรองลงมาคือเทคนิค Shell to Solid Submodel

#### 5.4 ผลของการหาความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลกระทบของความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่มีผลต่อตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบด้วยสภาพจุดปลายที่จุดปลายยึดแน่น-ธรรมชาติและจุดปลายของท่อแยกถูกโมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบกระทำด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาที่ถูกสร้างขึ้นมาด้วยโครงตาข่ายละเอียดเพียงพอและวิเคราะห์จากทั้งหมดของปัญหา เพื่อหาความยาวของทั้งท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม โดยพิจารณาการลู่เข้าของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบ ซึ่งได้อธิบายวิธีการหาความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสมไว้ก่อนหน้านี้ในข้อที่ 4.3.1-4.3.3 และค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบที่ได้จากสมการที่ 3.10 ผลลัพธ์ของความยาวของท่อหลักและท่อแยกทั้งหมดได้แสดงในรูปด้านล่างนี้และตารางที่ 5.1 แสดงผลลัพธ์ของความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่ได้มาทั้งหมด

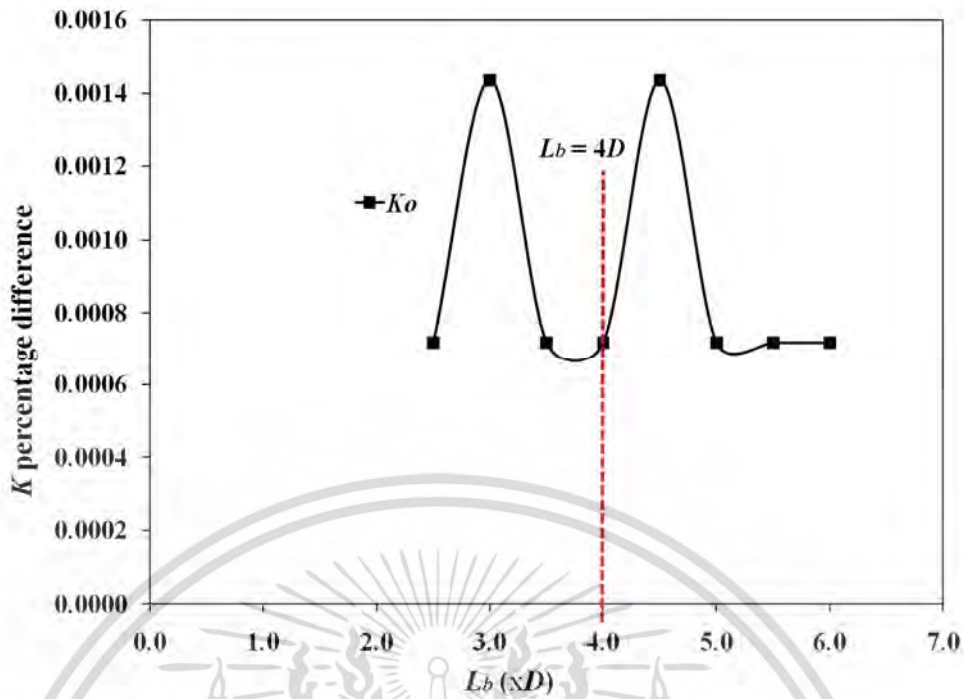
##### 5.4.1 ความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสมที่อัตราส่วน $d/D = 0.1$

ผลลัพธ์ของความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสมที่อัตราส่วน  $d/D = 0.1$  ได้แสดงในรูปที่ 5.19-5.21

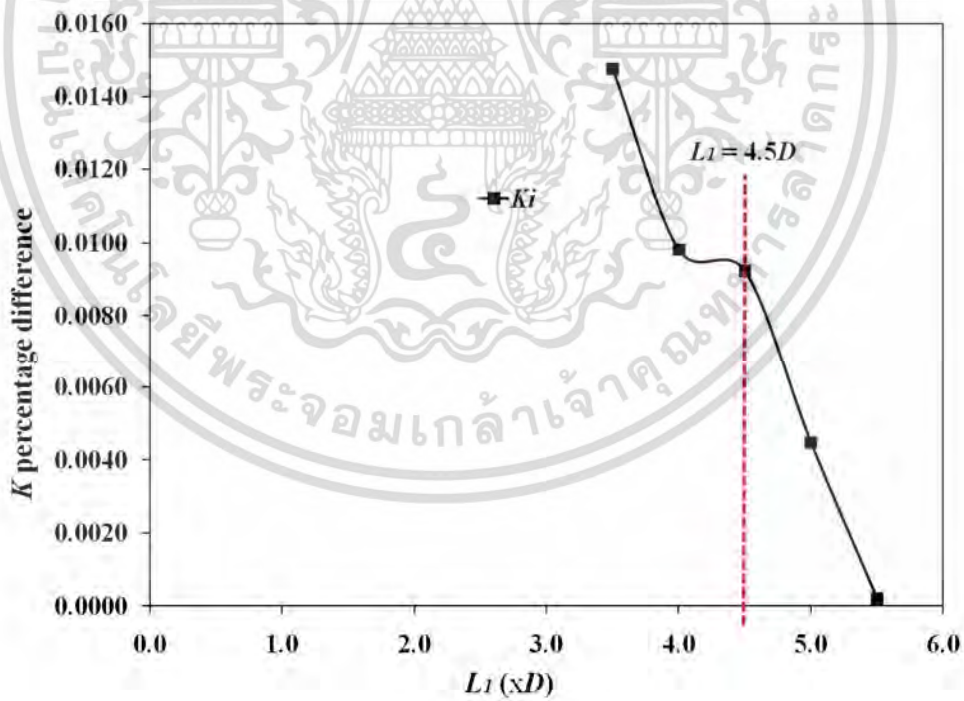


รูปที่ 5.19 อิทธิพลของความยาว  $L_b$  ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น  $K_i$  ที่  $d/D = 0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ในสื่ออื่น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

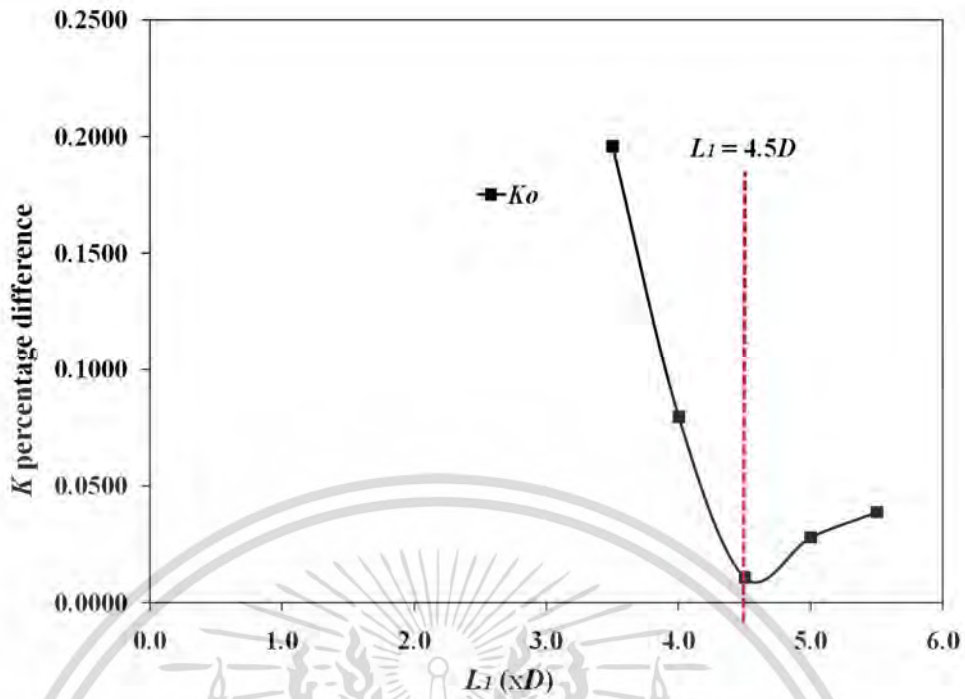


รูปที่ 5.20 อิทธิพลของความยาว  $L_b$  ต่อตัวประกอบยืดหยุ่น  $K_o$  ที่  $d/D = 0.1$

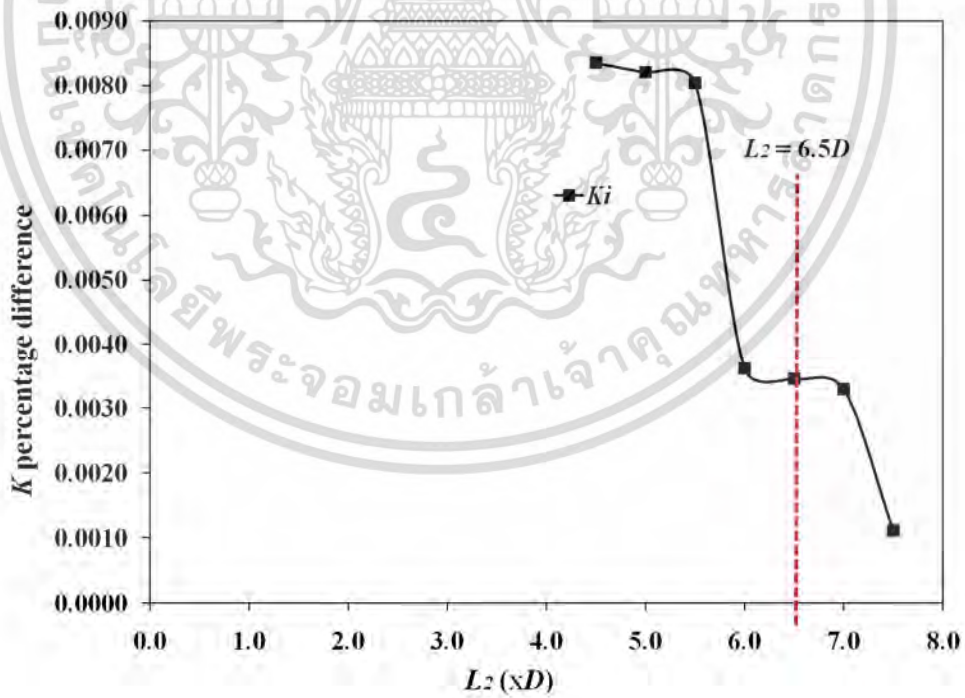


รูปที่ 5.21 อิทธิพลของความยาว  $L_1$  ต่อตัวประกอบยืดหยุ่น  $K_i$  ที่  $d/D = 0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

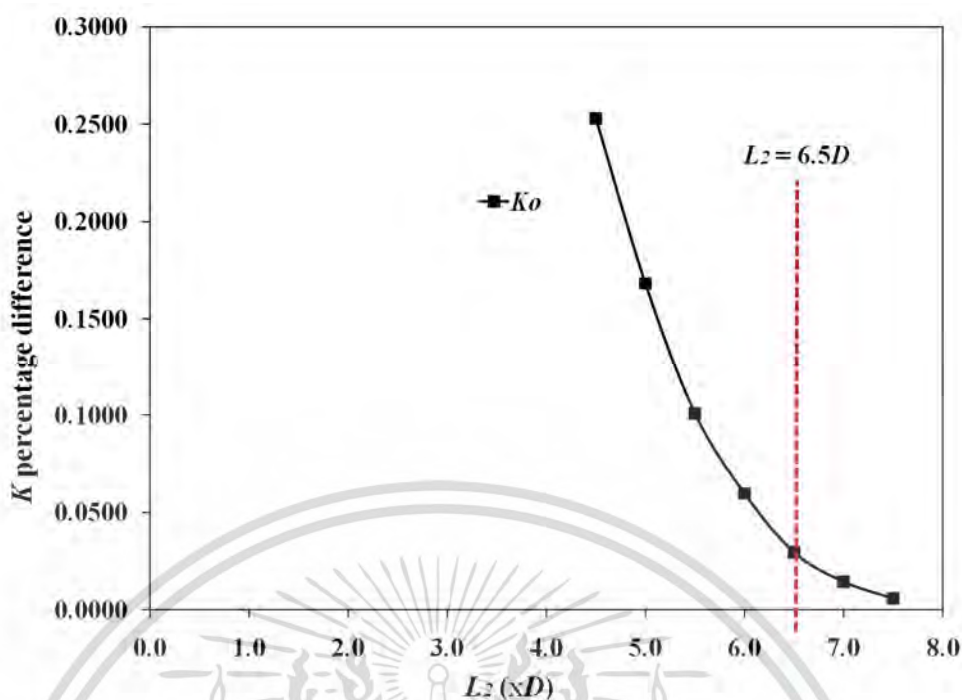


รูปที่ 5.22 อิทธิพลของความยาว  $L_1$  ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น  $K_o$  ที่  $d/D = 0.1$



รูปที่ 5.23 อิทธิพลของความยาว  $L_2$  ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น  $K_i$  ที่  $d/D = 0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 อิทธิพลของความยาว  $L_2$  ต่อตัวประกอบยึดหยุน  $K_o$  ที่  $d/D = 0.1$

ตารางที่ 5.1 แสดงความยาวท่อหลักและท่อแยกสำหรับการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบยึดหยุนด้วย FEA

$d/D$	$L_b$	$L_1$	$L_2$	Number of models
0.1	$4D$	$4.5D$	$6.5D$	23
0.2	$4.5D$	$5D$	$7D$	25
0.333	$5D$	$6.5D$	$7.5D$	29
0.5	$5.5D$	$7.5D$	$8.5D$	32
0.75	$7D$	$8.5D$	$10D$	26
1	$8.5D$	$11.5D$	$11.5D$	34

ผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้เหล่านี้ได้ถูกใช้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าตัวประกอบยึดหยุน

## 5.5 ผลของการหาค่าตัวประกอบยึดหยุน

จากการศึกษาเพื่อหาต่อตัวประกอบยึดหยุนของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบด้วยสภาพจุดปลายที่จุดปลายถูกยึดแน่น-ธรรมดาและจุดปลายของท่อแยกถูกโมเมนต์ดัดในระนาบและโมเมนต์ดัดนอกระนาบกระทำด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาที่ถูกสร้างขึ้นมาด้วยโครงตาข่ายละเอียดเพียงพอและวิเคราะห์จากทั้งหมดของปัญหา ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการที่ 3.10 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวประกอบยึดหย่อนเหล่านี้จะได้นำมาใช้เพื่อพัฒนาหาสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหย่อนต่อไป

ตารางที่ 5.2 ตัวประกอบยึดหย่อน  $K_i$  และ  $K_o$  ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA)

Model	$d/D$	$D/T$	$t/T$	$K_i$	$K_o$
1	0.1	20	0.1	0.426	0.534
2	0.1	60	0.1	1.744	2.902
3	0.1	60	1	6.405	13.540
4	0.1	60	3	11.265	28.647
5	0.1	100	0.1	3.501	6.889
6	0.1	100	1	12.917	33.147
7	0.1	100	3	24.196	72.886
8	0.1	150	0.1	5.885	13.532
9	0.1	150	1	21.580	65.590
10	0.1	150	3	43.146	151.692
11	0.1	250	0.1	10.688	30.870
12	0.1	250	1	39.131	149.609
13	0.1	250	3	84.248	368.145
14	0.2	20	0.2	1.160	1.928
15	0.2	20	1	2.339	4.541
16	0.2	60	0.2	4.299	11.681
17	0.2	60	1	9.200	30.438
18	0.2	60	3	16.762	65.263
19	0.2	100	0.2	7.349	26.094
20	0.2	100	1	15.946	70.166
21	0.2	100	3	31.728	163.193
22	0.2	150	0.2	10.837	48.031
23	0.2	150	1	23.888	132.644
24	0.2	150	3	50.252	325.352
25	0.2	250	0.2	17.044	100.331
26	0.2	250	1	38.513	287.021
27	0.2	250	3	85.140	740.211
28	0.333	20	0.333	1.921	4.369
29	0.333	20	1	3.020	7.504
30	0.333	60	0.333	5.704	24.230
31	0.333	60	1	9.460	45.836
32	0.333	60	3	18.257	102.388

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

Model	$d/D$	$D/T$	$t/T$	$K_i$	$K_o$
33	0.333	100	0.333	8.938	52.023
34	0.333	100	1	15.094	103.099
35	0.333	100	3	31.238	249.417
36	0.333	150	0.333	12.504	93.900
37	0.333	150	1	21.387	192.784
38	0.333	150	3	46.001	488.726
39	0.333	250	0.333	18.678	191.077
40	0.333	250	1	32.423	406.826
41	0.333	250	3	71.991	1074.769
42	0.5	20	0.5	2.377	6.665
43	0.5	20	1	3.213	9.337
44	0.5	60	0.5	6.161	34.951
45	0.5	60	1	8.670	53.336
46	0.5	60	3	17.258	121.653
47	0.5	100	0.5	9.250	74.582
48	0.5	100	1	13.148	117.942
49	0.5	100	3	27.641	290.293
50	0.5	150	0.5	12.550	134.434
51	0.5	150	1	17.985	218.777
52	0.5	150	3	38.862	562.191
53	0.5	250	0.5	18.072	269.614
54	0.5	250	1	25.994	449.302
55	0.5	250	3	57.284	1197.779
56	0.75	20	0.75	2.814	7.520
57	0.75	20	1	3.215	8.700
58	0.75	20	3	5.083	13.823
59	0.75	60	0.75	6.413	36.867
60	0.75	60	1	7.470	44.500
61	0.75	60	3	14.459	99.626
62	0.75	100	0.75	9.083	76.944
63	0.75	100	1	10.617	94.314
64	0.75	100	3	21.611	229.660
65	0.75	150	0.75	11.799	133.158
66	0.75	150	1	13.814	164.916
67	0.75	150	3	28.773	419.761

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

Model	$d/D$	$D/T$	$t/T$	$K_i$	$K_o$
68	1	20	1	4.156	6.418
69	1	60	1	11.137	24.590
70	1	100	1	16.571	40.780

## 5.6 ผลของการหาสมการความสัมพันธ์

จากการศึกษาและพัฒนาหาสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นได้ถูกดำเนินการด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นในชุดโปรแกรม R [13] โดยใช้ข้อมูลจากรายการที่ 5.2 สมการความสัมพันธ์ที่ได้ถูกแสดงในสมการที่ 5.1 และ 5.2 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ตามช่วงของตัวแปรที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้

$$K_i = 0.753 \left(\frac{d}{D}\right)^{-0.575} \left(\frac{D}{T}\right)^{1.027} \left(\frac{t}{T}\right)^{0.644} \left[ 0.583 \left(\frac{d}{D}\right) - 1.221 \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 0.833 \left(\frac{d}{D}\right)^3 \right] \quad (5.1)$$

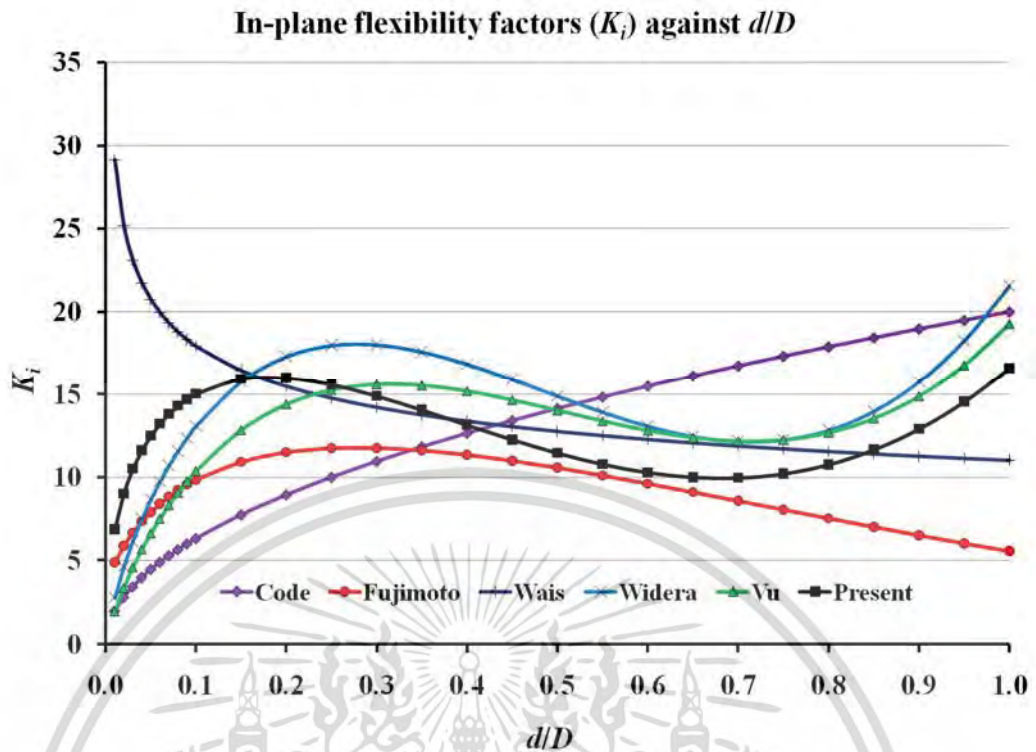
$$K_o = 0.906 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.285} \left(\frac{D}{T}\right)^{1.556} \left(\frac{t}{T}\right)^{0.835} \left[ 0.683 \left(\frac{d}{D}\right) - 1.128 \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 0.485 \left(\frac{d}{D}\right)^3 \right] \quad (5.2)$$

ค่าความผันผวนและค่าความแตกต่างมากที่สุดของ  $K_i$  และ  $K_o$  ระหว่าง FEA จากตารางที่ 5.2 กับสมการความสัมพันธ์ที่ 5.1 และ 5.2 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ซึ่งแสดงว่าสมการความสัมพันธ์สอดคล้องกับข้อมูลเป็นอย่างดี โดยมีค่าความผันผวนเข้าใกล้ 1

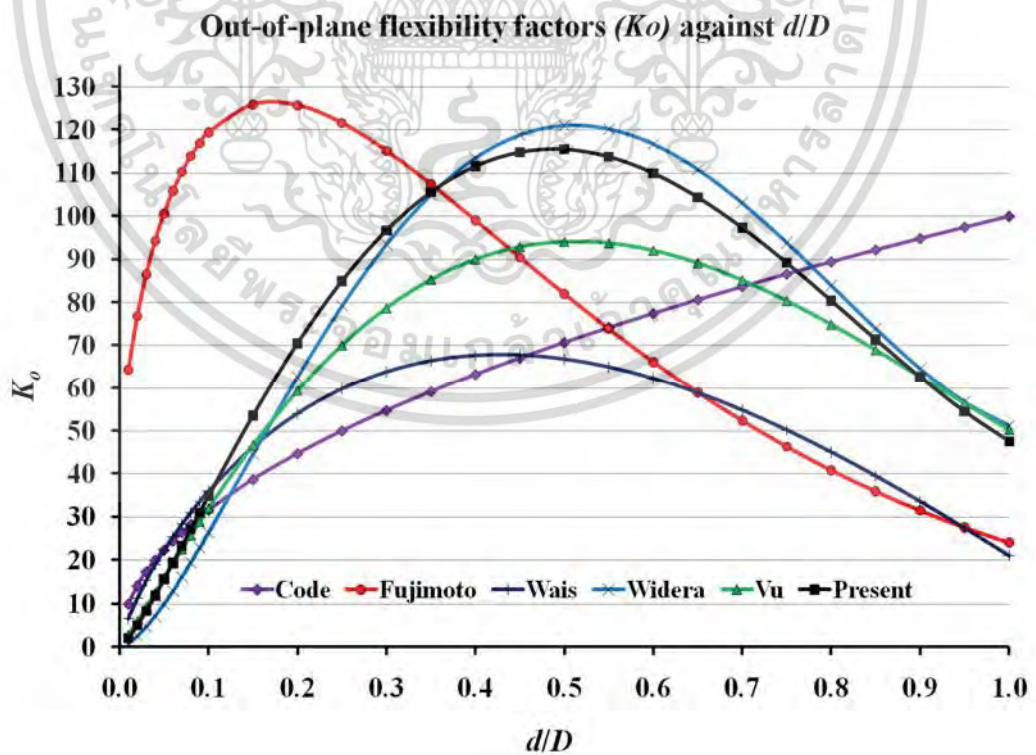
ตารางที่ 5.3 ความแตกต่างระหว่าง FEA กับสมการความสัมพันธ์

	Variance $R^2$	Average difference between FEA and correlation equation
$K_i$ (5.1)	98.50%	15.00%
$K_o$ (5.2)	99.80%	11.80%

รูปที่ 5.25 แสดงการเปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นในระนาบที่ได้จากสมการที่ 5.1 และรูปที่ 5.26 แสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบยึดหยุ่นนอกระนาบที่ได้จากสมการที่ 5.2 ของการศึกษานี้กับข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน [1, 11, 12, 13, 22, 26] ตามลำดับ



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบยึดหยุ่นในระนาบ ( $K_i$ ) กับอัตราส่วน  $d/D$  ที่ได้จากการศึกษานี้กับข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน [1, 11, 12, 13, 22, 26]



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบยึดหยุ่นนอกระนาบ ( $K_o$ ) กับอัตราส่วน  $d/D$  ที่ได้จากการศึกษานี้กับข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน [1, 11, 12, 13, 22, 26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและตัวประกอบยึดหย่อนด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบสำหรับสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

6.1.1 การกระจายตัวของความเค้นที่ได้จากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง กราฟได้แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับข้อมูลผลทดลองเป็นอย่างดี

6.1.2 ด้วยความแม่นยำของความเค้นตรงบริเวณรอยเชื่อมต่อของการต่อกันของท่อหลักและท่อแยกรวมทั้งเวลาที่ใช้ในการประมวลผลที่ค่อนข้างน้อย เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Shell to solid submodeling ให้ผลดีที่สุด

6.1.3 ความยาวของท่อหลักและท่อแยกส่งผลกระทบต่อตัวประกอบยึดหย่อน ดังนั้นความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม ควรดำเนินการวิเคราะห์หามาก่อนที่จะวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบยึดหย่อน

6.1.4 ตัวประกอบยึดหย่อนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน  $D/T$  และ  $t/T$

6.1.5 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วน  $d/D$ ,  $D/T$  และ  $t/T$  ต่อตัวประกอบยึดหย่อน พบว่าอัตราส่วน  $d/D$  มีอิทธิพลต่อตัวประกอบยึดหย่อนค่อนข้างน้อย

6.1.6 ตัวประกอบยึดหย่อนที่ได้จากตารางที่ 5.2 และสมการความสัมพันธ์ที่ 5.1 และ 5.2 สามารถนำไปใช้ประกอบการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนของระบบท่อ ที่มีการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงอยู่ในระบบท่อตามช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตในช่วง  $0.1 \leq d/D \leq 1$ ,  $20 \leq D/T \leq 250$  และ  $0.1 \leq t/T \leq 3$

6.1.7 ค่าตัวประกอบยึดหย่อนในระนาบที่ได้จากการศึกษานี้ (Fixed-simply) มีแนวโน้มที่มากกว่าของ Fujimoto [12] ซึ่งปลายของท่อหลักถูกยึดแบบ Fixed-fixed และน้อยกว่าของ Widera [1] ซึ่งปลายของท่อหลักถูกยึดแบบ Fixed-free เทียบกับอัตราส่วน  $d/D$

6.1.8 ตัวประกอบยึดหย่อนนอกระนาบที่ได้จากการศึกษานี้ (Fixed-simply) มีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับของ Fujimoto [12] ซึ่งปลายของท่อหลักถูกยึดแบบ Fixed-fixed และใกล้เคียงกับของ Widera [1] ซึ่งปลายของท่อหลักถูกยึดแบบ Fixed-free เทียบกับอัตราส่วน  $d/D$

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ก่อนการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองควรที่จะศึกษาการสร้างแบบจำลองของสภาพจุดปลายก่อนว่ามีความถูกต้องตามหลักทฤษฎีหรือไม่

6.2.2 การสร้างแบบจำลองเพื่อหาการกระจายตัวของความเค้นในการเชื่อมต่อกันของท่อหลักและท่อแยกสามารถสร้างโครงข่ายจุดต่อให้ละเอียดมากยิ่งขึ้นได้ด้วยวิธี Shell to solid submodeling

6.2.3 ตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบที่ท่อทั้งสองไม่ได้ทำมุมฉากกัน อย่างเช่นท่อทั้งสองทำมุม 30, 45 และ 60 องศา ควรที่จะได้ถูกศึกษาต่อไป ตามช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตในช่วง  $0.1 \leq d/D \leq 1$ ,  $20 \leq D/T \leq 250$  และ  $0.1 \leq t/T \leq 3$

6.2.4 ตัวประกอบความเข้มของความเค้นของการต่อท่อแยกแบบที่ท่อทั้งสองไม่ได้ทำมุมฉากกันอย่างเช่นท่อทั้งสองทำมุม 30, 45 และ 60 องศา ควรที่จะได้ถูกศึกษาต่อไป ตามช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตในช่วง  $0.1 \leq d/D \leq 1$ ,  $20 \leq D/T \leq 250$  และ  $0.1 \leq t/T \leq 3$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Xue L., Widera G. E. O., Sang Z. “Flexibility Factors for Branch Pipe Connections Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Moments” Journal of Pressure Vessel Technology., Vol.128, 2006.
- [2] Widera G. E. O., Wei Z. “Large Diameter Ratio Shell Intersections, Part 3: Parametric Finite Element Analysis of Large Diameter Shell Intersections External Loadings” WRC Bulletin 497, 2004.
- [3] Rodabaugh E. C., Moore S. E. “Stress Indices and Flexibility Factors for Nozzles in Pressure Vessels and Piping” NUREG/CR-0788., ORNL/Sub-2913, 1979.
- [4] Rodabaugh E. C., Moore S. E. “Flexibility Factors for Small ( $d/D < 1/3$ ) Branch Connections with External Loadings” ORNL/Sub-2913-6., 1977.
- [5] Rodabaugh E. C. “Stress Indices for Small Branch Connections with External Loadings” ORNL-TM-3014., 1970.
- [6] Steele C. R., Steele M. L. “Stress Analysis of Nozzles in Cylindrical Vessels with External Load” Journal of Pressure Vessel Technology., Vol.105, 1983. Pp. 191-200.
- [7] ASME Code for Pressure Piping, B31.3. “Chemical Plant & Refinery Piping” ASME, New York, 2012 edition.
- [8] Rodabaugh E. C. “Accuracy of Stress Intensity Factors for Branch Connections” WRC Bulletin 329, 1987.
- [9] Mershon J. L., et al. “Local Stresses in Cylindrical Shells Due to External Loadings on Nozzles—Supplement to WRC Bulletin 107” WRC Bulletin 297, 1984.
- [10] Rodabaugh E. C., Wais E. A. “Standard Flexibility Factor Method and Piping Burst and Cyclic Moment Tests for Induction Bends and 6061-T6 and SS 304 Transition Joints,” Report 1, WRC Bulletin 463, 2001.
- [11] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section 3, Division 1, “Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components” ASME, New York, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Fujimoto T., Soh T. “Flexibility Factors and Stress Indices for Piping Components with  $D/T \leq 100$  Subjected to In-Plane or Out-of-Plane Moment” Journal of Pressure Vessel Technology., Vol.110, 1988. Pp. 374–386
- [13] Wais E. A., Rodabaugh E. C., and Carter R. “Stress Intensification Factors and Flexibility Factors for Unreinforced Branch Connections” PVP, Vol. 383, 1999.
- [14] Rodabaugh E. C. Comments on “Parametric Finite Element Analysis of Large Diameter Shell Intersections, Part 2: External Loadings” PVRC Project 96-20AS, Committee Correspondence, 1997.
- [15] Widera G. E. O., Xue Liping. “Guidelines for Modeling Cylinderto- Cylinder Intersections” WRC Bulletin 493, 2004.
- [16] Timoshenko S. P., Goodier J. N. “Theory of Elasticity” McGraw-Hill, New York, 3rd ed, 1970.
- [17] Xue L., Widera G.E.O., and Sang Z. “Parametric FEA Study of Burst Pressure of Cylindrical Shell Intersections” Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 132, 2010.
- [18] Cao J.J., Yang G.J., Packer J.A., and Burdekin F.M. “Crack modelling in FE analysis of circular tubular joints” Eng. Fracture Mech, Vol. 61, 1998. Pp 537–553
- [19] Lie S.T., Lee C.K., and Wong S.M. “Model and mesh generation of cracked tubular Y-joints” Eng. Fracture Mech, Vol. 70, 2003. Pp 161–184
- [20] Lee C.K., Chiew S.P., Lie S.T., and Nguyen T.B. N. “Adaptive mesh generation procedures for thin-walled tubular structures” Finite Elements in Analysis and Design Vol. 46, 2010. Pp 114–131
- [21] Xue L. “Elastic and Inelastic Finite Element Analysis of Cylindrical Shell Intersections,” Ph.D. thesis, Marquette University, Milwaukee, WI, 2006.
- [22] Peter Q. Vu., Paulin Research Group. “REVISION OF B31 CODE EQUATIONS FOR STRESS INTENSIFICATION FACTORS AND FLEXIBILITY FACTORS FOR INTERSECTIONS” ASME Early Career Technical Conference, March 31-April 02, 2011.
- [23] ABAQUS/STANDARD. “User’s Guide and Theoretical Manual” Version 6.11.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] Ya-Jun Qu., Bao-Gang. "A Scilab Toolbox of Nonlinear Regression Models Using A Linear" IEEE, 2011. Pp 142-147
- [25] Hechmer J. L., Hollinger G. L. "3D Stress Criteria Guidelines for Application" WRC Bulletin 429, 1998.
- [26] Williams D., Clark J "Development of Flexibility Factors for Fabricated Tee Branch Connections" PVP, Vol. 331, 1996.
- [27] Corum J. M., Greenstreet W. L., Bolt S. E., and Gwaltney R. C. "Theoretical and Experimental Stress Analysis of ORNL Thin-Shell Cylinder-to-Cylinder Model No.1" Oak Ridge National Laboratory, October 1972.
- [28] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII. "Rules for Construction of Pressure Vessels" Div. 2—Alternate Rules, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1986.
- [29] <http://cran.r-project.org/>.
- [30] Hinnant C., Paulin Research Group. "Fatigue Design of Process Equipment ASME Plant Engineering & Maintenance Technical Chapter, March 2009.
- [31] Logan D. L. "A First Course in the Finite Element Method" Cengage Learning, Stamford, 5th ed, 2012.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISSN 0125-1724	
LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL	
<b>วิศวกรรมลาดกระบัง</b>	
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
ปีที่ 32 ฉบับที่ 2	มิถุนายน 2558
<b>บทความวิชาการ</b>	
1. ปัจจัยสำคัญของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพื่อการผลิตไบโอดีเซล ธาดา ทรัพย์ภักดีธนา ชนินทร ศรีมีชัยธร สบวรรณ ทิมวิวัฒน์	1
<b>บทความวิจัย</b>	
2. การค้นหาฐานการถือครองของบรรษัทความดีจำนวนดีที่อาศัยวงจรออกซิเดชันแบบอ่อนคล้ายที่มี การอินเจ็คชันลึก อรุณภัก กิตพงษ์วัฒนา พลศักดิ์ ไชยยาภรณ์ จิรสดา ไชยยาภรณ์ ปราโมทย์ จาคเขียน	7
3. การพัฒนาการออกผลความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นทราห์สำหรับอินเวคเตอร์สามระดับ ไพฑูริย์ เกียรติสุขคนารส สมบูรณ์ แสงวงค์วัฒน์ชัย	13
4. การประเมินสมรรถนะ และความสัมพันธ์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายเทคโนโลยี ที่ติดตั้งบนหลังคาในประเทศไทย พิระวุฒิ ชิมวรงค์สี ศศิวิมล อรรถเศียร นิธิฐานต์ อุดมเศษานันต์ ทรงเกียรติ กิตติณวิริย์ภ อัศวิน เหมรัมย์ทอง สุวิวัฒน์ กวีรุ่งเรืองรัตน์ สุวิทย์ ศรีสุวรรณวิบูลย์ อองพัตต์ ศรีประเวศ	19
5. ตัวประกอบยี่ดหุนของทางพอลิเอทแคแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและ นอกระนาบสำหรับสภาวะจุดปลายยึดแน่น-ขรรค สถไส ฮิวฮาร มนต์ศักดิ์ พิมพ์สาร	25
6. ผลของครานเคียวไฟที่มีต่อการไหลกลับแบบเรอริโมออสตาโคเซโครเดรนิกในเฟืองเฟนดรี เมฆฎา พานิชกรณิ ชนินชา วงศ์ศิลาแก้ว	31
7. การคัดเลือกผู้จัดหารัดดับเพื่อเข้าสู่ระบบการขนส่งแบบมีล้อคัมของบริษัทยุติผลิตภัณฑ์ส่วนรถยนต์ นิตยา สมยิ่ง นวระภนต์ พุ่มสุศรี	37
8. ปัจจัยการกักที่มีผลกระทบท่อผิวสำเร็จของวัสดุผสมไม้ที่กลาสติก ธเนศ รัตนวิไล- ทวีศร พิศสุวรรณ สิริวิบูลยา จิวเกียรติหา อาศวิ หอมเขียว	43
9. ผลกระทบของอุณหภูมิและปริมาตรน้ำต่อสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิไพเรทีน และผงไมยางพารา ชาตรี หอมเขียว ธเนศ รัตนวิไล สุทธิทธิ์ ระวีวงศ์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน	49
10. การศึกษารูปแบบป้ายทะเบียนรถยนต์ รถบรรทุก และจักรยานยนต์ที่เหมาะสมแก่การจดจำเพื่อ รองรับการเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน สุพจน์ สุรินัด แผลมทอง เหล่ากมลวรรณ	55
11. การศึกษาพฤติกรรมของผู้โดยสารในการเลือกใช้ระบบขนส่งสาธารณะในเขตเมือง : กรณีศึกษา เทศบาลนครนครศรีธรรมราช ปิติ จีนทรุไทย	61
12. ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเซสตุลา ธนกร ทวีวุฒิ นพ แสงเทียน วิวิวัฒน์ ทวีทัศนานนท์	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้ โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบสำหรับสภาพจุดปลาย ยึดแน่น-ธรรมดา

## Flexibility Factors of Unreinforced Branch Pipe Connections Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Bending Moments for Fixed-Simply End Conditions

ศศิโส ล้ำธาร มนต์ศักดิ์ พิมพ์สาร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ตัวประกอบยึดหยุ่นเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ความเค้นของระบบท่ออุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบจากภายนอก ความไม่แม่นยำของตัวประกอบยึดหยุ่นส่งผลให้เกิดผลลัพธ์ที่ไม่แม่นยำในการคำนวณโมเมนต์ดัดและความเค้นจากการขยายตัวของระบบท่อกงานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของความยาวของท่อหลักและท่อแยก ( $L_1, L_2, L_b$ ) ต่อตัวประกอบยึดหยุ่นและนำเสนอสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นต่อตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ ( $d/D, D/T, t/T$ ) ในช่วง  $0.333 \leq d/D \leq 1$ ,  $20 \leq D/T \leq 250$  และ  $0.333 \leq t/T \leq 3$  ที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดกระทำที่ปลายท่อแยก สำหรับสภาพจุดปลายของท่อหลักยึดแน่น-ธรรมดา โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยคุณสมบัติของการยึดหยุ่นเชิงเส้น ขั้นแรกการดำเนินการสอบเทียบแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบความเค้นลัพธ์ของการต่อท่อแยกที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อมูลผลการทดลองที่มีอยู่ จากนั้นศึกษาผลกระทบของความยาวท่อหลัก ( $L_1, L_2$ ) และท่อแยก ( $L_b$ ) ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น การหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นและสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นได้ถูกดำเนินการตามลำดับ จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของความเค้นลัพธ์สอดคล้องกับข้อมูลผลการทดลองเป็นอย่างดี นอกจากนี้ผลลัพธ์จากการคำนวณได้แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อหลักและท่อแยกด้วยสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดามีผลกระทบต่อตัวประกอบยึดหยุ่น

**คำสำคัญ :** ตัวประกอบยึดหยุ่น, การต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรง, โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบ

### Abstract

Flexibility factors are an important parameter in pipe stress analysis, especially, for branch pipe connections subjected to external moments, in-plane and out-of-plane. Inaccuracy of these can influence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

to calculated moments which result in inaccurate displacement stress range. The purpose of this paper is to investigate the effects of lengths of the run and branch pipes ( $L_1, L_2, L_b$ ) on flexibility factors and correlation equations for these flexibility factors on geometry parameters ( $d/D, D/T, t/T$ ) for range  $0.333 \leq d/D \leq 1, 20 \leq D/T \leq 250$  and  $0.333 \leq t/T \leq 3$  subjected to in-plane and out-of-plane bending moments for fixed-simply end conditions. Finite element method with linear elastic property is employed for stress and flexibility factor evaluation. At first, FEM stress results of run-branch pipe intersection are verified by comparing with the available experimental data, the study on effect of lengths for the run ( $L_1, L_2$ ) and branch pipes ( $L_b$ ), the determination of flexibility factors and correlation equations for these flexibility factors was carried out, respectively. The simulated result, the stress distribution trend, shows good agreement with the experimental data. Moreover, the FEA simulations of varying lengths of the run and branch pipes and fixed-simply end conditions, were performed and the calculated results indicate that run and branch pipe lengths have an effect on flexibility factors.

**Key words:** Flexibility factor, Branch pipe connections, Run-branch pipe intersection

## 1. บทนำ

การต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรง (branch connection or unreinforced fabricated) ได้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับการต่อท่อแยก (branch pipe connection) ในระบบท่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานปิโตรเคมีและโรงไฟฟ้า เป็นต้น เมื่อท่อแยก (branch pipe) ได้รับความเค้นดัด (bending moment) เนื่องจากกรวยขาตัวทางความร้อนของท่อกระทำที่ตัวท่อ โมเมนต์ดัดนั้นจะทำให้ท่อแยกเกิดการเสียรูปและค่าความหนาแน่นของความเค้นตรงบริเวณรอยเชื่อมต่อของท่อแยกกับท่อหลัก (run pipe) จะมีค่าสูงขึ้น ตัวประกอบยืดหยุ่น (flexibility factors) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ความเค้นในระบบท่อในอุตสาหกรรม ซึ่งตัวประกอบยืดหยุ่นมีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเค้นของระบบท่อ (displacement stress range) ความไม่แม่นยำของตัวประกอบยืดหยุ่นสามารถนำไปสู่การคำนวณความเค้นของระบบท่อที่ไม่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามข้อกำหนดของมาตรฐานระบบท่อ ASME B31.3 ตอนที่ 319.3 [2] ได้กำหนดให้ตัวประกอบยืดหยุ่นสำหรับการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงมีค่าเท่ากับ 1 บนสมมุติฐานที่ว่าจุด

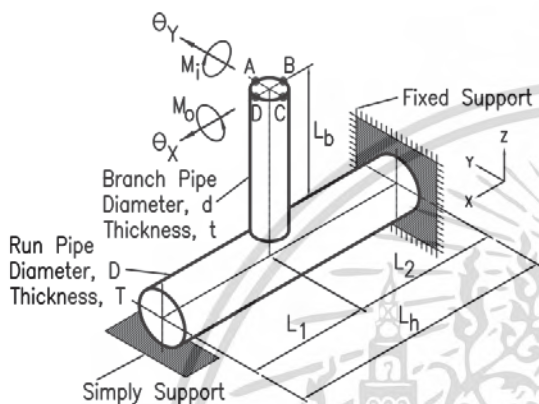
เชื่อมต่อเป็นเสมือนจุดแข็งเกร็ง (rigid) จุดเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็งตามคำแนะนำของมาตรฐานในปัจจุบันนั้นสามารถที่จะเกิดความไม่แม่นยำในการคำนวณโมเมนต์ดัดและความเค้นบนท่อแยก WRC Bulletin 329 [2] ได้แสดงตัวอย่างผลของตัวประกอบยืดหยุ่นที่มีอิทธิพลต่อการคำนวณความเค้นของท่อแยกในระบบท่อ

The ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section 3, NB-3687.5 [3] ได้จัดเตรียม 2 สมการสำหรับการหาค่าตัวประกอบยืดหยุ่นที่  $D/T \leq 100$  และ  $d/D \leq 0.5$  WRC 297 [4] ได้ให้กราฟสำหรับการหาค่าตัวประกอบยืดหยุ่นสำหรับสภาพจุดปลายธรรมดา-ธรรมดา (simply-simply support) และจำกัดการใช้งานไว้ที่  $d/D \leq 0.5$  Fujimoto และ Soh [5] เสนอสมการของตัวประกอบยืดหยุ่นสำหรับสภาพจุดปลายยึดแน่น-ยึดแน่น (fixed-fixed support) ใช้งานที่  $50 \leq D/T \leq 300, 0.5 \leq d/D \leq 0.95$  และ  $0.25 \leq t/T \leq 0.95$  Wais [6] ให้สมการตัวประกอบยืดหยุ่นที่ได้จากค่าเฉลี่ยของสภาพจุดปลายยึดแน่น-ปล่อยอิสระ (fixed-free support) กับจุดปลายยึดแน่น-ยึดแน่น ใช้งานในช่วง  $7.50 \leq D/T \leq 99, 0.125 \leq d/D \leq 1.0$  และ  $7.50 \leq d/t \leq 198$  Widera [7] ให้สมการตัวประกอบยืดหยุ่นที่อยู่ในช่วงขอบเขต  $20 \leq D/T \leq 250, 0.333$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้นไม่มีผู้ดูแลเห็นชอบใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\leq d/D \leq 1.0$  และ  $0.333 \leq t/T \leq 3$  ภายใต้สภาพจุดปลายยึดแน่น-ปล่อยอิสระ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ดำเนินการมาก่อนหน้านี้พบว่ายังไม่มีผลการดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นที่ต่อแยกอยู่ภายใต้โมเมนต์คดในระนาบและนอกระนาบและท่อหลักมีสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา (fixed-simply support) ซึ่งแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการต่อท่อแยกและสภาพจุดปลายจุดประคองของการศึกษานี้อยู่บนพื้นฐานการพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการสอบเทียบแบบจำลอง (benchmark study) โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ ด้วยเอลิเมนต์ทรงตัน (solid element) เพื่อหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นและนำเสนอสมการความสัมพันธ์ของสภาพเงื่อนไขดังกล่าวตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1

ช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตในการศึกษานี้ใช้เหมือนกับของ Widera [7] ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 1 รวมทั้ง  $L_b = L_1 = L_2 = 14.5$  นิ้ว และ  $d/D = t/T = 0.5$ ,  $D/T = 99$  และ  $D = 9.9$  นิ้ว สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง โดยที่  $L_b$  คือความยาวท่อแยก  $L_1$  และ  $L_2$  คือระยะทางระหว่างจุดตัดของแกนท่อหลักและท่อแยกกับจุดปลายอิสระหรือธรรมดาและจุดปลายยึดแน่นตามลำดับ  $d, D$  และ  $t, T$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยและความหนาผนังของท่อแยกและท่อหลักตามลำดับ

ตารางที่ 1 ช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต

Number of models	$t / T$	$D / T$	$d / D$
14 (a)	0.333, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.333
14 (b)	0.5, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.5
12	0.75, 1, 3	20, 60, 100, 150	0.75
3	1	20, 60, 100	1

(a) ยกเว้น  $d/D=0.333$  ด้วย  $D/T=20$  และ  $t/T=3$ .

(b) ยกเว้น  $d/D=0.5$  ด้วย  $D/T=20$  และ  $t/T=3$ .

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ความเค้นของระบบท่อ ตัวประกอบยึดหยุ่นขององค์ประกอบทั้งหมดในระบบท่อเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทราบค่า จากนิยามพื้นฐานและวิธีการที่ใช้สำหรับการพัฒนาตัวประกอบยึดหยุ่น [8] จากรูปที่ 2 มุมการหมุน ( $\Theta$ ) ของท่อแยกที่จุดปลาย ( $w$ ) เทียบกับจุดต่อ ( $w$ ) คือ  $\Theta = Md_o / EI_b$  โดยที่  $E$  คือโมดูลัสความยืดหยุ่น  $I_b$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดท่อแยก  $M$  เป็นโมเมนต์คดในระนาบหรือนอกระนาบที่กระทำกับท่อแยกและ  $d_o$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อแยกตามลำดับ ซึ่งในความเป็นจริงมุมการหมุนจะมีค่ามากกว่าในทางทฤษฎีเนื่องจากการเสียรูปของท่อที่บริเวณของการต่อแยก ซึ่งได้นิยามให้เป็นการหมุนของสปริงเสมือน [9] คือ  $\Theta = KMd_o / EI_b$  ดังนั้นตัวประกอบยึดหยุ่น ( $K$ ) ของการต่อท่อแยกมีค่าเป็น

$$K = \Theta EI_b / Md_o \tag{1}$$

เนื่องจาก  $\Theta = \Theta_{FEA} - \Theta_{Beam}$  โดยที่  $\Theta_{FEA}$  ได้จากผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขณะที่  $\Theta_{Beam} = \Theta_{Run} + \Theta_{Branch}$  โดยที่  $\Theta_{Run}$  กับ  $\Theta_{Branch}$  ได้มาจากการวิเคราะห์แบบคานด้วยวิธีทฤษฎียึดหยุ่น [10] ดังนั้นสมการที่ (1) เขียนใหม่ได้เป็น

$$K = (\Theta_{FEA} - \Theta_{Branch} - \Theta_{Run}) EI_b / Md_o \tag{2}$$

เพื่อที่จะหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นในระนาบ ( $K_i$ ) และนอกระนาบ ( $K_o$ ) ต้องแทนค่า  $\Theta_{FEA}$ ,  $\Theta_{Branch}$  และ  $\Theta_{Run}$  ลงในสมการที่ (2) และจากที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ตามสมการด้านล่างนี้

สำหรับ  $K_i$  เนื่องจากโมเมนต์คดในระนาบ ( $M_i$ ):

$$\Theta_{FEA,i} = \Theta_y \tag{3}$$

$$\Theta_{Branch,i} = M_i L_b / EI_b \tag{4}$$

$$\Theta_{Run,i} = \frac{M_i}{4EI_h L_h} \left[ (L_h - L_1)(3L_1 - L_h) + \frac{3(L_h^2 - L_1^2)}{L_h^2} \right] \tag{5}$$

โดยที่  $\Theta_y$  วัดที่จุด A และ C ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1

สำหรับ  $K_o$  เนื่องจากโมเมนต์คดนอกระนาบ ( $M_o$ ):

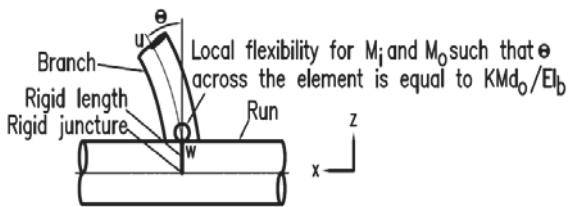
$$\Theta_{FEA,o} = \Theta_x \tag{6}$$

$$\Theta_{Branch,o} = M_o L_b / EI_b \tag{7}$$

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Theta_{Run,o} = 1.3M_o L_2 / EI_h \quad (8)$$

โดยที่  $\Theta_x$  วัดที่จุด B และ D ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1 เช่นกัน



รูปที่ 2 แนวความคิดของตัวประกอบยึดหยุ่น

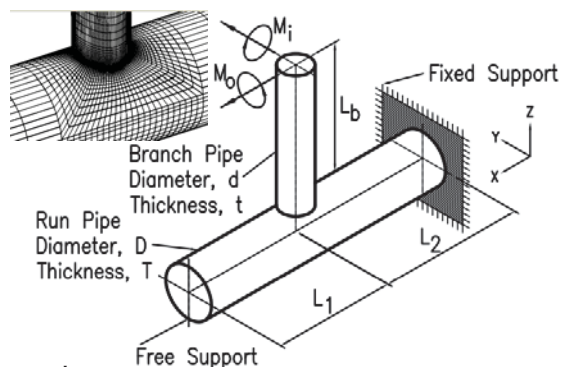
### 3. การดำเนินการวิจัยและผลการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การสอบเทียบแบบจำลอง

การสอบเทียบแบบจำลองได้ถูกดำเนินการก่อนที่จะศึกษาพฤติกรรมของตัวประกอบยึดหยุ่น เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองของ ORNL-1 [11] เป็นตัวสอบเทียบแบบจำลองโดยใช้ตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตที่ได้กล่าวมาแล้วและเงื่อนไขขอบเขตเหมือนกับปัญหาของ ORNL-1 [11] ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 สภาพจุดปลายยึดแน่น-ปล่อยอิสระ ส่วนจุดปลายของท่อแยกถูกปล่อยอิสระโดยที่มีโมเมนต์คดในระนาบและนอกระนาบกระทำขนาด 2400 และ 600 ปอนด์-นิ้ว ตามลำดับ

โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 3 มิติ ชนิดเอลิเมนต์แบบทรงตัน (20-node isoparametric) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ( $E$ ) และอัตราส่วนพัวซอง ( $\nu$ ) มีค่าเท่ากับ  $30 \times 10^6$  ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) และ 0.3 ตามลำดับ สำหรับสร้างแบบจำลองและโครงข่ายของจุดต่อ (mesh) ตามข้อเสนอแนะใน WRC Bulletin 493 [12] สำหรับการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรูปทรงกระบอกเชื่อมต่อกับรูปทรงกระบอก ซึ่งกำหนดให้ระยะขอบเขตของการยุบตัว (decay distance region) บนท่อหลักและท่อแยกมีค่าเท่ากับ  $3.0\sqrt{RT}$  และ  $3.0\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ซึ่ง  $R$  และ  $r$  เป็นรัศมีเฉลี่ยของท่อหลักและท่อแยกตามลำดับ ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่า 3.75 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมต่อที่บริเวณรอยเชื่อมมีค่า  $0.054\sqrt{RT}$  และ  $0.108\sqrt{rt}$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหา

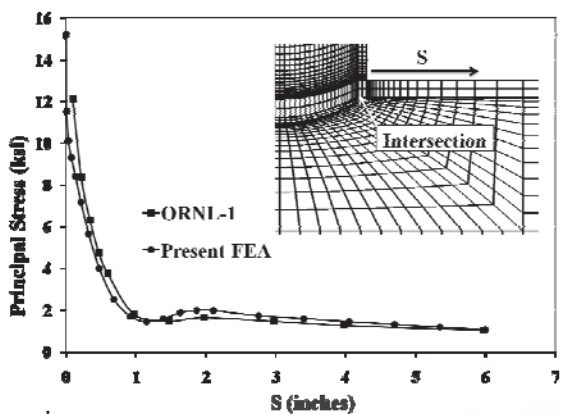
ORNL-1 [11] และรูปแบบโครงข่ายจุดต่อ

โดยที่ขนาดของเอลิเมนต์ได้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าประมาณ  $0.5\sqrt{RT}$  ภายในระยะขอบเขตของการยุบตัว และใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยก โดยให้อัตราส่วนของด้าน (aspect ratio) ที่บริเวณรอยเชื่อมต่อก่อนมีค่าน้อยกว่า 5 และขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมต่อที่อยู่ภายนอกระยะขอบเขตของการยุบตัวมีค่ามากกว่า  $\sqrt{RT}$  และ  $\sqrt{rt}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 (บนซ้าย) และผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความเค้นหลักสูงสุดได้แสดงในรูปที่ 4 พบว่าการกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิวด้านนอกตามแนวยาวของท่อหลักกับข้อมูลผลการทดลองได้แสดงแนว โนม์ที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี

ตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบสามารถหาได้ด้วยการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสม จากนั้นสมการความสัมพันธ์สามารถพัฒนาขึ้นได้โดยใช้ค่าตัวประกอบเหล่านั้น

#### 3.2 การหาความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม

เพื่อกำจัดผลกระทบของความยาวของท่อหลักและท่อแยกต่อตัวประกอบยึดหยุ่นด้วยสภาพจุดปลายและภาวะดิ่งที่กล่าวไว้ในจุดประสงค์และแสดงในรูปที่ 1 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามวิธีการสอบเทียบแบบจำลองซึ่งได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ด้วย  $d/D = 0.333, 0.5, 0.75$  และ 1 รวมทั้ง  $D/T=100$  และ  $t/T = d/D$  โดยให้  $D = 100$  นิ้ว เพื่อหาความยาวของทั้งท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม โดยพิจารณาการเข้าสู่ของ



รูปที่ 4 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดในแนวตามยาวของท่อหลักเนื่องจากโมเมนต์คดในระนาบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบที่ได้จากสมการที่ (2) ตามตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5 และผลลัพธ์ทั้งหมดได้แสดงในตารางที่ 2. ซึ่งค่าเหล่านี้จะได้นำมาใช้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นต่อไป

ตารางที่ 2 ความยาวท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ตัวประกอบยึดหยุ่นด้วย FEA

$d/D$	$L_b$	$L_1$	$L_2$	Number of models (*)
0.333	5D	6.5D	7.5D	29
0.5	5.5D	7.5D	8.5D	32
0.75	7D	8.5D	10D	26
1	8.5D	11.5D	11.5D	34

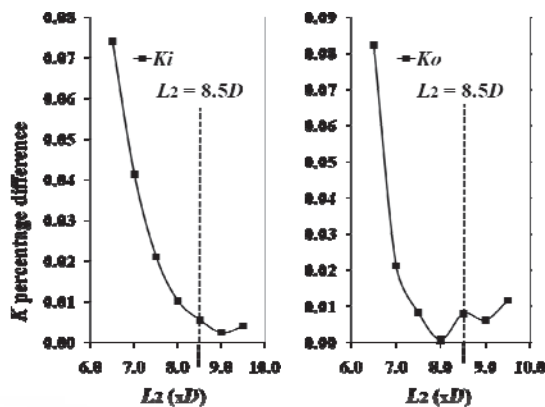
(\*) แบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์เพื่อพิจารณาการลู่เข้าของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง

### 3.3 ตัวประกอบยึดหยุ่น

43 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามแนวทางก่อนหน้านี้ สำหรับช่วงของตัวแปรที่อยู่ในตารางที่ 1 ด้วยสภาพจุดปลายและภาระตามจุดประสงค์โดยใช้ค่าความยาวของท่อหลักและท่อแยกจากตารางที่ 2 เพื่อหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่น ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการที่ (2) ได้แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งค่าตัวประกอบยึดหยุ่นเหล่านี้จะถูกใช้เพื่อพัฒนาหาสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นต่อไป

### 3.4 สมการความสัมพันธ์

เพื่อความสะดวกในการนำค่าตัวประกอบยึดหยุ่นไปใช้งาน การพัฒนาหาสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นได้ถูกดำเนินการต่อมาด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นในชุดโปรแกรม R [13] โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 3 สมการความสัมพันธ์ที่ได้ถูกแสดงในสมการ (9) และ (10) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ตามช่วง



รูปที่ 5 ความยาวที่เหมาะสมของ  $L_2$  ที่  $d/D = 0.5$  ของตัวแปรที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้

ค่าความผันผวนและค่าความแตกต่างมากที่สุดของ  $K_i$  และ  $K_o$  ระหว่าง FEA จากตารางที่ 3 กับสมการความสัมพันธ์ที่ (9) และ (10) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งแสดงว่าสมการความสัมพันธ์สอดคล้องกับข้อมูลเป็นตารางที่ 3 ตัวประกอบยึดหยุ่น  $K_i$  และ  $K_o$  ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA)

Model	$d/D$	$D/T$	$t/T$	$K_i$	$K_o$
1	0.333	20	0.333	1.921	4.369
2	0.333	20	1	3.020	7.504
3	0.333	60	0.333	5.704	24.230
4	0.333	60	1	9.460	45.836
5	0.333	60	3	18.257	102.388
6	0.333	100	0.333	8.938	52.023
7	0.333	100	1	15.094	103.099
8	0.333	100	3	31.238	249.417
9	0.333	150	0.333	12.504	93.900
10	0.333	150	1	21.387	192.784
11	0.333	150	3	46.001	488.726
12	0.333	250	0.333	18.678	191.077
13	0.333	250	1	32.423	406.826
14	0.333	250	3	71.991	1074.769
15	0.5	20	0.5	2.377	6.665
16	0.5	20	1	3.213	9.337
17	0.5	60	0.5	6.161	34.951
18	0.5	60	1	8.670	53.336
19	0.5	60	3	17.258	121.653
20	0.5	100	0.5	9.250	74.582
21	0.5	100	1	13.148	117.942
22	0.5	100	3	27.641	290.293
23	0.5	150	0.5	12.550	134.434
24	0.5	150	1	17.985	218.777
25	0.5	150	3	38.862	562.191
26	0.5	250	0.5	18.072	269.614
27	0.5	250	1	25.994	449.302
28	0.5	250	3	57.284	1197.779
29	0.75	20	0.75	2.814	7.520
30	0.75	20	1	3.215	8.700
31	0.75	20	3	5.083	13.823
32	0.75	60	0.75	6.413	36.867
33	0.75	60	1	7.470	44.500
34	0.75	60	3	14.459	99.626
35	0.75	100	0.75	9.083	76.944
36	0.75	100	1	10.617	94.314
37	0.75	100	3	21.611	229.660
38	0.75	150	0.75	11.799	133.158
39	0.75	150	1	13.814	164.916
40	0.75	150	3	28.773	419.761
41	1	20	1	4.156	6.418
42	1	60	1	11.137	24.590
43	1	100	1	16.571	40.780

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ความแตกต่างระหว่าง FEA กับสมการ  
ความสัมพันธ์

	Variance $R^2$		Max. difference between FEA and correlation equation	
	Widera [7]	Present	Widera [7]	Present
$K_i$	99.2%	99.5%	3.7	2.6
$K_o$	99.9%	99.9%	26.1	25.4

$$K_i = 2.323 \left(\frac{d}{D}\right)^{-0.322} \left(\frac{D}{T}\right)^{0.853} \left(\frac{t}{T}\right)^{0.652} \left[ 0.631 \left(\frac{d}{D}\right) - 1.333 \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 0.844 \left(\frac{d}{D}\right)^3 \right] \quad (9)$$

$$K_o = 1.083 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.240} \left(\frac{D}{T}\right)^{1.538} \left(\frac{t}{T}\right)^{0.842} \left[ 0.581 \left(\frac{d}{D}\right) - 0.925 \left(\frac{d}{D}\right)^2 + 0.377 \left(\frac{d}{D}\right)^3 \right] \quad (10)$$

อย่างดี โดยมีค่าความผันผวนเข้าใกล้ 1 และค่าความแตกต่างระหว่าง FEA และสมการความสัมพันธ์ที่ได้ดีกว่าของ Widera [7] ซึ่งมีสภาพจุดปลายยึดแน่น-ปล่อยอิสระ

#### 4. สรุปผลการดำเนินการวิจัย

จากการวิเคราะห์หัวแปรงทางรูปทรงเรขาคณิตและตัวประกอบยึดหยุ่นด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบสำหรับสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การกระจายตัวของความเค้นหลักที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง กราฟรูปที่ 4 แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับข้อมูลทดลองเป็นอย่างดี

2. ความยาวของท่อหลักและท่อแยกส่งผลกระทบต่อตัวประกอบยึดหยุ่น ดังนั้นความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม ควรดำเนินการวิเคราะห์หามาก่อนที่จะวิเคราะห์ตัวประกอบยึดหยุ่น

3. ตัวประกอบยึดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน  $D/T$  และ  $t/T$

4. เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วน  $d/D$ ,  $D/T$  และ  $t/T$  ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น พบว่าอัตราส่วน  $d/D$  มีอิทธิพลต่อตัวประกอบยึดหยุ่นค่อนข้างน้อย

5. ตัวประกอบยึดหยุ่นที่ได้จากตารางที่ 3 และสมการความสัมพันธ์ (9) และ (10) สามารถนำไปใช้ประกอบการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากการขยายตัวทางความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนของระบบท่อ ที่มีการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงอยู่ในระบบท่อ ตามช่วงของตัวแปรที่กำหนดไว้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ASME Code for Pressure Piping, B31.3, "Chemical Plant & Refinery Piping," 2012.
- [2] E. C. Rodabaugh, "Accuracy of Stress Intensity Factors for Branch Connections," WRC Bulletin 329, 1987.
- [3] ASME Sec.3 Div. 1, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components," 2012.
- [4] J. L. Mershon, "Local Stresses in Cylindrical Shells Due to External Loadings on Nozzles," WRC Bulletin 297, 1984.
- [5] T. Fujimoto and T. Soh, "Flexibility Factors and Stress Indices for Piping Components with  $D/T \leq 100$  Subjected to In-Plane or Out-of-Plane Moment," PVP, Vol.110, pp. 374–386, 1988.
- [6] E. A. Wais, "Stress Intensification Factors and Flexibility Factors for Unreinforced Branch Connections," PVP, Vol. 383, 1999.
- [7] G. E. O. Widera, "Flexibility Factors for Branch Pipe Connections Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Moments," PVP, Vol.128, pp.89–94, 2006.
- [8] E. C. Rodabaugh and E. A. Wais, "Standard Flexibility Factor Method," Report 1, WRC Bulletin 463, 2001.
- [9] E. C. Rodabaugh, "Stress Indices and Flexibility Factors for Nozzles in Pressure Vessels and Piping," ORNL/Sub-2913, 1979.
- [10] S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, Theory of Elasticity, 3rd ed., McGraw-Hill, 1970.
- [11] J. M. Corum and R. C. Gwaltney, "Theoretical and Experimental Stress Analysis of ORNL Thin-Shell Cylinder-to-Cylinder Model No.1," ORNL, 1972.
- [12] Widera, G. E. O., and Xue, L., "Guidelines for Modeling Cylinder to Cylinder Intersections," WRC Bulletin 493, 2004.
- [13] <http://cran.r-project.org/>.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายสดีเส ลำธาร
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2528
ที่อยู่	หมู่บ้านสินทวีการ์เด็น 1 ซอย 11 เลขที่ 68/20 หมู่ 1 ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง 21130 โทร 085-219-9440
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2551 โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ สาขาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัย เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร เหนือ ในปีการศึกษา 2547
ประวัติการทำงาน	Piping Engineer, TOYO-THAI CORPORATION PLC, 2554 Pipe Support Engineer, POYRY ENERGY PLC , 2555 Pipe Stress Engineer, SAMSUNG ENGINEERING THAILAND, 2557 Pipe Stress Engineer & Project Management, SCG Chemicals, REPCO, Present
ผลการที่เคยได้รับการตีพิมพ์	2558 “ตัวประกอบยึดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้ โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบสำหรับสภาพจุดปลายยึดแน่น- ธรรมดา” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 2 เดือนมิถุนายน 2558 หน้า 25-30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้