

กระบวนการหาอายุการใช้งานที่เหลือของท่อ superheater ด้วยการกัดกร่อน
THE PROCESS OF REMAINING LIFE OF CORRODED SUPERHEATER TUBE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

กระบวนการหาอายุการใช้งานที่เหลือของท่อ superheater ด้วยการกัดกร่อน
THE PROCESS OF REMAINING LIFE OF CORRODED SUPERHEATER TUBE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE PROCESS OF REMAINING LIFE OF CORRODED SUPERHEATER TUBE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง กระบวนการหาอายุการใช้งานที่เหลือของท่อ superheater ด้วยการกัดกร่อน

THE PROCESS OF REMAINING LIFE OF CORRODED SUPERHEATER TUBE

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐจักร พรหมณ์แก้ววิกร รหัสประจำตัว 57010412
2. นายเพชร อมรชัยยาพิทักษ์ รหัสประจำตัว 57010826
3. นายศุภากร ตั้งคุปนนันท์ รหัสประจำตัว 57011281



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการหาอายุการใช้งานที่เหลือของท่อ superheater ด้วยการกัดกร่อน

นายณัฐจักร พรหมณ์แก้ววิกร 57010412

นายพชร อมรชัยยาพิทักษ์ 57010826

นายศุภากร ตั้งคุปานันท์ 57011281

ผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการทำโครงการนี้เพื่อศึกษาการหาอายุการใช้งานที่เหลือของท่อ superheater ด้วยการกัดกร่อนในหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ ภายใต้ความดัน 761 psi ด้วยการวิเคราะห์การกัดกร่อน ซึ่งการกัดกร่อนเป็นปัญหาทั่วไปหนึ่ง ที่ต้องคำนึงถึงการจัดการแผนการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม หลักการเบื้องต้นในการประเมินอายุของหม้อไอน้ำคือการวัดแบบจำลองของหม้อไอน้ำแล้วจึงนำแบบจำลองนั้นมาวิเคราะห์โดย MSC software หาความเค้นตามแกนรอบวงที่จุดต่างๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเค้นสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum allowable stress) โดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE PROCESS OF REMAINING LIFE OF CORRODED SUPERHEATER TUBE

Nattajak	Pramkaewwikorn	57010412
Phatchara	Amornchaiyaphithak	57010826
Suphakorn	Tangkupanan	57011281
Assis.Prof. Dr.Panya Kansuwan		Advisor
Year 2560		

ABSTRACT

The purpose of this project is to estimate the remaining life of corroded superheater tube which under pressure at 761 psi by analyzes corrosion. Corrosion in water tube is the common problem that must considers to manage proper service and maintenance schedule. For primary principles. Draw 3D model and analysis via MSC software to find hoop stress or circumference stress in several case. And compare the results to maximum allowable stress by using Finite element method.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีโดยมี ผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และได้ให้คำแนะนำสั่งสอน พร้อมทั้งเสนอแนวทางแก้ปัญหาตลอดเวลาในการทำโครงการจนสำเร็จ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตากรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ซึ่งทำให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น

ขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุด คือ บิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง เป็นผู้ให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และคอยให้กำลังใจเสมอมา ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องประการใด คณะผู้เขียนขออภัยมา ณ โอกาสนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ ที่สามารถนำข้อมูลต่าง ๆ ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งในเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติการต่อไป

นายณัฐจักร พรหมณ์แก้ววิกร

นายเพชร อมรชัยยาพิทักษ์

นายศุภากร ตั้งคุปนนันท์

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมติฐาน	1
1.4 วิธีดำเนินงานของโครงการ	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การกัดกร่อน	4
2.2 ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการผุกร่อนของโลหะ	6
2.3 รูปแบบการกัดกร่อน	8
2.3.1 การกัดกร่อนเนื่องจากการไหล (Erosion-corrosion)	8
2.4 การควบคุมการกัดกร่อน	8
2.5 การป้องกันการกัดกร่อน	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.6	ทฤษฎีความเสียหาย	9
2.6.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	10
2.7	ความเค้น	12
2.8	การประเมินอายุการใช้งาน	17
2.9	ทฤษฎีหม้อไอน้ำ (Boiler Theory)	17
2.10	คุณสมบัติ SA-515 Grade 70	17
2.11	คุณสมบัติ SA213-T22	18
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย		
3.1	บทนำ	19
3.2	ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข	20
3.3	แบบจำลองของ Superheater	20
3.4	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	22
3.5	การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง		
4.1	ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 360 องศา	27
4.2	ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 270 องศา	31
4.3	ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 180 องศา	34
4.4	ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 120 องศา	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.5	ที่มุมมองศากการเกิดรอยการกัศกร่อน 60 องศา	40
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	43
5.1	สรุปผลการทดลอง	43
5.2	ข้อเสนอแนะ	43
บรรณานุกรม	X



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลลัพธ์ที่มุ่งองศาการเกิดรอยการกัดกร่อน 360 องศา	27
ตารางที่ 4.2 แสดงผลลัพธ์ที่มุ่งองศาการเกิดรอยการกัดกร่อน 270 องศา	31
ตารางที่ 4.3 แสดงผลลัพธ์ที่มุ่งองศาการเกิดรอยการกัดกร่อน 180 องศา	34
ตารางที่ 4.4 แสดงผลลัพธ์ที่มุ่งองศาการเกิดรอยการกัดกร่อน 120 องศา	37
ตารางที่ 4.5 แสดงผลลัพธ์ที่มุ่งองศาการเกิดรอยการกัดกร่อน 60 องศา	40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	2
รูปที่ 2.1 ท่อที่เกิดการกัดกร่อนจนเป็นสนิม	4
รูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาแอโนด(Anode)และแคโทด(Cathode)	5
รูปที่ 2.3 ตารางค่าความต่างศักย์ของอิเล็กโตรมาตรฐาน	7
รูปที่ 2.4 การกัดกร่อนเนื่องจากการไหล	8
รูปที่ 2.5 โลหะที่ป้องกันการกัดกร่อนได้ด้วยตัวเอง	8
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	10
รูปที่ 2.7 การอบคืนตัวที่เกิดในโลหะที่มีผลต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้า	11
รูปที่ 2.8 ทรงกระบอกผนังบาง	12
รูปที่ 2.9 แสดงความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่กระทำกับภาชนะครึ่งทรงกระบอก	13
รูปที่ 2.10 แสดงความเค้นตามแนวยาวที่กระทำกับภาชนะทรงกระบอก	14
รูปที่ 2.11 stress เมื่อมี internal pressure	16
รูปที่ 2.12 คุณสมบัติ SA-515 Grade 70	17
รูปที่ 2.13 คุณสมบัติ SA213-T22	18
รูปที่ 3.1 แบบ General Arrangement	20
รูปที่ 3.2 แบบ Super heater	21
รูปที่ 3.3 Superheater ที่วาดโดย solidworks	21
รูปที่ 3.4 เครื่องมือวาดรูปทรงในโปรแกรม	22
รูปที่ 3.5 แสดงการเลือกลักษณะและกำหนดขนาดของ เอลิเมนต์	23
รูปที่ 3.6 การกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่และการกำหนดความดันที่ใช้ในท่อ	23
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมี (r) และ radius stress	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

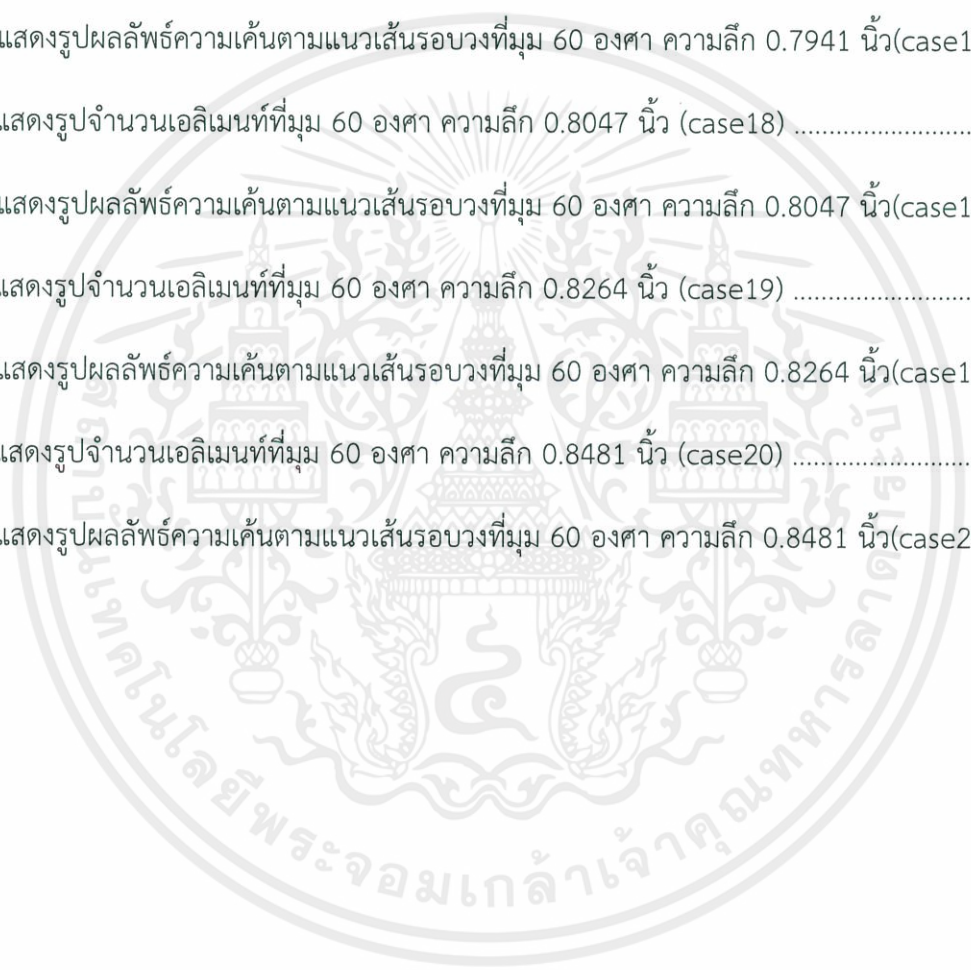
สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมี (r) และ Hoop stress	24
รูปที่ 3.9 แสดงผลลัพธ์ของการจำลองเชิงตัวเลข	25
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมี (r) และ Hoop stress ของการจำลองเชิงตัวเลข	26
รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมี (r) และ Hoop stress เปรียบเทียบผลการจำลองเชิงตัวเลข และ Thick wall disturbance	26
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal, Transversal และ Depth ของรอยการกัดกร่อนที่ 360 องศา	28
รูปที่ 4.1a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 360 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case1)	29
รูปที่ 4.1b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 360 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case1) ...	29
รูปที่ 4.2a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case2)	29
รูปที่ 4.2b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case2) ...	29
รูปที่ 4.3a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case3)	30
รูปที่ 4.3b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case3) ...	30
รูปที่ 4.4a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case4)	30
รูปที่ 4.4b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case4) ...	30
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal, Transversal และ Depth ของรอยการกัดกร่อนที่ 270 องศา	31
รูปที่ 4.5a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 270 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case5)	32
รูปที่ 4.5b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 270 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case5) ...	32
รูปที่ 4.6a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case6)	32
รูปที่ 4.6b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case6) ...	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.7a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case7)	33
รูปที่ 4.7b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case7) ...	33
รูปที่ 4.8a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case8)	33
รูปที่ 4.8b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case8) ...	33
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal, Transversal และ Depth ของรอยการกัดกร่อนที่ 180 องศา	34
รูปที่ 4.9a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 180 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case9)	35
รูปที่ 4.9b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 180 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case9) ...	35
รูปที่ 4.10a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case10)	35
รูปที่ 4.10b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว(case10)..	35
รูปที่ 4.11a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case11)	36
รูปที่ 4.11b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว(case11)..	36
รูปที่ 4.12a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case12)	36
รูปที่ 4.12b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว(case12)..	36
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal, Transversal และ Depth ของรอยการกัดกร่อนที่ 120 องศา	37
รูปที่ 4.13a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 120 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case13)	38
รูปที่ 4.13b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 120 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว(case13)..	38
รูปที่ 4.14a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case14)	38
รูปที่ 4.14b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว(case14)..	38
รูปที่ 4.15a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case15)	39

รูปที่ 4.15b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว(case15)..39	
รูปที่ 4.16a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case16)	39
รูปที่ 4.16b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว(case16)...39	
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal, Transversal และ Depth ของรอยการกัดกร่อนที่ 60 องศา	40
รูปที่ 4.17a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 60 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case17)	41
รูปที่ 4.17b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 60 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว(case17)....41	
รูปที่ 4.18a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case18)	41
รูปที่ 4.18b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว(case18)....41	
รูปที่ 4.19a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case19)	42
รูปที่ 4.19b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว(case19)....42	
รูปที่ 4.20a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case20)	42
รูปที่ 4.20b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว(case20)....42	



บทที่ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในการเลือกวัสดุเพื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์และอุตสาหกรรมแขนงต่างๆ การกัดกร่อน(Corrosion) เป็นปัญหาหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุภายใต้ความเค้นคงที่และอุณหภูมิกึ่งที่โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าอุณหภูมิใช้งานของวัสดุมีค่ามากกว่า 0.4 Tm (Tm คืออุณหภูมิจุดหลอมเหลวของวัสดุ) ซึ่งการกัดกร่อนหรือการเสื่อมสภาพของวัสดุก่อนระยะเวลาอันสมควรทำให้ระบบต่างๆทั้งในอุตสาหกรรมและโรงงานไฟฟ้าต้องหยุดการทำงานส่งผลให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจอย่างมาก ในการใช้งานจะรู้ได้อย่างไรว่าชิ้นส่วนของอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีอายุการใช้งานนานเท่าไร ในงานออกแบบต้องมีข้อมูลของเวลาในการแตกหักเสียหายและมีข้อมูลของอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) จึงจะสามารถคำนวณหาอายุการใช้งานของวัสดุชนิดนั้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทดลองหาความสัมพันธ์ของความเค้น (σ) กับความหนาต่อ (t) และ ความดันที่แตกต่างกันของโลหะที่นำมาทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

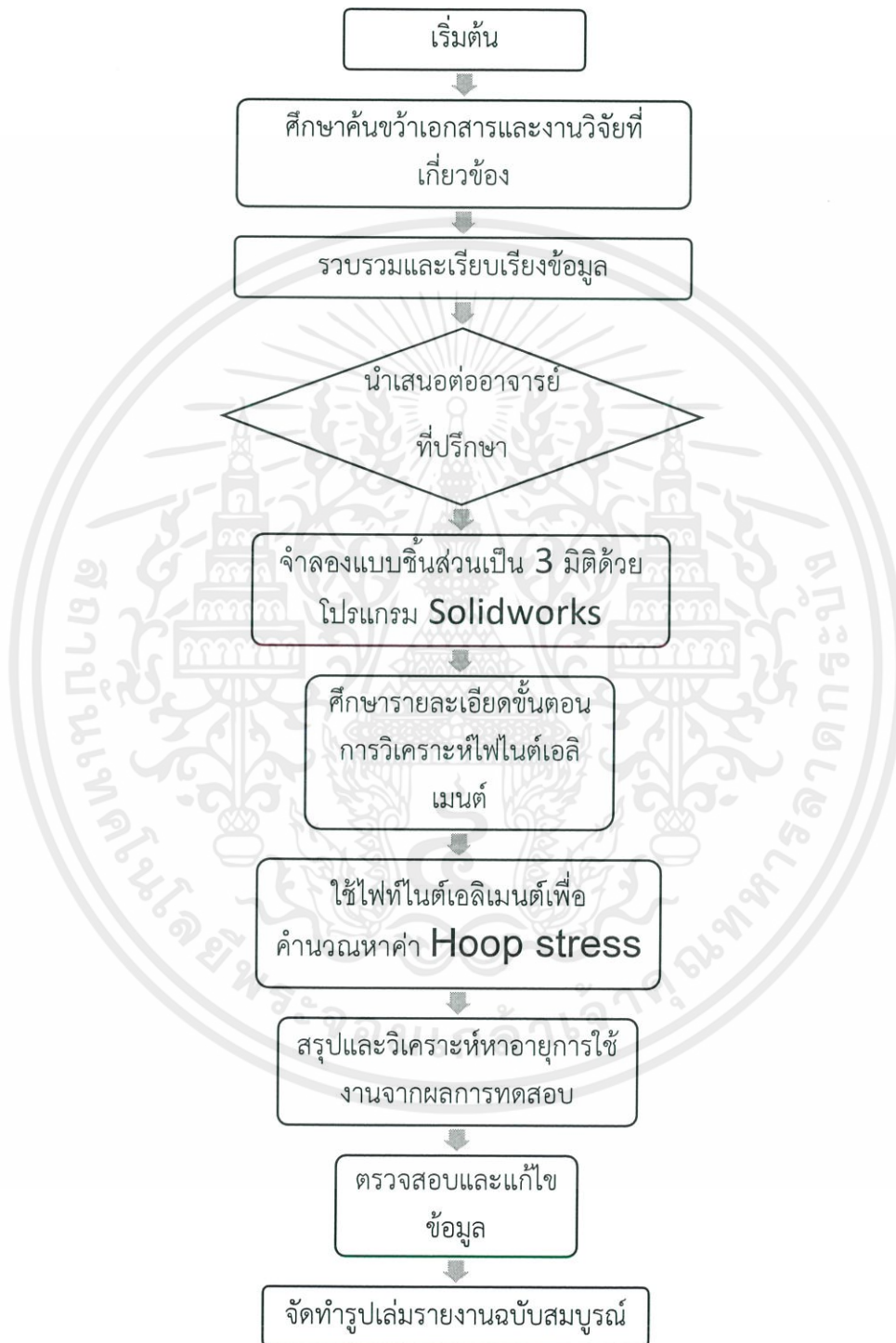
1.2.1 เพื่อประเมินอายุการใช้ของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำที่ถูกกัดกร่อนโดยความเค้น

1.2.2 ช่วยลดอุบัติเหตุจากการใช้งานท่อ Superheater โดยการศึกษาหาการกัดกร่อนและความเค้นที่เหมาะสมในการใช้งานและ สามารถนำมาใช้เป็นการตรวจสอบการใช้งานของท่อ Superheater ที่ยังเหลืออยู่

1.3 สมมติฐาน

เพื่อทำการทดสอบชิ้นส่วนในหม้อต้มไอน้ำแบบท่อน้ำ (water-tube boiler) ชิ้นส่วน Superheater ว่ามีความเค้นต่ำสุดและอายุการใช้งานที่ยังเหลืออยู่เท่าไรภายใต้ความดันคงที่ โดยทำการจำลองทั้งหมด 20 แบบ โดยมีความแตกต่างกันขององศา และ ความลึกของการกัดกร่อนในท่อ Superheater

1.4 วิธีดำเนินงานของโครงการ



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบอายุการใช้งานของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

1.5.2 สามารถนำข้อมูลจากผลการทดลองที่ได้มาประยุกต์ใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมเพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อนในโลหะได้

1.5.3 เป็นองค์ความรู้เพื่อพัฒนาในการใช้งานจริง

1.5.4 สามารถอธิบายสาเหตุการกัดกร่อนในโลหะ และการเปลี่ยนรูปของโลหะเมื่อได้รับความดันและอุณหภูมิ และสามารถบอกปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการกัดกร่อนในโลหะได้

1.6 ขอบเขตการวิจัย

1.6.1 ศึกษาหาอายุการใช้งานของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำที่ถูกกัดกร่อนในส่วนต่างๆ ของ Superheater ภายใต้อุณหภูมิ ความดันภายใน (Internal Pressure) คงที่

1.6.2 จำลองแบบชิ้นส่วนของท่อในหม้อไอน้ำแบบท่อด้วยโปรแกรม Solidworks โดยใช้ขนาดตามจริง เพื่อจำลองหาค่าความกัดกร่อนในท่อ Superheater

1.6.3 รูปแบบการศึกษาที่ได้ มาจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์เท่านั้น และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ หรือจากค่าที่ทางผู้ออกแบบได้ทำการคำนวณมาแล้ว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกัดกร่อน

การกัดกร่อน (corrosion) การผุกร่อนของโลหะคือการที่โลหะทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมรอบๆ แล้วทำให้โลหะนั้นเปลี่ยนสภาพไปเป็นสารประกอบประเภทออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ หรือเรียกง่าย ๆ ว่า เนื้อโลหะสูญเสียไป การผุกร่อนของโลหะที่พบบ่อยในชีวิตประจำวันได้แก่ เหล็กเป็นสนิม (สนิมเหล็กเป็นออกไซด์ของเหล็ก $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$) ซึ่งเกิดจากสาเหตุหลายประการ ตัวอย่างเช่น การที่อะตอมของโลหะที่ถูกออกซิไดส์แล้วรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นออกไซด์ของโลหะนั้น เช่น สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) สนิมทองแดง (CuO) หรือสนิมอลูมิเนียม (Al_2O_3)

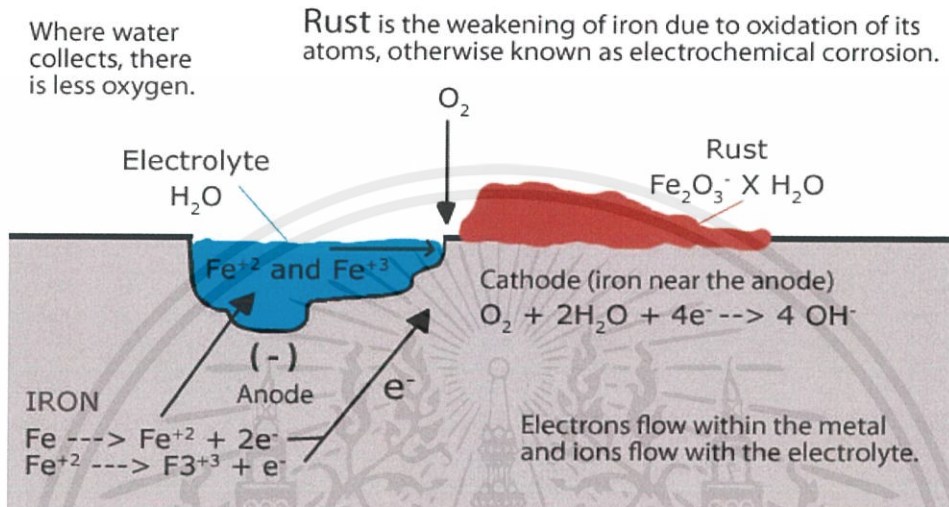


รูป 2.1 ท่อที่เกิดการกัดกร่อนจนเป็นสนิม

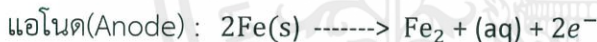
โลหะในธรรมชาติเกิดการผุกร่อนมีสาเหตุหลายประการ สาเหตุหนึ่งคือเกิดจากผิวของโลหะสัมผัสกับน้ำและแก๊สออกซิเจน การผุกร่อนของโลหะเกิดจากการที่อะตอมของโลหะถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนแล้วรวมตัวกับ ออกซิเจนในอากาศได้ผลิตภัณฑ์เป็นออกไซด์ของโลหะนั้น เช่น สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) สนิมทองแดง (CuO) หรือสนิม อะลูมิเนียม (Al_2O_3) ปฏิกิริยาการเกิดสนิมมีกระบวนการซับซ้อนมาก และมีลักษณะเฉพาะตัว เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

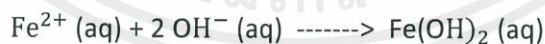
การเกิดสนิม เหล็กเนื่องจากบริเวณผิวเหล็กที่สัมผัสน้ำจะมีการให้และรับอิเล็กตรอนโดยอะตอมของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันหรือถูกออกซิไดส์เป็น Fe^{2+} ส่วนน้ำและออกซิเจนในอากาศจะรับอิเล็กตรอนหรือถูกรีดิวซ์เป็น OH^- ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติเป็นดังนี้



รูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาแอโนด(Anode)และแคโทด(Cathode)



$2Fe_2^{2+}(aq)$ และ $OH^-(aq)$ จะรวมกันได้ $Fe(OH)_2$ ซึ่งไม่ละลายน้ำดังสมการ



$Fe(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในอากาศต่อไปได้ $Fe(OH)_3$



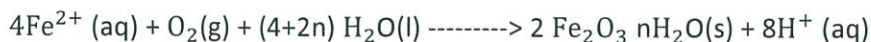
ไฮดรอกไซด์ [Fe(OH)₃] ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปจะเขียนในรูปไฮดรอกไซด์ที่มีน้ำผลึกอยู่ในโมเลกุล และน้ำผลึกอาจมีปริมาณแตกต่างกัน จึงเขียนสูตรทั่วไปเป็น $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ แก๊ส CO_2 มีส่วนทำให้เกิดสนิมในธรรมชาติได้เนื่องจาก CO_2 ละลายน้ำได้ H_2CO_2 ซึ่งแตกตัวให้ H^+ จากนั้น H^+ จะรับอิเล็กตรอนจากเหล็กและเกิดการเปลี่ยนแปลงดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอโนด(Anode) : $\text{Fe(s)} \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-}$

แคโทด(Cathode) : $\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^{+}(\text{aq}) + 4\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$

Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดส์ต่อไปได้สนิมเหล็กดังสมการ



การผุกร่อนของเหล็กหรือเกิดสนิมอาจเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเหล็กสัมผัสกับสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดส์เช่นกรด สารละลายของสารประกอบไอออนิกบางชนิด เช่น NaCl หรือสัมผัสกับโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์สูงกว่าโลหะอื่นๆสามารถผุกร่อนได้ เช่น Cu Ag แต่ผุกร่อนจะเกิดอย่างช้าๆเนื่องจากเป็นธาตุที่ให้อิเล็กตรอนยาก

2.2 ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการผุกร่อนของโลหะ

การที่โลหะถูกกัดทำลายหรือผุกร่อนไปโดยเร็วนับว่าเป็นความเสียหายทางด้านเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่ง อัตราการผุกร่อนอาจขึ้นกับแฟคเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ ขึ้นอยู่กับโลหะนั้น และขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม อาจจำแนกได้ดังนี้

1. ขึ้นอยู่กับค่า electrode potential ถ้ามีค่าต่ำจะถูกกัดกร่อน (เกิดออกซิเดชัน) เร็วกว่าโลหะที่มีค่า electrode potential สูง
2. ขึ้นอยู่กับโลหะอีกชนิดหนึ่งที่สัมผัสอยู่ เช่น สังกะสีที่สัมผัสกับเหล็ก สังกะสีจะผุกร่อนไปในขณะที่เหล็กไม่ถูกกัดกร่อน แต่ถ้าเหล็กมาสัมผัสกับดีบุก เนื้อเหล็กจะถูกกัดกร่อนไปในขณะที่ดีบุกไม่ถูกกัดกร่อน และถ้าโลหะที่มาสัมผัสกันนั้นมีค่า electrode potential ต่างกันมาก การผุกร่อนนั้นก็รุนแรงมากขึ้น
3. ขึ้นกับโครงสร้างของเนื้อโลหะนั้น เช่น ถ้าเนื้อโลหะมีสิ่งเจือปนมากหรือเนื้อโลหะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยตลอด โลหะนั้นก็จะผุกร่อนได้ง่าย
4. ขึ้นอยู่กับความเครียดภายในเนื้อโลหะ ถ้าเนื้อโลหะมีความเครียดภายในมากโลหะนั้นก็จะผุกร่อนได้ง่ายเช่นกัน

TABLE 17.1 Standard Reduction Potentials at 25 °C

	Reduction Half-Reaction	E° (V)		
Stronger oxidizing agent ↑	$F_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 F^-(aq)$	2.87	Weaker reducing agent ↓	
	$H_2O_2(aq) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$	1.78		
	$MnO_4^-(aq) + 8 H^+(aq) + 5 e^- \longrightarrow Mn^{2+}(aq) + 4 H_2O(l)$	1.51		
	$Cl_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 Cl^-(aq)$	1.36		
	$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14 H^+(aq) + 6 e^- \longrightarrow 2 Cr^{3+}(aq) + 7 H_2O(l)$	1.33		
	$O_2(g) + 4 H^+(aq) + 4 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$	1.23		
	$Br_2(aq) + 2 e^- \longrightarrow 2 Br^-(aq)$	1.09		
	$Ag^+(aq) + e^- \longrightarrow Ag(s)$	0.80		
	$Fe^{3+}(aq) + e^- \longrightarrow Fe^{2+}(aq)$	0.77		
	$O_2(g) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2O_2(aq)$	0.70		
	$I_2(s) + 2 e^- \longrightarrow 2 I^-(aq)$	0.54		
	$O_2(g) + 2 H_2O(l) + 4 e^- \longrightarrow 4 OH^-(aq)$	0.40		
	$Cu^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cu(s)$	0.34		
	$Sn^{4+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Sn^{2+}(aq)$	0.15		
	$2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g)$			0
	Weaker oxidizing agent ↓	$Pb^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Pb(s)$		-0.13
$Ni^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Ni(s)$		-0.26		
$Cd^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cd(s)$		-0.40		
$Fe^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Fe(s)$		-0.45		
$Zn^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Zn(s)$		-0.76		
$2 H_2O(l) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g) + 2 OH^-(aq)$		-0.83		
$Al^{3+}(aq) + 3 e^- \longrightarrow Al(s)$		-1.66		
$Mg^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Mg(s)$		-2.37		
$Na^+(aq) + e^- \longrightarrow Na(s)$		-2.71		
$Li^+(aq) + e^- \longrightarrow Li(s)$		-3.04		

Table 17-1 Chemistry, 5/e
© 2008 Pearson Prentice Hall, Inc.

รูปที่ 2.3 ตารางค่าความต่างศักย์ของอิเล็กโตรดมาตรฐาน

นอกจากนี้สภาวะแวดล้อมก็เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ซึ่งอาจจำแนกออกได้ต่างๆ กัน คือ

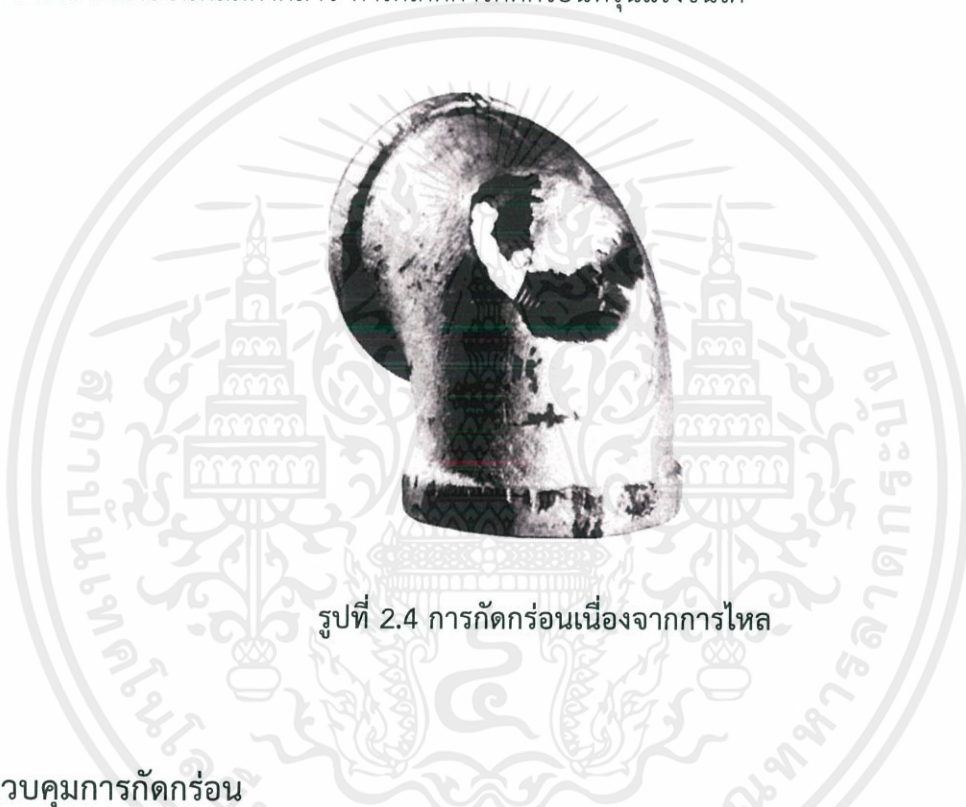
1. ความชื้นสัมพัทธ์ ถ้าบรรยากาศมีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูง โลหะก็อาจผุกร่อนได้โดยรวดเร็ว
2. ขึ้นกับมลภาวะของบรรยากาศ ถ้ามีมากก็ทำให้โลหะผุกร่อนได้เร็วเช่นกัน
3. ขึ้นกับการกระจายตัวของออกซิเจน ถ้าออกซิเจนกระจายตัวไม่สม่ำเสมอโลหะก็อาจผุกร่อนได้ง่าย
4. ขึ้นกับอัตราการไหลของของเหลว
5. ขึ้นกับความเป็นกรด ความเป็นด่างของของเหลว
6. ขึ้นอยู่กับความเครียดที่เนื้อโลหะได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 รูปแบบการกัดกร่อน

2.3.1 การกัดกร่อนเนื่องจากการไหล (Erosion-corrosion)

เป็นผลรวมของการทำลายทางเคมีและการขัดสีทางกล หรือการสึกกร่อนเนื่องจากการไหลของของไหล เป็นการกัดกร่อนที่เป็นอันตรายต่อโลหะผสมที่สร้างสภาพเฉื่อยได้ด้วยการสร้างฟิล์มบนผิว แรงจากการไหลผ่านผิวโลหะอาจไปทำลายชั้นฟิล์มดังกล่าว ทำให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงขึ้นได้



รูปที่ 2.4 การกัดกร่อนเนื่องจากการไหล

2.4 การควบคุมการกัดกร่อน

2.4.1 โลหะที่ป้องกันการกัดกร่อนได้ด้วยตัวเอง ไอออนของโลหะรวมตัวกับ O เกิดเป็นชั้นออกไซด์บางบน พื้นผิว ซึ่งสามารถทำให้การกัดกร่อนเกิดช้าลง



รูปที่ 2.5 โลหะที่ป้องกันการกัดกร่อนได้ด้วยตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ลดอุณหภูมิ T (เพื่อลดอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน)

2.4.3 เติมสารยับยั้งการกัดกร่อน

- ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน/รีดักชันเกิดช้าลง โดยการกำจัดสารตั้งต้นของปฏิกิริยา (เช่น การกำจัด O_2 โดยให้ทำปฏิกิริยากับสารยับยั้ง
- ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดช้าลงโดยการเคลือบพื้นผิวด้วยสารบางชนิด (เช่น สี)

2.5 การป้องกันการกัดกร่อน

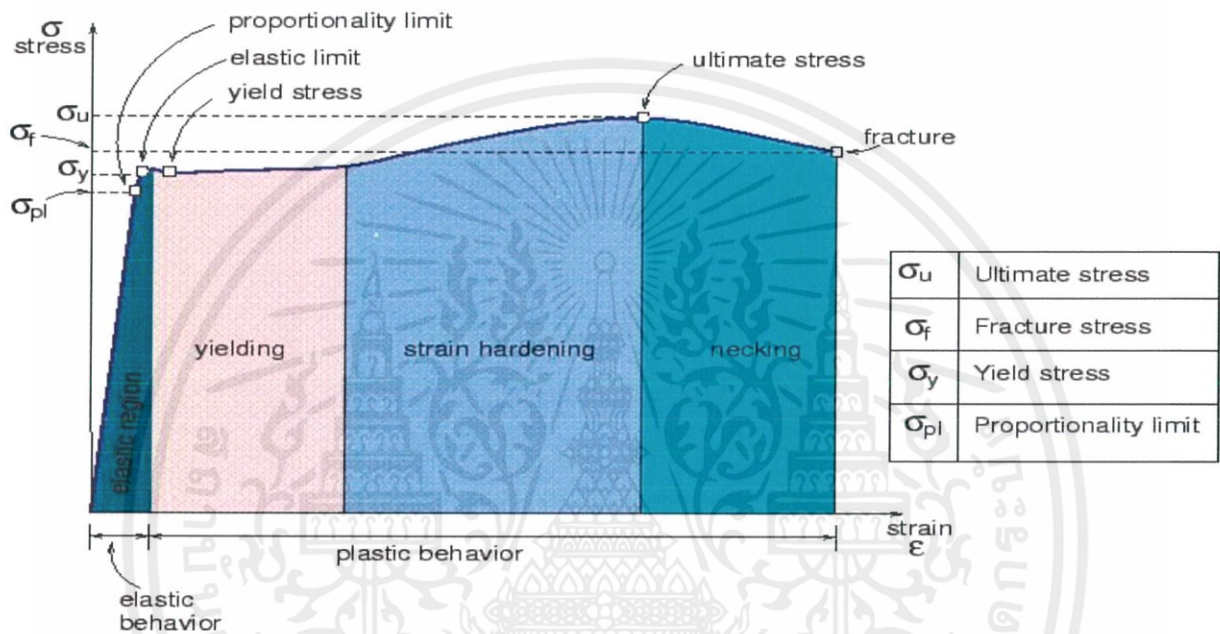
- เลือกวัสดุ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมที่ทนต่อการกัดกร่อน
- การเปลี่ยนสภาพแวดล้อม เช่น ลดอุณหภูมิที่ใช้ในการปฏิบัติงานหรือเติมสารยับยั้งในสารละลายเพื่อลดการกัดกร่อน
- การออกแบบ เช่น การออกแบบท่อเพื่อลดการชนกระแทกของของไหล
- การเคลือบผิว เช่น การเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบนผิวชิ้นงาน
- การป้องกันแบบแคโทดิก เช่น การห่อหุ้มแกนเหล็กกล้าด้วยเปลือกแมกนีเซียม

2.6 ทฤษฎีความเสียหาย

การออกแบบชิ้นส่วนเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายผู้ออกแบบต้องตระหนักว่าชิ้นส่วนที่ออกแบบมีโอกาสเกิดความเสียหายได้หลายแบบเช่น การรับภาระเกิน (overload) ความล้า (fatigue) การคืบ (creep) การผุกร่อน (corrosion) การสึกหรอ (wear) การโก่งงออย่างไร้เสถียรภาพ (buckling) เป็นต้น การระบุว่าชิ้นส่วนควรได้รับการออกแบบภายใต้เกณฑ์ความเสียหาย (failure criteria) แบบใด ต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดของภาระตามเวลา (คงที่หรือวัฏจักร ฯลฯ) โหมดของภาระ (ดึง กด บิด ตัด ฯลฯ) อุณหภูมิ (สูงหรือต่ำเทียบกับจุดหลอมเหลวของวัสดุ) สภาพแวดล้อม (กัดกร่อน) รูปร่างของชิ้นส่วน (เรียวยาว แบนบาง ฯลฯ) เป็นต้น เพราะฉะนั้นหลังจากสร้างชิ้นส่วนแล้วก็ควรนำชิ้นส่วนไปทดสอบในสภาวะทดสอบจริงหรือสภาวะทดสอบเทียบเท่า เพื่อทดสอบว่าชิ้นส่วนใช้งานในสภาวะใช้งานได้โดยไม่เสียหายหรือมีอายุใช้งานมากกว่าหรือเท่ากับที่ต้องการหรือไม่

2.6.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุนั้นเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดอย่างชัดเจนว่ามีพฤติกรรมเป็นอย่างไร วัสดุต่างชนิดกันจะมีรูปแบบของกราฟแตกต่างกันไป ค่าสมบัติที่สำคัญของวัสดุนั้นสามารถอ่านได้จากกราฟ 2.13 เช่น ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้ ค่าความเค้นที่ทำให้วัสดุอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น เป็นต้น



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

2.6.1.1 การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) เป็นขบวนการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น คือเมื่อวัสดุมีแรงกระทำค่าๆหนึ่งแต่ไม่เกินความเค้นจุดคราก (Yield Stress) แล้วปลดแรงกระทำนั้นออก วัสดุนั้นจะกลับคืนรูปเป็นสภาพเดิมได้เหมือนเดิม กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดจะเป็นเส้นตรง ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดก็จะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) นั่นคือความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดดังสมการ

$$\sigma = \epsilon E$$

เมื่อ E คือค่า Young's modulus หรือ Modulus of elasticity ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้แสดงถึงความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงกระทำ (ค่าน้อยคือวัสดุนั้นนิ่ม) ซึ่งเป็นค่าความชันของ stress-strain curve ในช่วง linear elastic

2.6.1.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เป็นขบวนการเปลี่ยนรูปแบบถาวร คือเมื่อวัสดุมีแรงมากกระทำจนถึงความเค้นจุดคราก (Yield Stress) จะทำให้วัสดุนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปอย่างถาวร ถึงแม้จะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็จะไม่คืนสภาพเดิมอีกต่อไป

2.6.1.3 ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) คือความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงดึงที่ทำให้เกิดการแปรรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ความเค้นของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานมีค่าไม่เกินความเค้นจุดคราก หรือ $\sigma_{DESIGN} < \sigma_Y$ เพื่อการป้องกันให้ชิ้นงานพังเสียหายเมื่อใช้งาน

2.6.1.4 การเพิ่มความเครียด (Strain Hardening) คือโลหะที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรที่อุณหภูมิห้อง ทำให้โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยเราสามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์นี้ได้จากเส้นกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดที่สูงขึ้น ภายหลังจากเค้นเพิ่มขึ้นผ่านจุดคราก ทำให้วัสดุมีช่วงการยืดหยุ่น (Elastic region) ที่ใหญ่ขึ้น เป็นผลให้ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) มีค่าสูงขึ้นแต่ความเหนียว (Ductility) ลดลง ทำให้เปราะมากขึ้นและดูดซับพลังงานได้น้อยลง

2.6.1.5 ความเค้นสูงสุด (Ultimate Tensile Stress) คือความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ก่อนที่วัสดุจะเกิดการขาดออกจากกัน โดยวัสดุจะเริ่มเกิดการแปรรูปอย่างถาวรเมื่อวัสดุรับภาระทางกลมากกว่าความเค้นจุดคราก จะมีการแปรรูปถาวรต่อไปเรื่อยๆจนวัสดุรับภาระทางกลสูงสุดเท่าที่วัสดุชนิดนั้นจะรับได้ ซึ่งคือความต้านทานแรงดึงของวัสดุชนิดนั้นนั่นเอง และหลังจากนั้นความเค้นจะลดลงเนื่องจากการเกิดคอคอด (Necking) จนถึงจุดที่ชิ้นงานนั้นขาดออกจากกัน

2.6.1.6 การอบคืนตัว (recovery) คือการให้ความร้อนซ้ำให้แก่เหล็กกล้าโดยการจ่ายความร้อนให้แก่ชิ้นงานในเตาอบจนเกิดอุณหภูมิสูง แต่จะต่ำกว่าอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเหล็กกล้า ให้ความร้อนจนไปถึงช่วงเวลาหนึ่งจึงค่อยๆลดอุณหภูมิลงมาจนถึงอุณหภูมิห้อง ผลที่ได้รับจะแสดงในรูปที่ 2.14

ผลที่ได้จากการอบคืนตัว	
คุณสมบัติของโลหะ	ผลที่เกิดขึ้น
การขึ้นรูป	ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น
การแตกร้าว	ลดลง
การบิดตัว	ลดลง
ความแข็ง	ลดลง
ความแข็งแกร่ง	ลดลง
ความเค้นภายใน	ลดลง
ความเปราะ	ลดลง
ความสามารถในการกลึง กัดไส	ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น
ความเหนียว	เพิ่มขึ้น
ความอ่อนนุ่ม	เพิ่มขึ้น

รูปที่ 2.7 การอบคืนตัวที่เกิดในโลหะที่มีผลต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ความเค้น

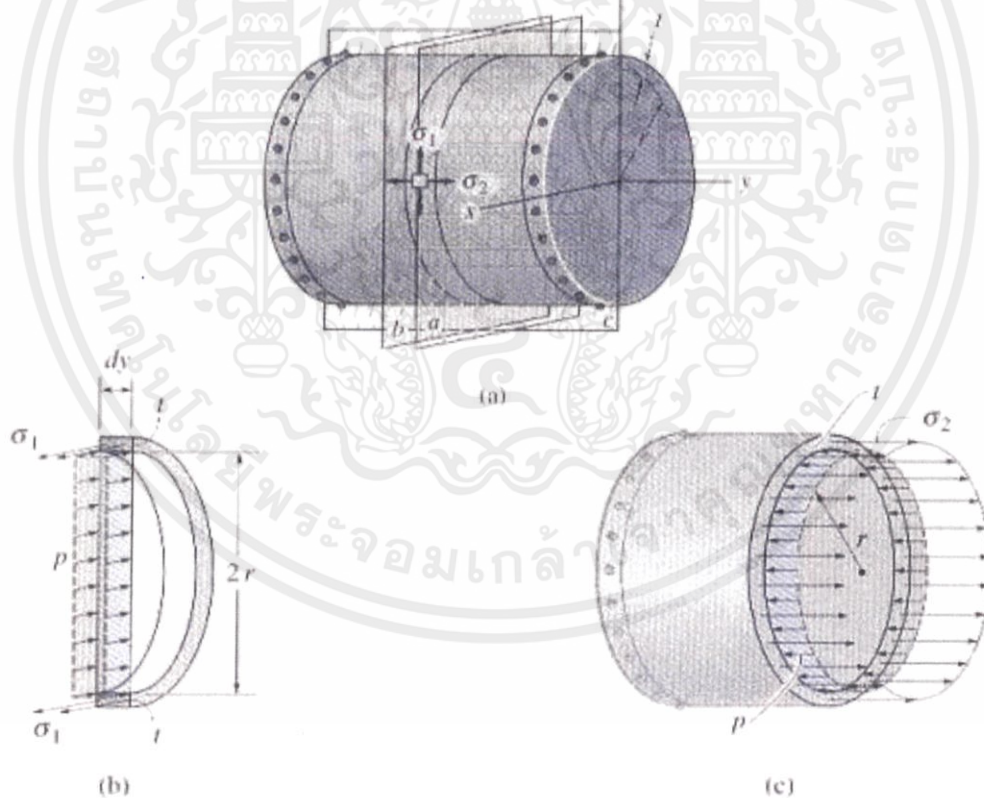
2.7.1 ความเค้นในรูปทรงกระบอกผนังบาง (Thin Wall Cylinder)

รูปทรงกระบอกกลวงผนังบาง หมายถึงรูปทรงกระบอกกลวงที่มีความหนาของผนังน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทรงกระบอกกลวงนั้น โดยทั่วไปความหนาของผนังทรงกระบอกจะไม่เกิน $1/20$ เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โครงสร้างของงานประเภทนี้ได้แก่หม้อต้ม น้ำขนาดใหญ่ ถึงขนาดใหญ่ ท่อส่งน้ำมันขนาดใหญ่ และถังแก๊ส เป็นต้น

ในการพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในรูปทรงกระบอกกลวงผนังบางนั้น จะมีความเค้น เกิดขึ้น 2 แนวด้วยกันคือ

1. ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (Hoop or Circumferential Stress)

2. ความเค้นตามแนวยาว (Longitudinal Stress)



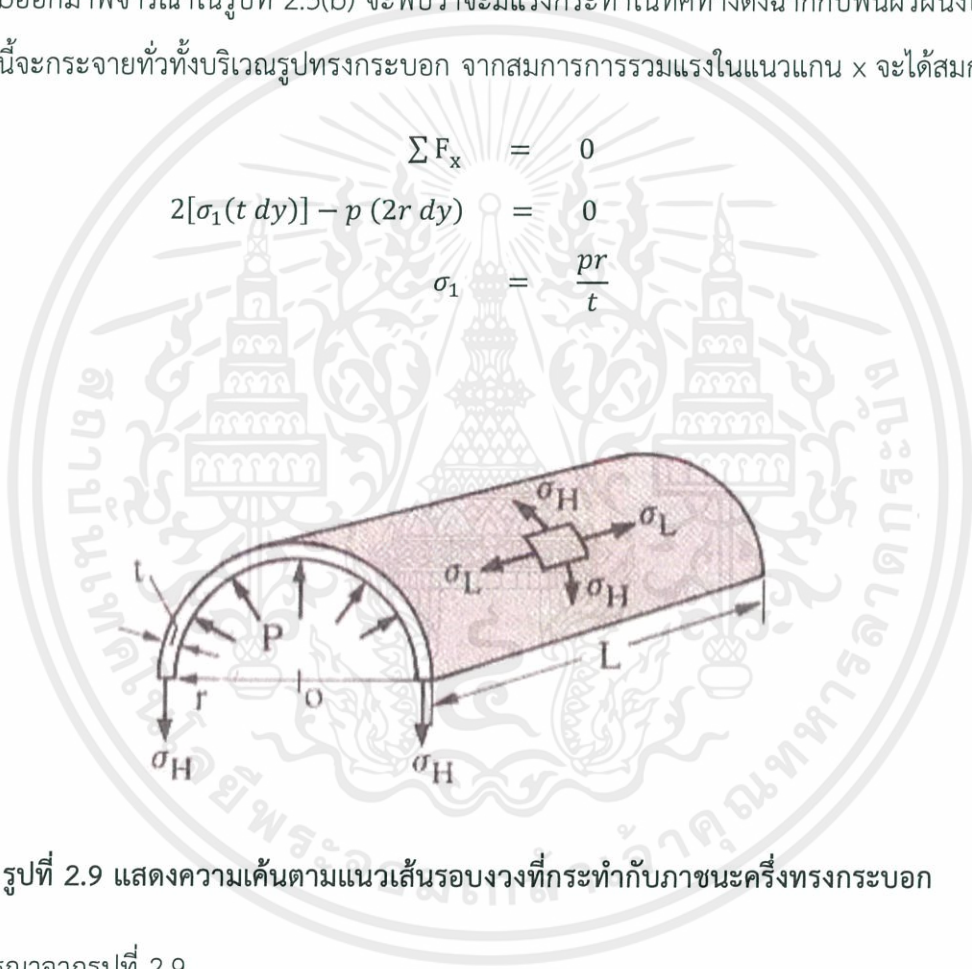
รูปที่ 2.8 ทรงกระบอกผนังบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.1 ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (Hoop or Circumferential Stress)

ภาชนะอัดความดันรูปทรงกระบอกเมื่อได้รับความดัน ความดันนั้นจะทำให้เกิดความเค้นขึ้นในเนื้อวัสดุที่ใช้ทำภาชนะนั้น และเมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากจนวัสดุนั้นไม่สามารถที่จะรับได้จะทำให้ภาชนะนั้นเกิดการเสียหาย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้ ฉะนั้นในการออกแบบใช้ภาชนะอัดความดันจึงเป็นสิ่งจำเป็นมาก ในการหาความเค้นนี้สามารถหาได้โดยการพิจารณาสมดุลของแรง พิจารณารูปที่ 2.5(a) เมื่อนำตัดหน้าตัด a และ b ออกมาพิจารณาในรูปที่ 2.5(b) จะพบว่าจะมีแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวผนังในทิศทางแกน x แรงนี้จะกระจายทั่วทั้งบริเวณรูปทรงกระบอก จากสมการการรวมแรงในแนวแกน x จะได้สมการ

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ 2[\sigma_1(t dy)] - p(2r dy) &= 0 \\ \sigma_1 &= \frac{pr}{t} \end{aligned}$$



รูปที่ 2.9 แสดงความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่กระทำกับภาชนะครึ่งทรงกระบอก

หรือจะพิจารณาจากรูปที่ 2.9

แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความดัน ภายใน = ความดัน x พื้นที่รับความดัน

$$F = P \times 2rL \tag{1}$$

แรงต้านที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นตามแนวเส้นรอบวง $\sigma_H \cdot \sigma_1$

$$F = 2\sigma_H \times Lt \tag{2}$$

ถ้าภาชนะยังคงรูปเดิม แรงที่เกิดขึ้นจะต้องเท่ากัน สมการ (1) = (2)

$$P \times 2rL = 2\sigma_H \times Lt$$

$$\sigma_H = \frac{2PrL}{2Lt}$$

$$= \frac{Pr}{t}$$

$$\therefore \sigma_H = \frac{Pr}{t} \text{ หรือ } \sigma_H = \frac{PD}{2t}$$

เมื่อ t = ความหนาของผนัง

r = รัศมีเฉลี่ยของทรงกระบอกกลาง

σ_H = ความเค้นที่เกิดตามแนวเส้นรอบวง

P = ความดันที่เกิดขึ้นในภาชนะอัดความดัน

L = ความยาวของทรงกระบอกกลาง

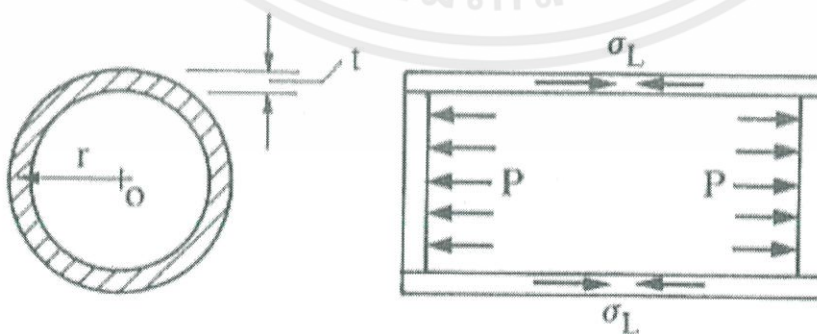
2.7.1.2 ความเค้นตามแนวยาว (Longitudinal Stress)

ในการหาความเค้นตามแนวยาวเราจะพิจารณาภาชนะทรงกระบอกกลางผนังบางดังรูปที่ 2.1(c) จะเห็นว่าความเค้นเกิดขึ้นกระจายรอบๆแนวยาวของผนังบาง เมื่อรวมแรงในแนวแกน y จะได้สมการดังนี้

$$\sum F_y = 0$$

$$\sigma_2(2\pi r t) - p(\pi r^2) = 0$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{t}$$



รูปที่ 2.10 แสดงความเค้นตามแนวยาวที่กระทำกับภาชนะทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือจะพิจารณาจากรูปที่ 2.10

แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความดันภายใน = ความดัน \times พื้นที่รับความดัน

$$F = P \times \pi r^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

แรงต้านที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นตามแนวเส้นรอบวง σ_H, σ_1

$$F = \sigma_L \times \pi 2rt \quad \dots\dots\dots (4)$$

ถ้าภาชนะยังคงรูปเดิม แรงที่เกิดขึ้นจะต้องเท่ากัน (3) = (4)

$$\begin{aligned} P \times \pi r^2 &= \sigma_L \times \pi 2rt \\ \sigma_L &= \frac{P \times \pi r^2}{2\pi rt} \\ &= \frac{Pr}{2t} \\ \therefore \sigma_L &= \frac{Pr}{2t} \quad \text{หรือ} \quad \sigma_L = \frac{PD}{4t} \end{aligned}$$

เมื่อ t = ความหนาของผนัง

r = รัศมีเฉลี่ยของทรงกระบอกกลาง

σ_L = ความเค้นที่เกิดตามแนวยาว

P = ความดันที่เกิดขึ้นในภาชนะอัดความดัน

L = ความยาวของทรงกระบอกกลาง

หมายเหตุ

1. แรงที่กระทำตามแนวความยาวจะทำให้เกิดความเค้นตามแนวยาว σ_L เป็นแรงที่ทำให้ทรงกระบอกกลางขาดตามเส้นรอบวงนั้น
2. แรงที่ทำให้เกิดความเค้นตามแนวเส้นรอบวงนั้นจะทำให้ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง เป็นแรงที่ทำให้ทรงกระบอกขาดตามแนวความยาวนั้น
3. ความเค้นตามแนวยาวและความเค้นตามแนวเส้นรอบวงจะกระทำตักฉากซึ่งกันและกัน
4. ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงจะมีค่าเป็นสองเท่าของความเค้นตามแนวยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.3 ความเค้นจากความดันภายในสำหรับท่อที่มีความหนา (Thick cylinders Stresses due to internal pressures)

สำหรับท่อที่มีความหนา วิธีการในส่วนก่อนหน้านี้อาจไม่เหมาะสม แก้ไขโดยการพิจารณาแกนสมมาตรเกี่ยวกับแกน z และแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของความเค้นความเค้นในพิกัดเชิงขั้ว



รูปที่ 2.11 stress เมื่อมี internal pressure

โดยมีสูตร

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(-\frac{r_o^2}{r^2} + 1 \right)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(\frac{r_o^2}{r^2} + 1 \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การประเมินอายุการใช้งาน

การประเมินอายุใช้งานที่เหลือของชิ้นส่วนหรือโครงสร้างมีประโยชน์หลายประการ เช่น ช่วยให้ทราบว่า การปรับเปลี่ยนสภาวะทำงานของชิ้นส่วนมีผลอย่างไรต่ออายุการใช้งานที่เหลือ และช่วยจัดกำหนด การซ่อมบำรุงที่เหมาะสม (ไม่ถึงจนทำให้โรงงานสูญเสียจากการหยุดการทำงาน หรือไม่ห่างจนเกิดความเสียหายระหว่างกำหนดการซ่อมบำรุง) เป็นต้น

2.9 ทฤษฎีหม้อไอน้ำ (Boiler Theory)

น้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำที่อุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันในหม้อไอน้ำ และหลังจากให้ความร้อนทำให้ระเหยกลายเป็นไอ ความร้อนที่ได้จากการสันดาปมีอุณหภูมิสูง หลังจากถ่ายเทความร้อนให้แก่แล้วก็จะมียุณหภูมิที่ต่ำกว่า และเป็นก๊าซไอเสียออกที่ปล่องควัน จะพบว่าความแตกต่างทั้ง 2 อุณหภูมินี้มีมาก และอุณหภูมิแตกต่างกันนี้คือความร้อนที่ถ่ายเทให้แก่ น้ำ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้ำได้รับขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายค่า เช่น พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อน ความแตกต่างของอุณหภูมิ และค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ เป็นต้น

2.9.1 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

หม้อไอน้ำชนิดนี้เหมาะสำหรับการผลิตไอน้ำในอัตราและความดันสูง (ระบบใหญ่) การทำไอน้ำอาศัยหลักการง่ายๆ คือให้น้ำไหลในท่อและถังพักไอ และให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีการพาและการนำความร้อนจากผนังเตาหรือห้องสันดาป และเมื่อน้ำได้รับความร้อนก็จะระเหยกลายเป็นไอน้ำ

2.10 คุณสมบัติ SA-515 Grade 70

ALLOWABLE STRESS IN TENSION FOR CARBON AND LOW-ALLOY STEEL						
Spec No.	Grade	Nominal Composition	P-No.	Group No.	Min. Yield (ksi)	Min. Tensile (ksi)
Carbon Steel Plates and Sheets						
SA-515	55	C-Si	1	1	30	55
	60	C-Si	1	1	32	60
	65	C-Si	1	1	35	65
	70	C-Si	1	2	38	70

รูปที่ 2.12 คุณสมบัติ SA-515 Grade 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 คุณสมบัติ SA213-T22

Chemical Composition(%) for ASTM A213 T22 Low Alloy Steel

UNS Designation	K21590
Carbon	0.05–0.15
Manganese	0.30–0.60
Phosphorus	0.025
Sulfur	0.025
Silicon	0.50
Nickel	...
Chromium	1.90-2.60
Molybdenum	0.87–1.13

Mechanical properties for ASTM A213 T22 Low Alloy Steel

Tensile strength(min)	415Mpa
Yield strength(min)	220Mpa
Elongation	30%
Delivery condition	annealed

รูปที่ 2.13 คุณสมบัติ SA213-T22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

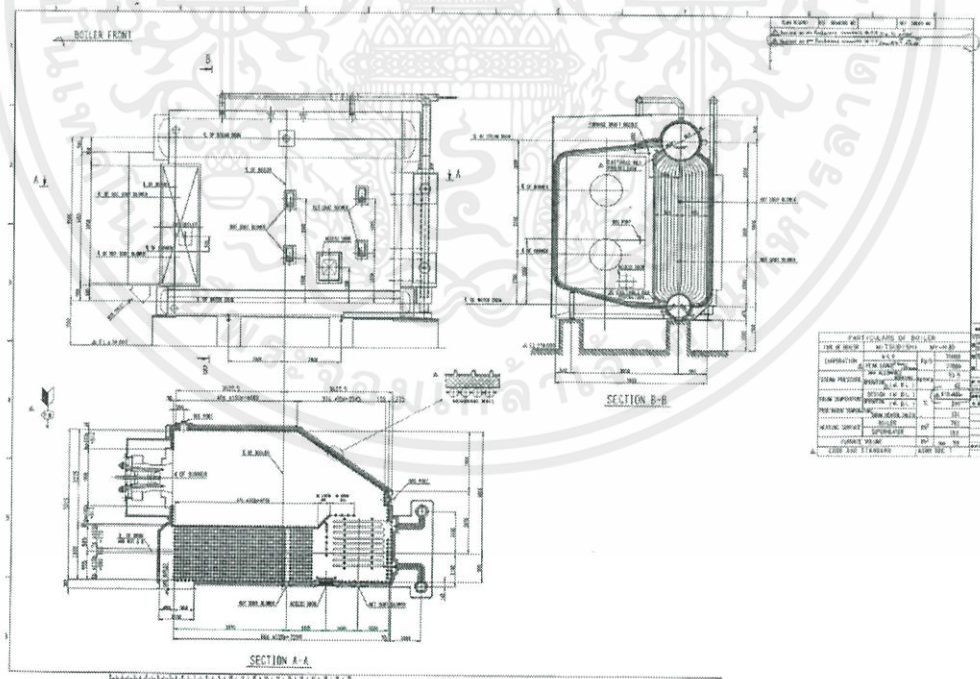
ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและการอธิบายถึงการจำลองการไหลของอากาศและการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านท่อ Superheater นอกเหนือจากความเข้าใจพื้นฐานทางการคำนวณ เรายังต้องศึกษาทำความเข้าใจการคำนวณเชิงตัวเลข เพราะว่าเป็นเครื่องมือสำคัญในการหาคำตอบในงานวิจัยนี้ โดยขั้นตอนการดำเนินการวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องตลอดจนแนวคิดและจุดประสงค์ของการวิจัย
2. จัดเตรียมข้อมูล และศึกษาวิธีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ออกแบบชิ้นส่วนท่อ Superheater ให้ตรงตามรูปร่างและคุณลักษณะตามแบบที่ได้มาจากแหล่งอ้างอิง
4. เปรียบเทียบผลลัพธ์จากโปรแกรม กับ งานวิจัยของ P V Burkov^[3]
5. ทำการวิเคราะห์การไหลของอากาศ แรงดัน ที่ไหลอยู่ในท่อโดยใช้ระเบียบทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (MSC software) และตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบกับการวิเคราะห์ที่ใช้ทฤษฎี การพัฒนาการคำนวณเชิงตัวเลข
6. วิเคราะห์ความหนาของท่อที่หายไปโดยความเค้นเทียบกับเวลา เพื่อเปรียบเทียบความเค้นตามแนวเส้น รอบวงก
7. ทำการวิเคราะห์ บันทึกข้อมูล และสรุปผลของการวิจัย

3.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

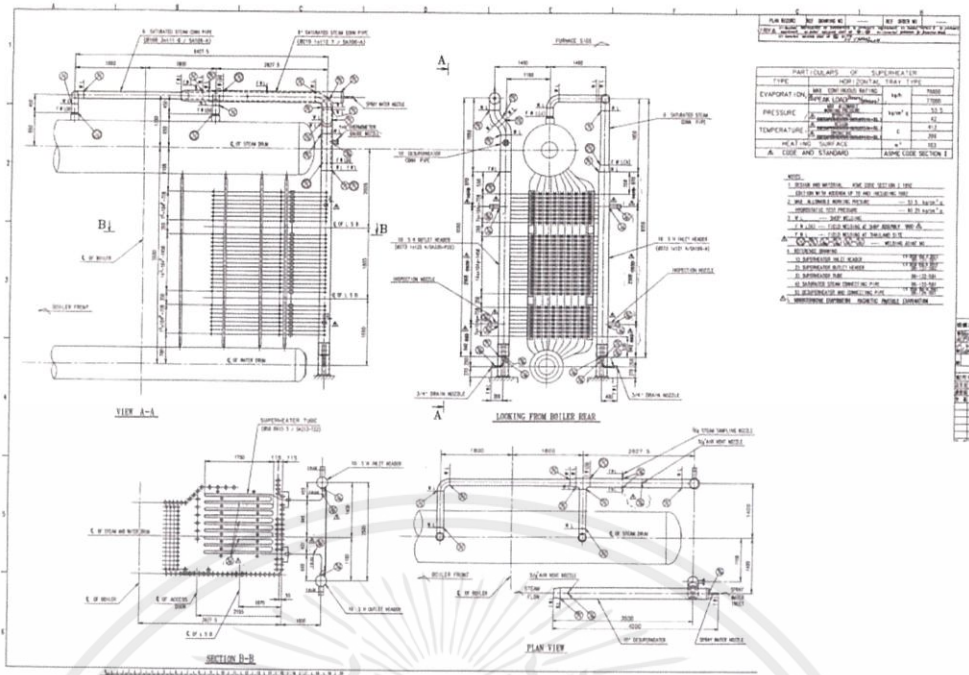
การพัฒนาการคำนวณเชิงตัวเลขได้เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการพัฒนาคอมพิวเตอร์ ในปี ค.ศ. 1930 ได้มีการพัฒนาระเบียบวิธีการคำนวณเพื่อการจำลองการไหลรอบๆ ทรงกระบอกไปจนถึงการไหลผ่านปีกเครื่องบิน ในขณะนั้นจะใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Methods, FDM) และระเบียบวิธีมูลฐาน (Finite Element Methods, FEM) ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานในการหาผลเฉลยของอนุพันธ์ย่อย (Partial Difference Equations, PDE) ซึ่งเป็นที่นิยมในการใช้สำหรับการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในต่อมาได้มีรวบรวมนำเอาองค์ความรู้ทางระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐานเข้าด้วยกัน เรียกว่า ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Methods, FVM) ทำให้มีโครงสร้างที่สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น และยังมีความแม่นยำที่สูง จึงเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

3.3 แบบจำลองของ Superheater

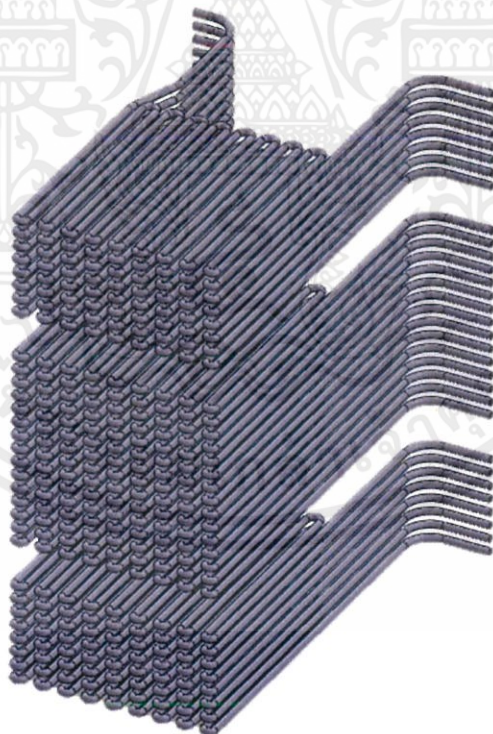


รูปที่ 3.1 แบบ General Arrangement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แบบ Super heater

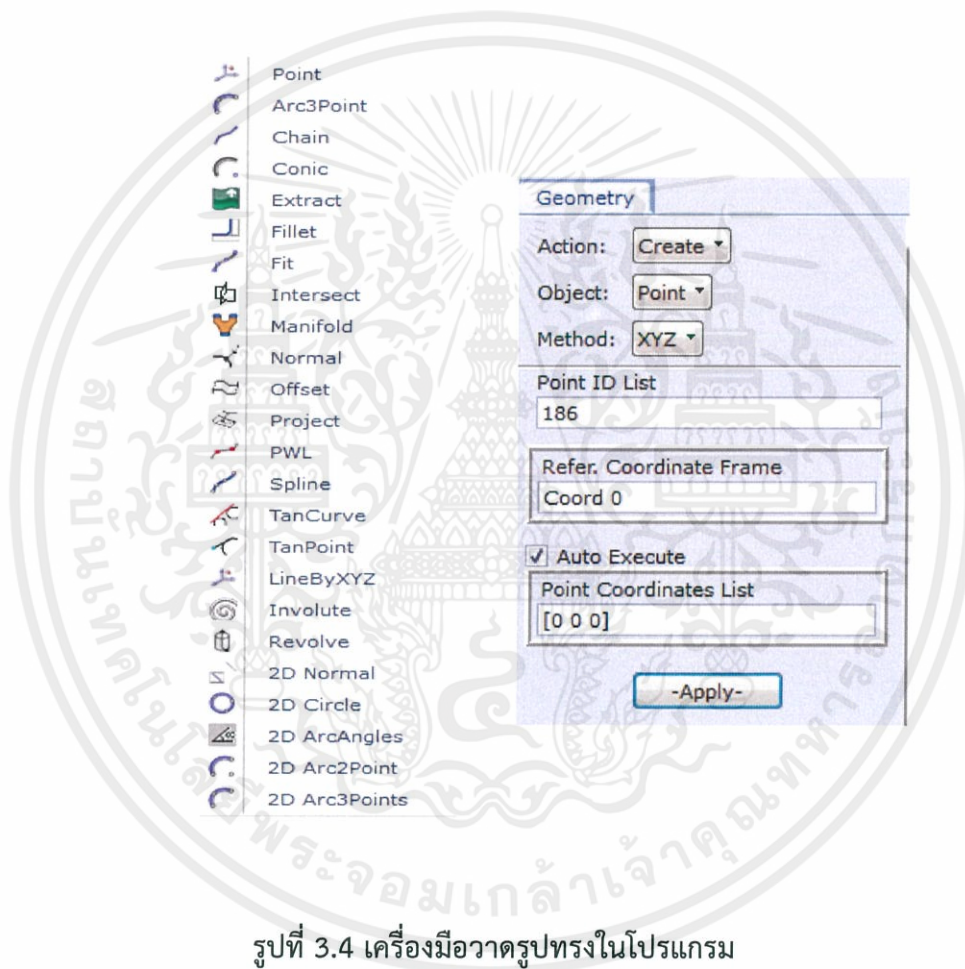


รูปที่ 3.3 Superheater ที่วาดโดย solidworks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

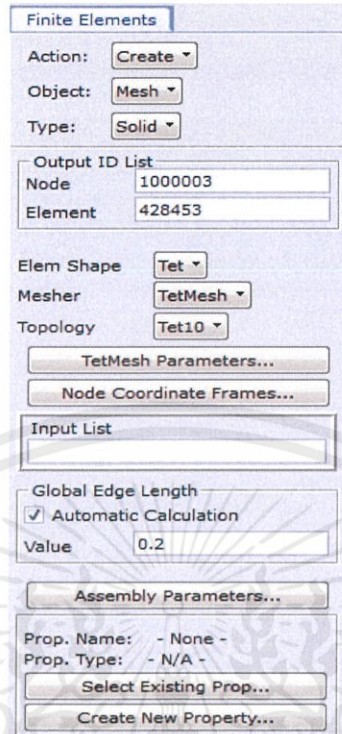
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 ทำการวิเคราะห์อัตราการใช้ไฟและ การใส่แรงดันโดยใช้โปรแกรม MSC Software เพื่อให้ผู้เขียนมีความเข้าใจและสามารถตรวจสอบการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ว่ามีความเชื่อถือได้หรือไม่ โดยค่าเงื่อนไขขอบเขตและโหลดที่กระทำได้ข้อมูลมาจากแหล่งอ้างอิง ภายในโปรแกรมสามารถวาดรูปโดยใช้เครื่องมือที่โปรแกรมมี สามารถดูได้จากภาพที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องมือวาดรูปทรงในโปรแกรม

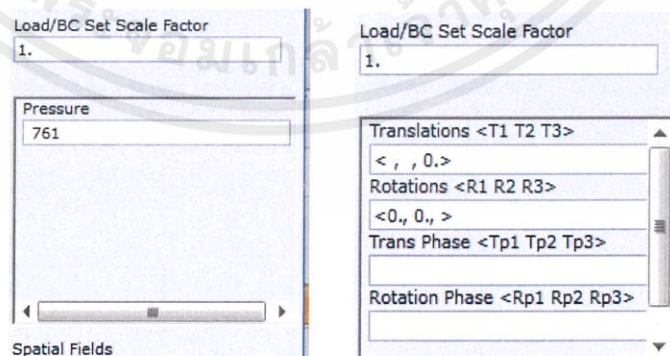
3.4.2 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นงานย่อยเพื่อใช้ในการคำนวณหาคำตอบในการศึกษานี้ได้ใช้การแบ่งชิ้นงาน ออกเป็นชิ้นงานย่อยได้หลายรูปแบบแต่ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้รูปทรงสามเหลี่ยมทรงสี่หน้า (Tetrahedron) และสามารถหาการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งในขั้นตอนนี้มีการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม (Mesh Independence) เพื่อช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์และใช้พื้นที่ของหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์น้อยกว่า



รูปที่ 3.5 แสดงการเลือกลักษณะและกำหนดขนาดของ เอลิเมนต์

3.4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของแบบจำลอง

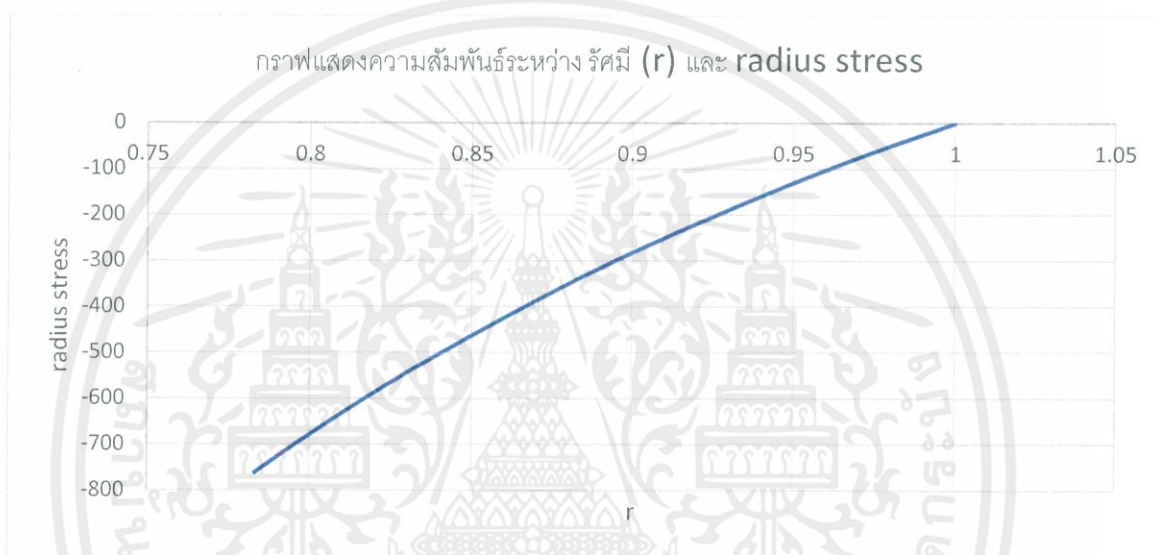
การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เป็นการกำหนดเงื่อนไขของการสร้างแบบจำลองในแต่ละด้านประกอบด้วย การกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของท่อเมื่อได้รับความดันและการกำหนดพื้นที่ที่จะได้รับความดัน ดังแสดงในรูป 3.6



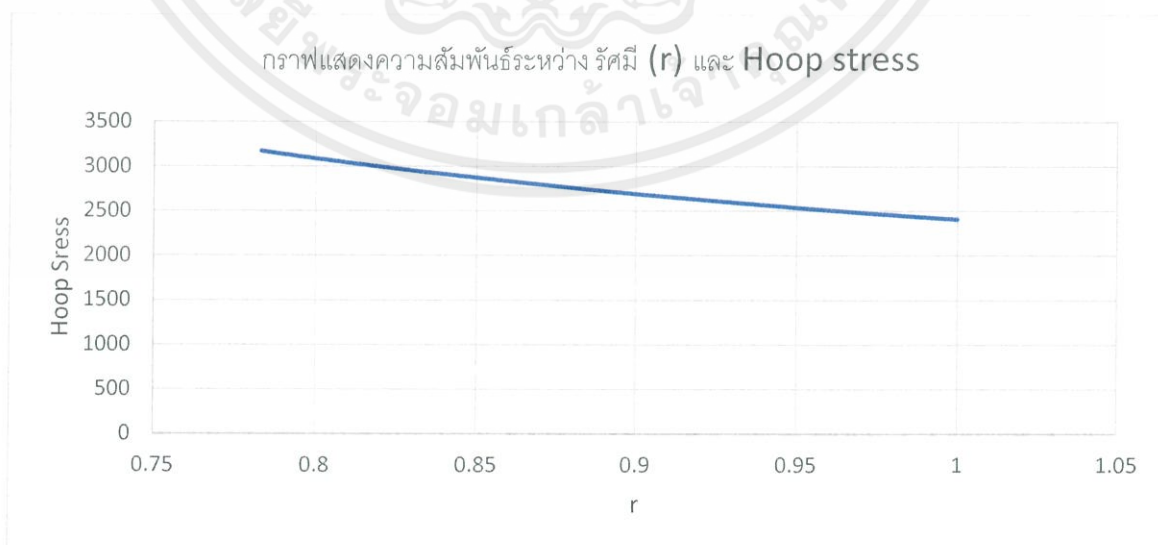
รูปที่ 3.6 การกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่และการกำหนดความดันที่ใช้ในท่อ

3.5 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข

ก่อนที่จะนำแบบจำลองเชิงตัวเลขไปใช้ในการหาคำตอบในการทดลอง จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมจำลองเชิงตัวเลขก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำถูกต้อง โดยเลือกเปรียบเทียบการสูตรการคำนวณ thick wall stress disturbance จาก 2.7.1.3 ได้ผลลัพธ์ ดังรูป 3.7 และ รูปที่ 3.8



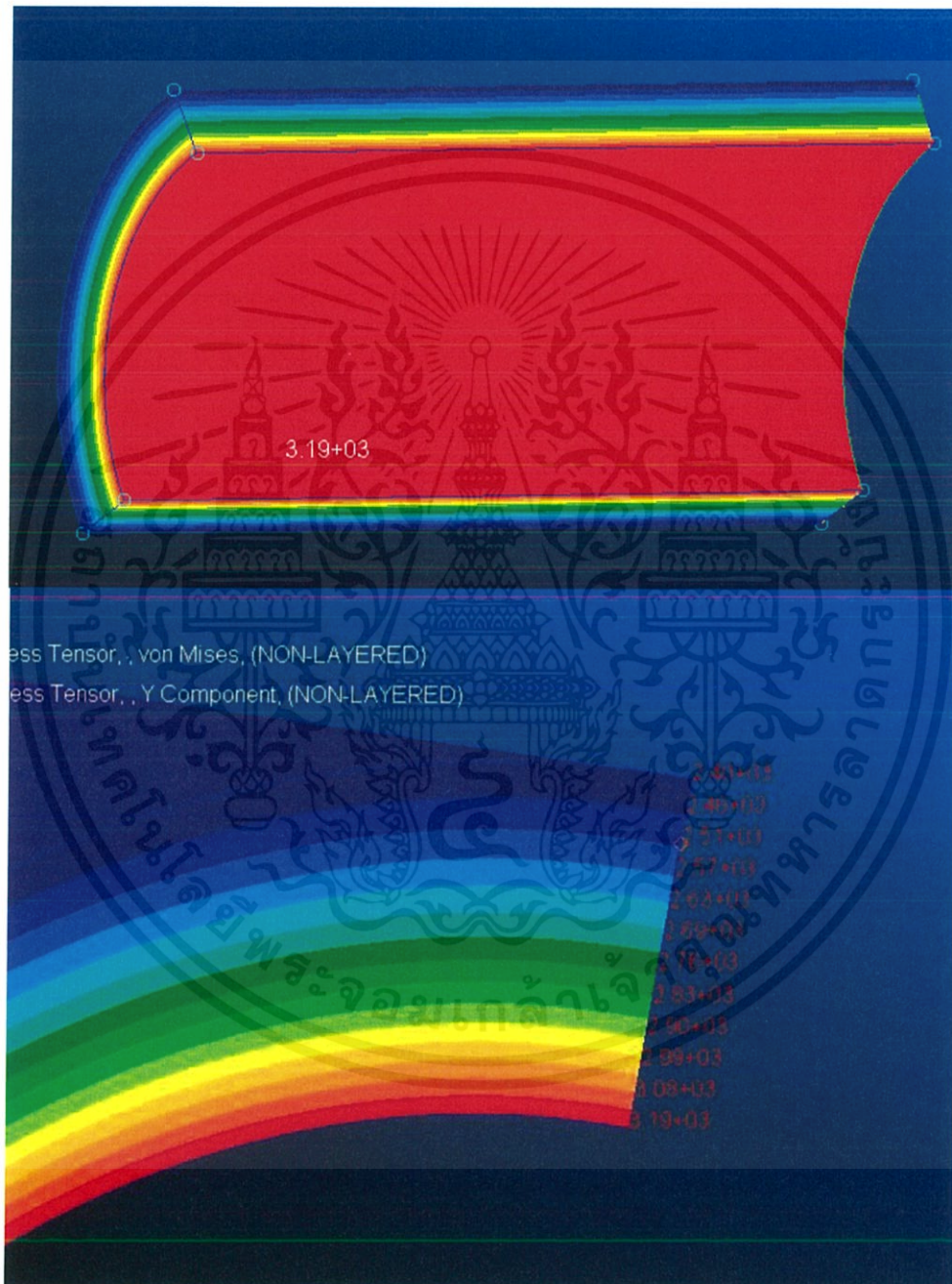
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมี (r) และ radius stress



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมี (r) และ Hoop stress

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจำลองเชิงตัวเลขจากโปรแกรม ได้ผลลัพธ์ค่า Hoop stress คือ 3192.4 psi ดังรูป 3.9 และ 3.10



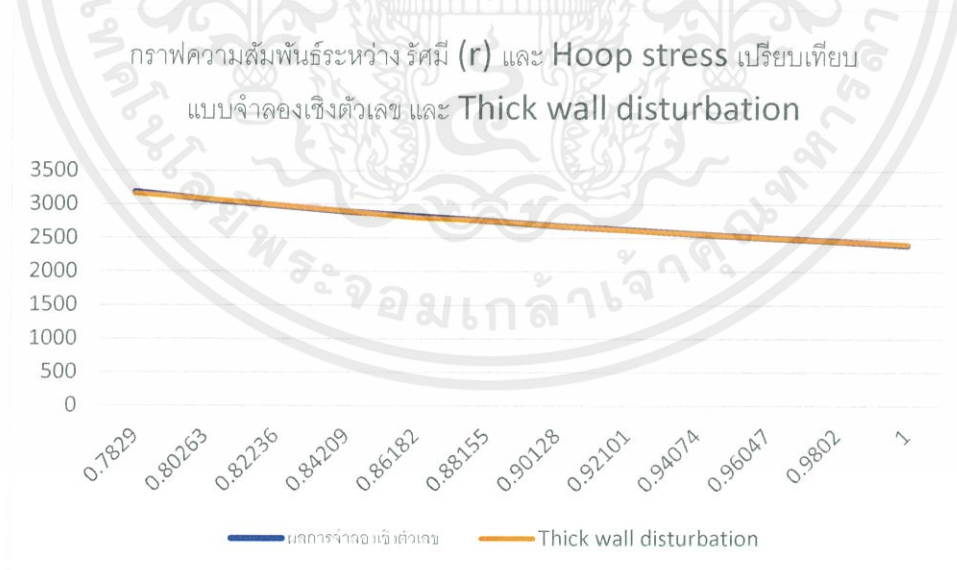
รูปที่ 3.9 แสดงผลลัพธ์ของการจำลองเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมี (r) และ Hoop stress ของการจำลองเชิงตัวเลข

ซึ่งการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและสูตรการคำนวณ thick wall stress disturbance จาก 2.7.1.3 พบว่าแบบจำลองจากผลการจำลองเชิงตัวเลข ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับสูตรการคำนวณ thick wall stress disturbance ดังนั้นผลการจำลองเชิงตัวเลข สามารถนำมาใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมี (r) และ Hoop stress เปรียบเทียบผลการจำลองเชิงตัวเลข และ Thick wall disturbance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

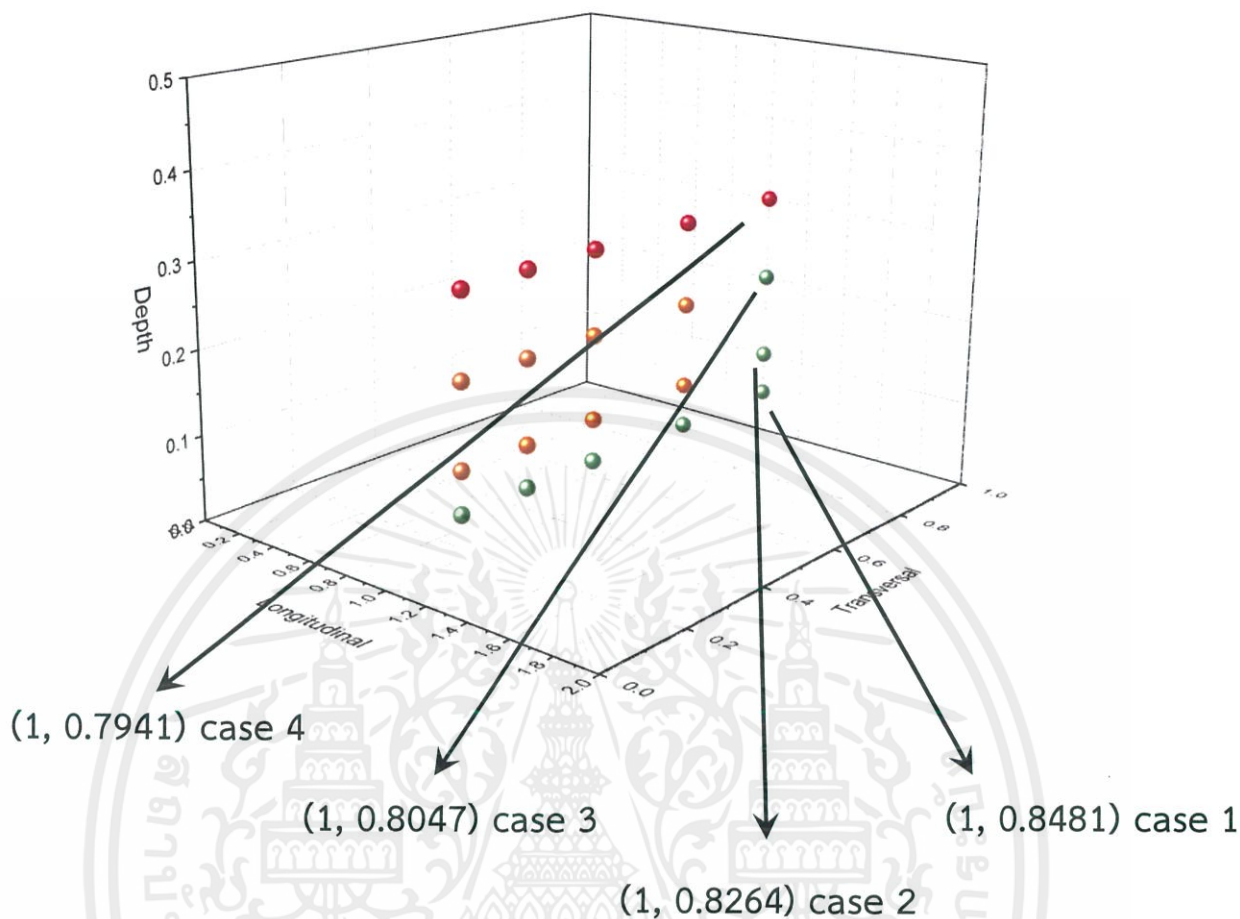
ผลการทดลอง

การนำท่อ superheater ขนาด 1 นิ้ว เข้าสู่วิธีการไฟไนน์เอลิเมนต์ ไปตรวจสอบหาความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (Hoop or circumferential stress) โดยผู้ทำการทดลอง ได้ทำการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับรูปทรงนี้ จึงได้ทำการทดลองทั้งหมด 60 รูปแบบ โดยเริ่มต้นจากมุม 360, 270, 180, 120 และ 60 องศา ในแต่ละมุมจะมีความแตกต่างของความลึก(Z) ทั้งหมด 4 ค่า ได้ผลการทดลองดังนี้

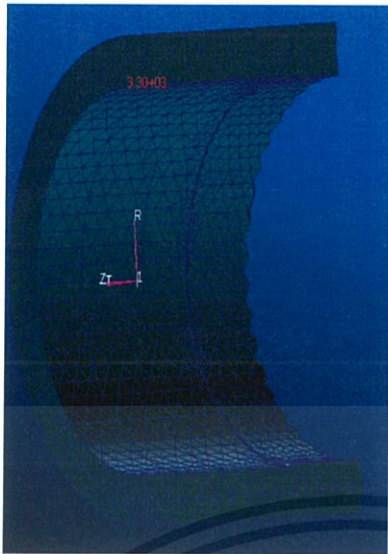
4.1 ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 360 องศา

case	X (Longitudinal , In)	Z (Depth , In)	Allowable stress	คำนวณด้วย สมการ	คำนวณจากทาง คอมพิวเตอร์
1.	1	0.7941	4029	3354.714	3105.5
2.	1	0.8047	4029	3557.246	3246.25
3.	1	0.8264	4029	4039.307	3790
4.	1	0.8481	4029	4660.649	4528

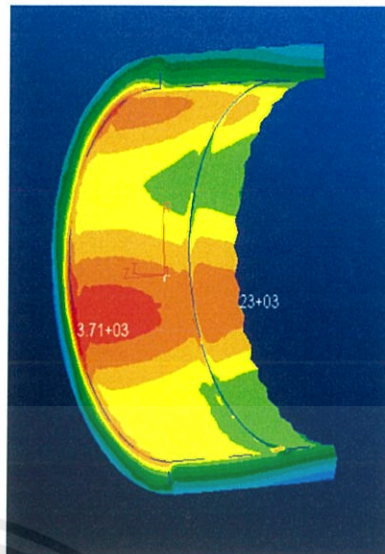
ตารางที่ 4.1 แสดงผลลัพธ์ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 360 องศา



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal, Transversal และ Depth ของรอยการกัดกร่อนที่ 360 องศา



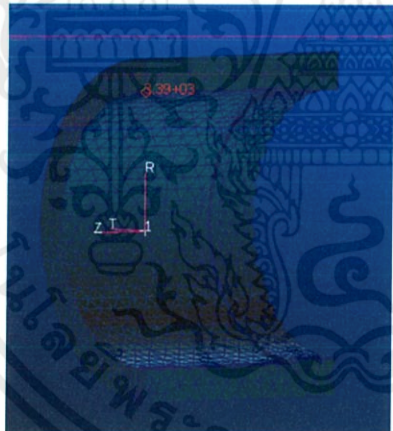
(a)



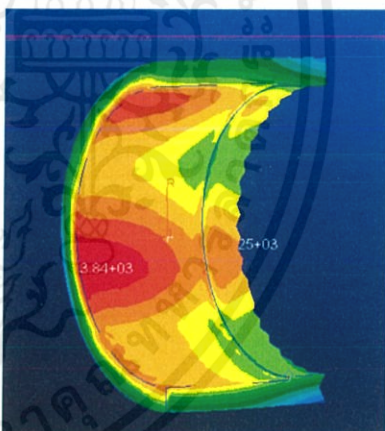
(b)

รูปที่ 4.1a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 360 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case1)

4.1b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 360 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case1)



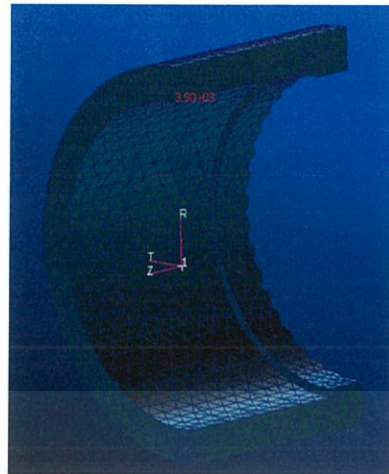
(a)



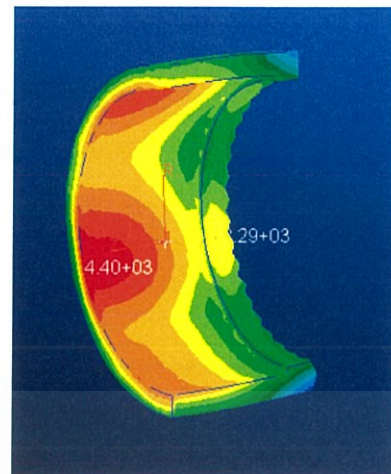
(b)

รูปที่ 4.2a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case2)

4.2b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case2)



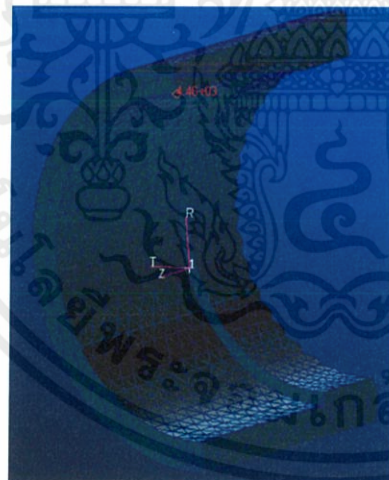
(a)



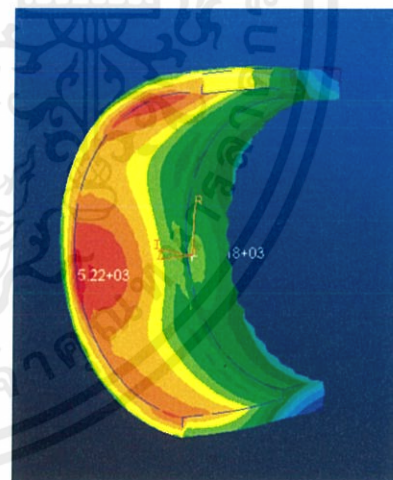
(b)

รูปที่ 4.3a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case3)

4.3b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case3)



(a)



(b)

รูปที่ 4.4a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case4)

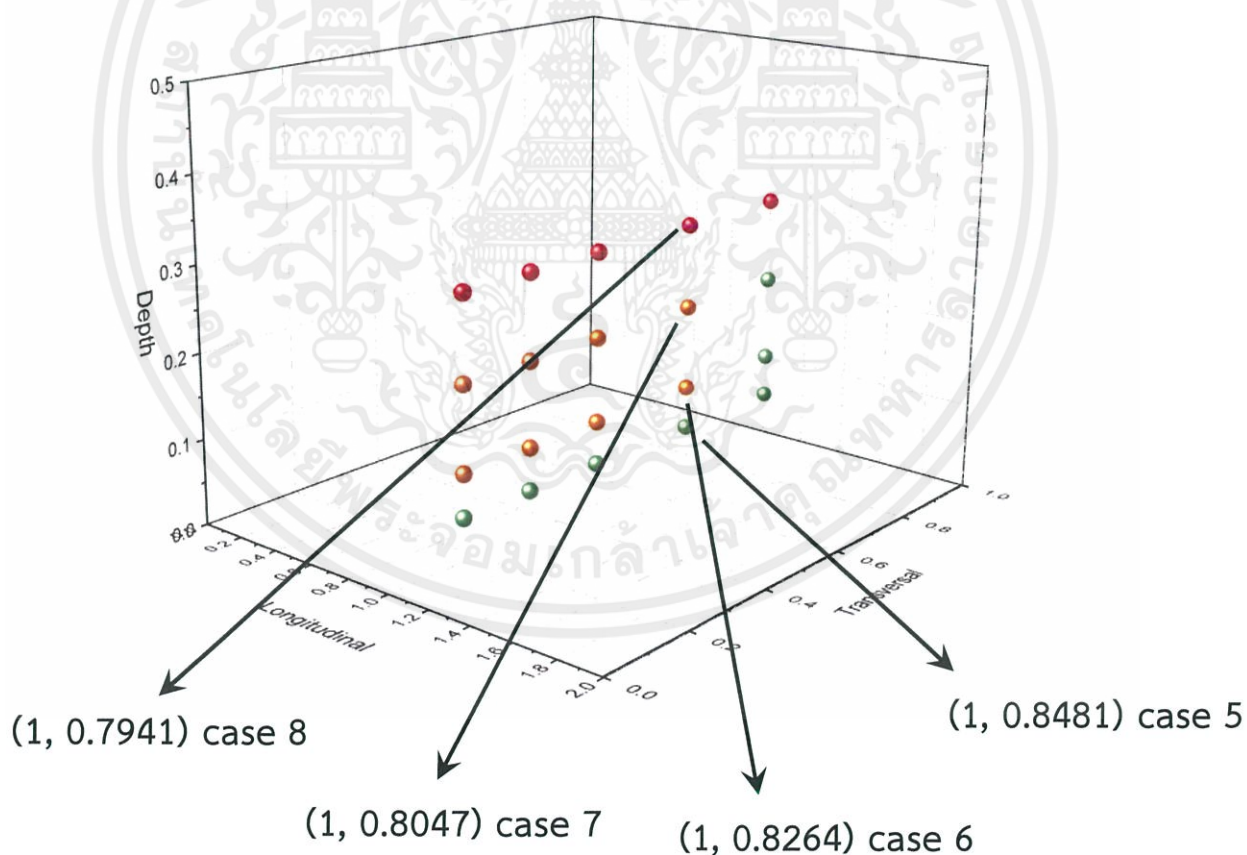
4.4b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 360 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

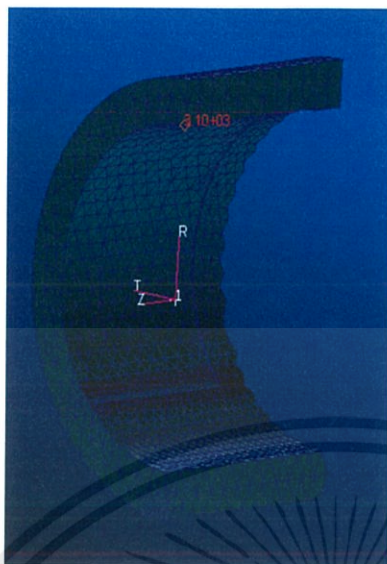
4.2 ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 270 องศา

case	X (Longitudinal , In)	Z (Depth , In)	Allowable stress	คำนวณด้วย สมการ	คำนวณจากทาง คอมพิวเตอร์
5.	1	0.7941	4029	3354.714	3156.5
6.	1	0.8047	4029	3557.246	3465
7.	1	0.8264	4029	4039.307	3975
8.	1	0.8481	4029	4660.649	4825

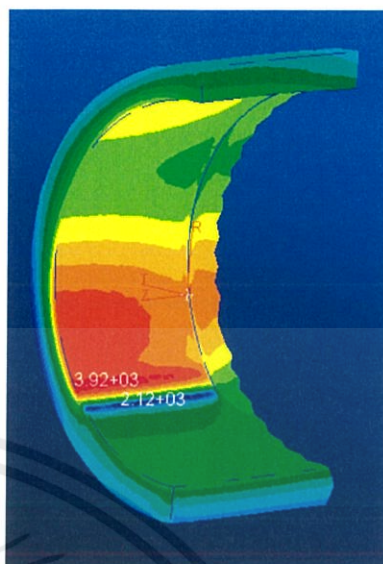
ตารางที่ 4.2 แสดงผลลัพธ์ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 270 องศา



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal, Transversal และ Depth ของรอยการกัดกร่อนที่ 270 องศา



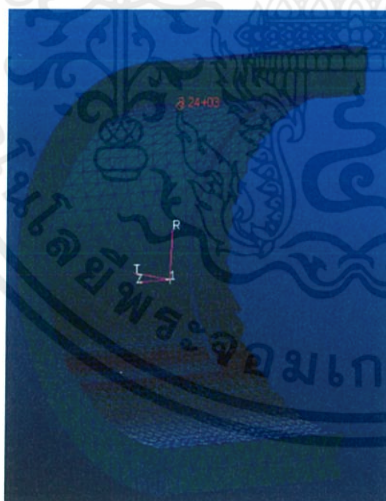
(a)



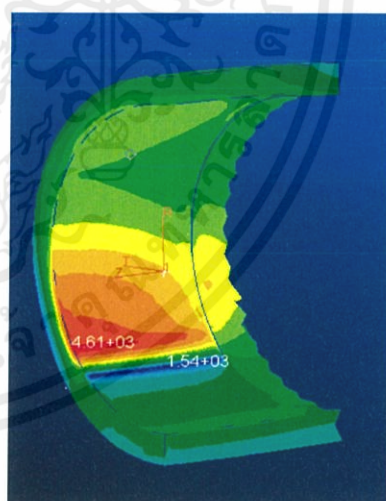
(b)

รูปที่ 4.5a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 270 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case5)

4.5b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 270 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว
(case5)



(a)

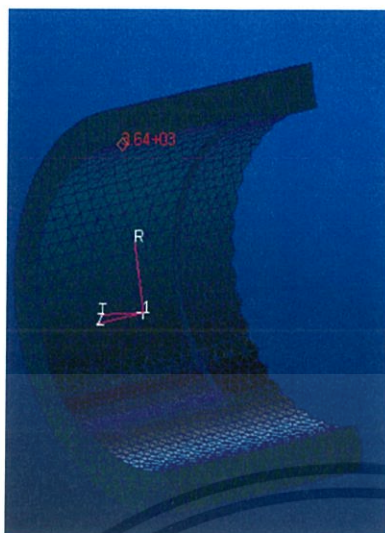


(b)

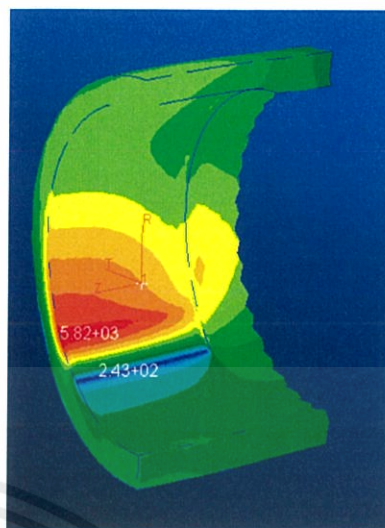
รูปที่ 4.6a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case6)

4.6b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว
(case6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



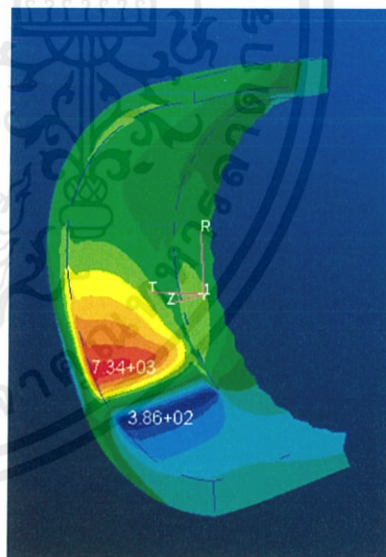
(b)

รูปที่ 4.7a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case7)

4.7b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case7)



(a)



(b)

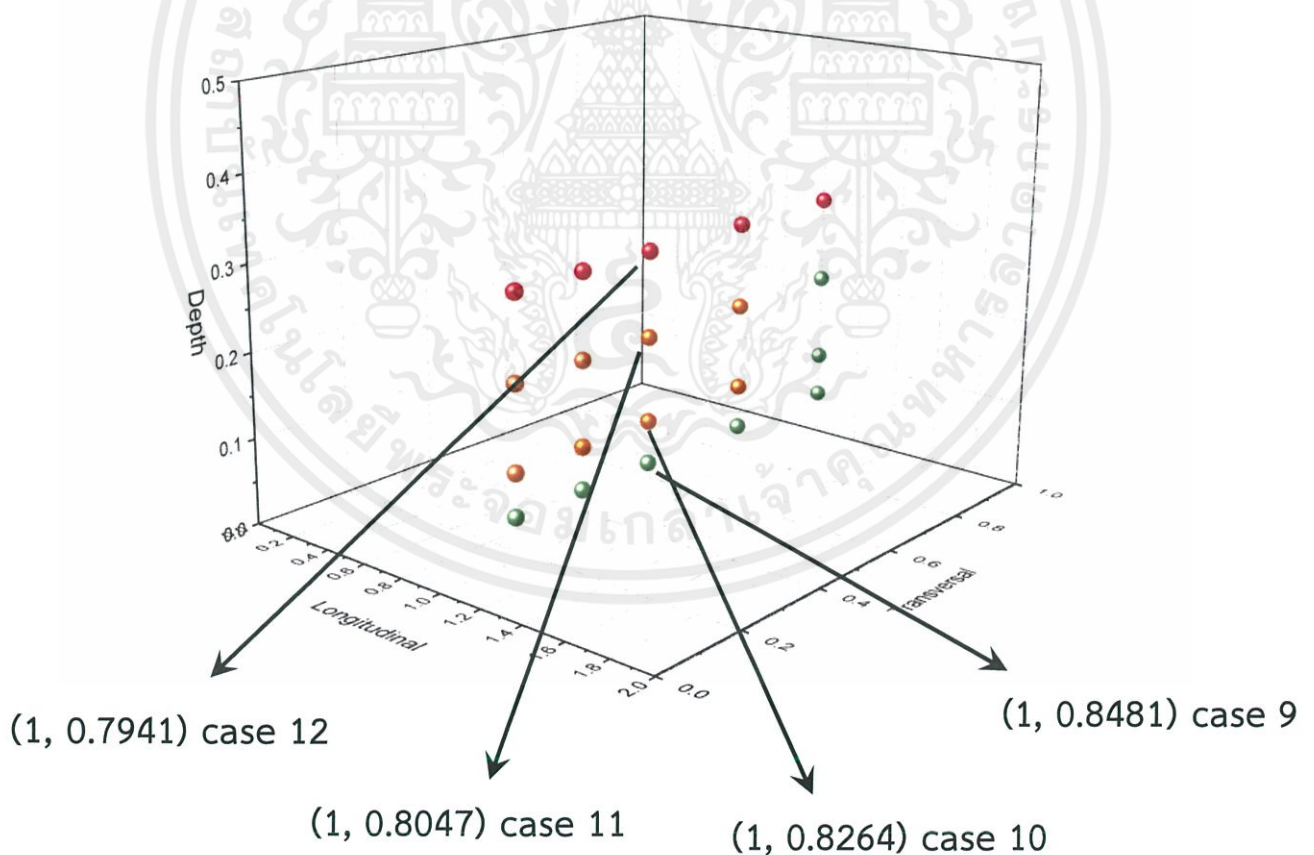
รูปที่ 4.8a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case8)

4.8b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 270 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case8)

4.3 ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 180 องศา

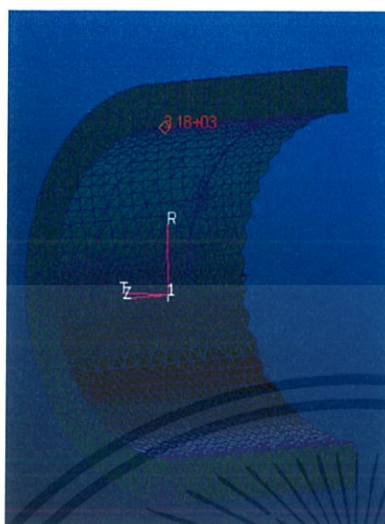
case	X (Longitudinal , In)	Z (Depth , In)	Allowable stress	คำนวณด้วย สมการ	คำนวณจากทาง คอมพิวเตอร์
9.	1	0.7941	4029	3354.714	3205
10.	1	0.8047	4029	3557.246	3407.45
11.	1	0.8264	4029	4039.307	3935.45
12.	1	0.8481	4029	4660.649	4878

ตารางที่ 4.3 แสดงผลลัพธ์ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 180 องศา

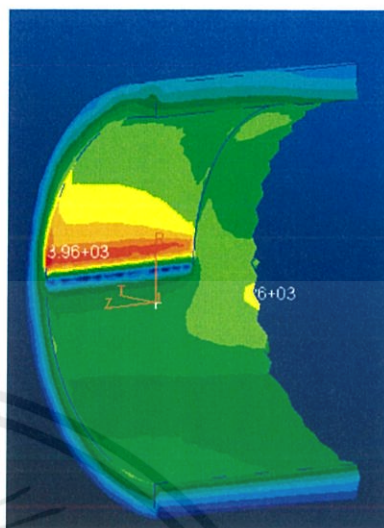


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal, Transversal และ Depth ของรอยการกัดกร่อนที่ 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

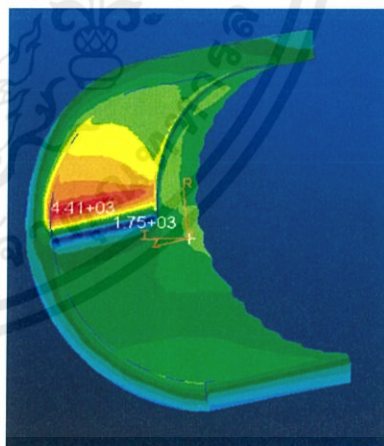
รูปที่ 4.9a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 180 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case9)

4.9b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 180 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว

(case9)



(a)



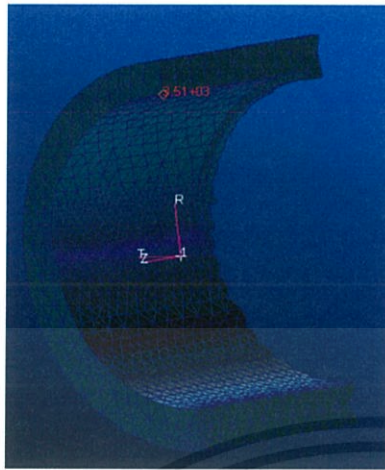
(b)

รูปที่ 4.10a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case10)

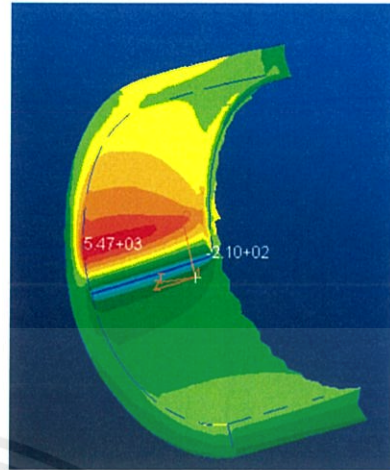
4.10b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว

(case10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



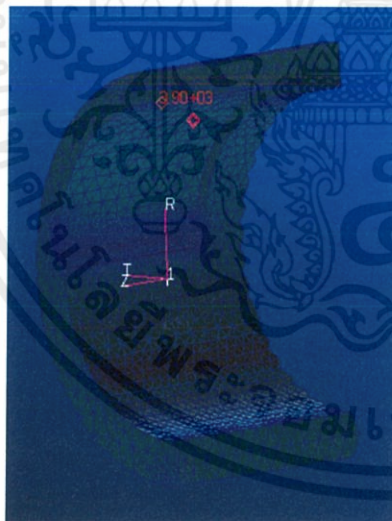
(a)



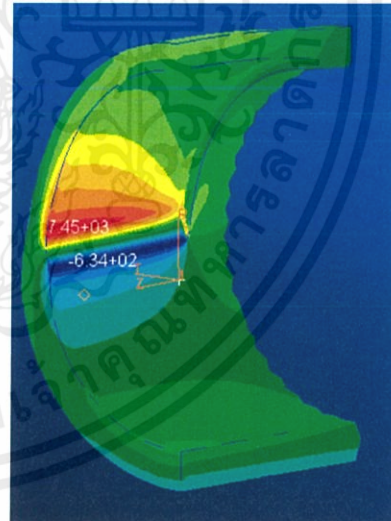
(b)

รูปที่ 4.11a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case11)

4.11b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case11)



(a)



(b)

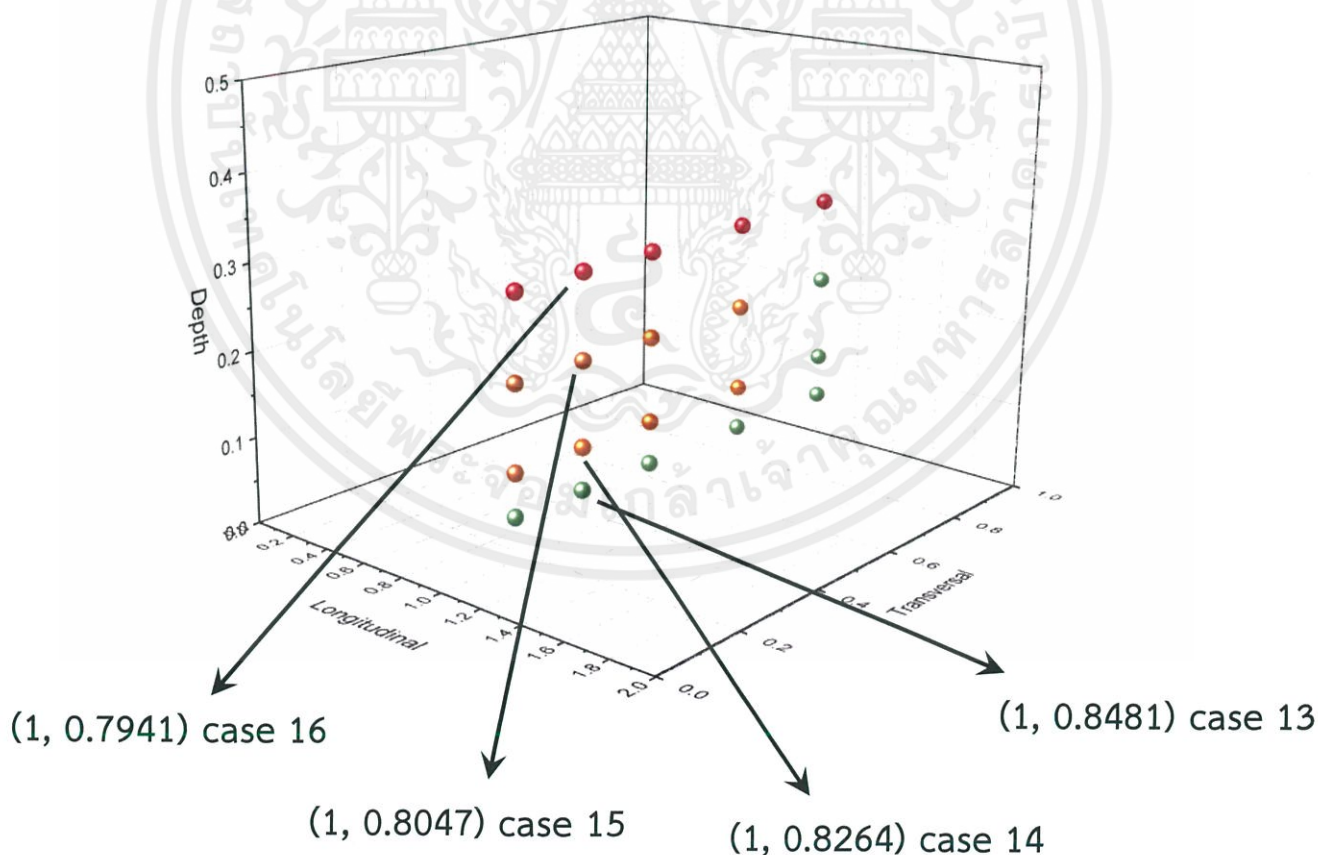
รูปที่ 4.12a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case12)

4.12b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 180 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case12)

4.4 ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 120 องศา

case	X (Longitudinal , In)	Z (Depth , In)	Allowable stress	คำนวณด้วย สมการ	คำนวณจากทาง คอมพิวเตอร์
13.	1	0.7941	4029	3354.714	3175.4
14.	1	0.8047	4029	3557.246	3582.35
15.	1	0.8264	4029	4039.307	4025.1
16.	1	0.8481	4029	4660.649	4537.55

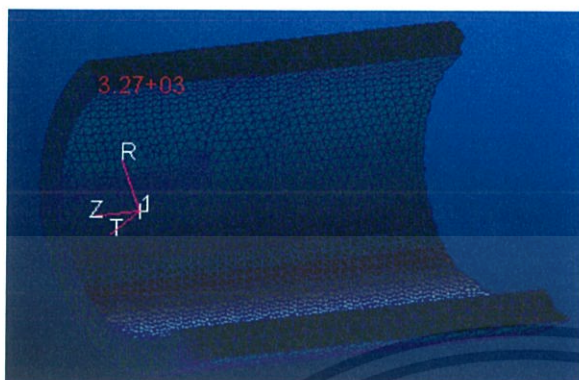
ตารางที่ 4.4 แสดงผลลัพธ์ที่มุมมองการเกิดรอยการกัดกร่อน 120 องศา



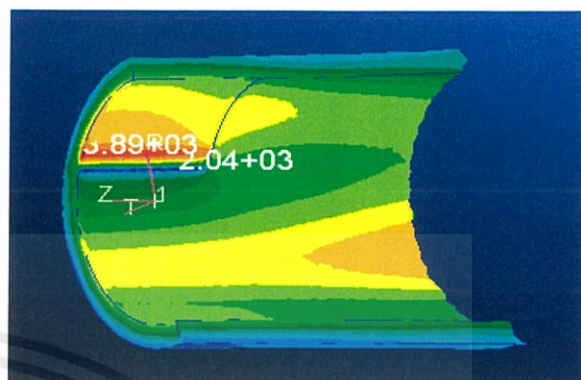
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal, Transversal และ Depth ของรอยการ

กัดกร่อนที่ 120 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



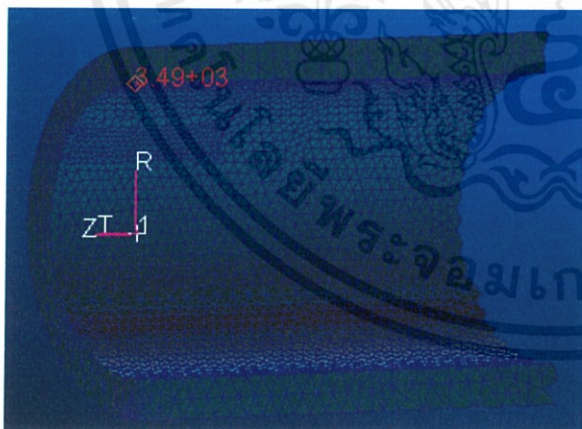
(a)



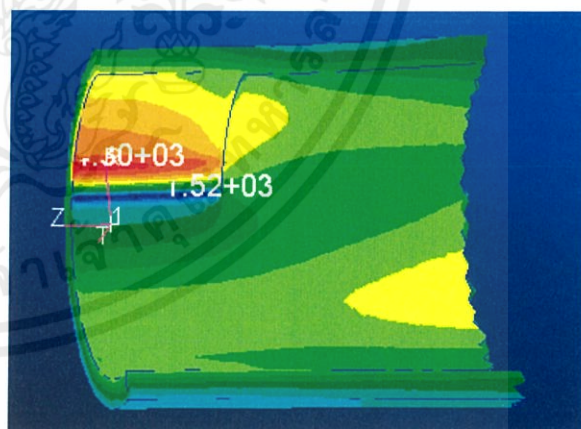
(b)

รูปที่ 4.13a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 120 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case13)

4.13b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 120 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว
(case13)



(a)



(b)

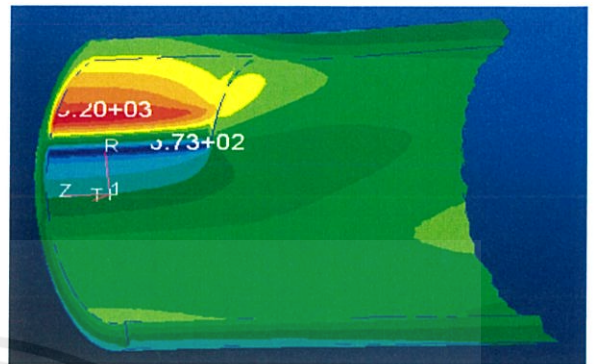
รูปที่ 4.14a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case14)

4.14b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว
(case14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



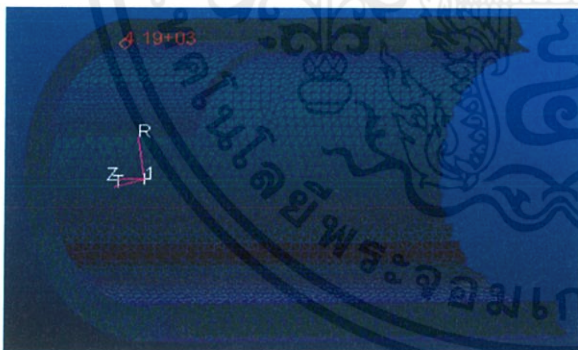
(a)



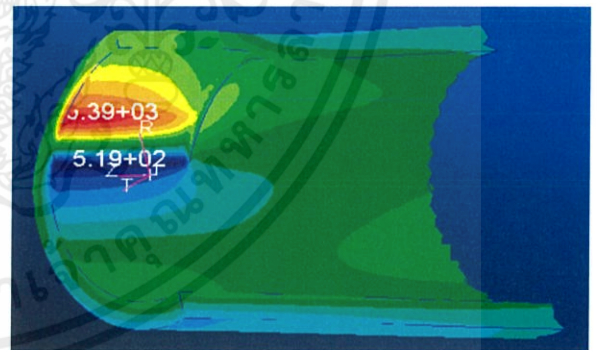
(b)

รูปที่ 4.15a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case15)

4.15b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว
(case15)



(a)



(b)

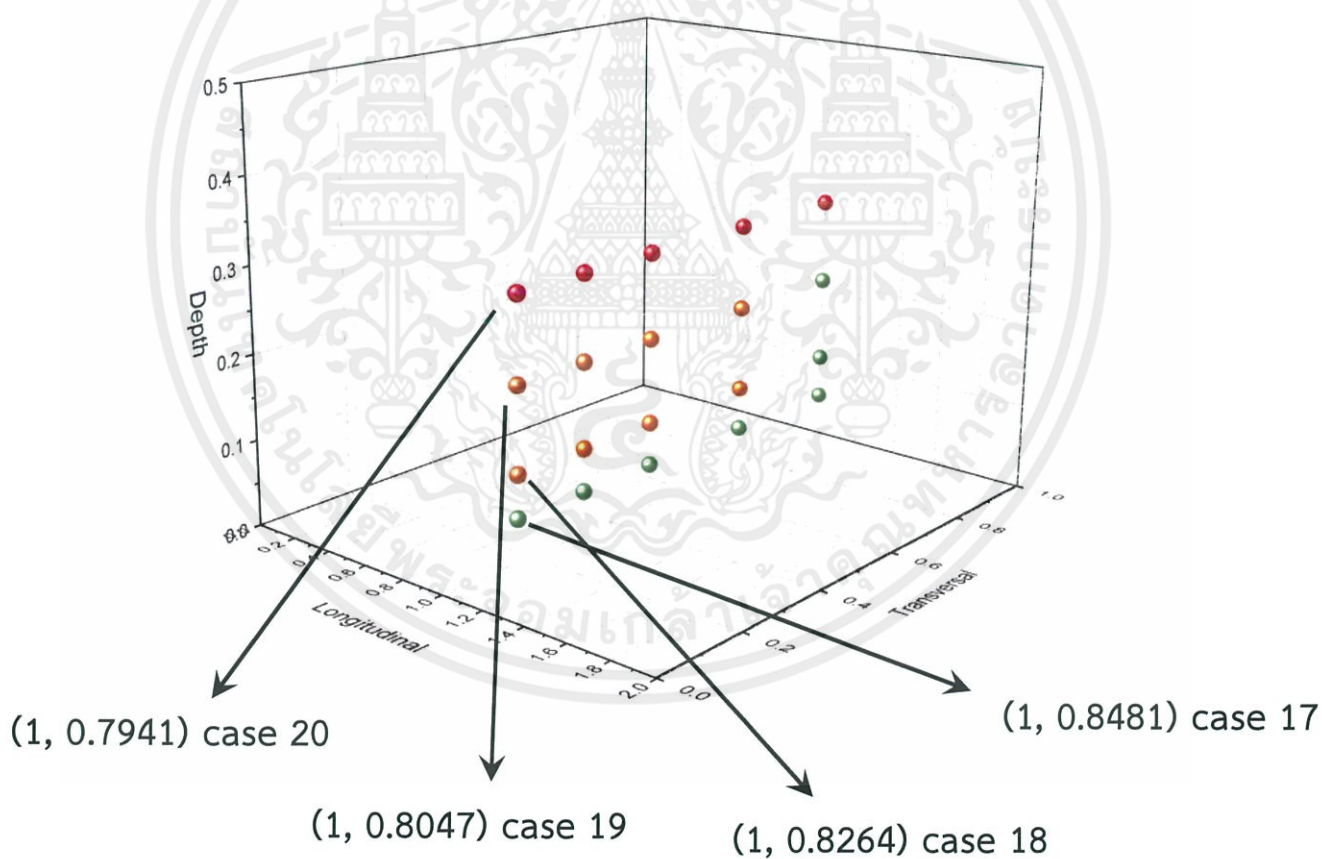
รูปที่ 4.16a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case16)

4.16b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 120 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว
(case16)

4.5 ที่มุมมองจากการเกิดรอยการกัดกร่อน 60 องศา

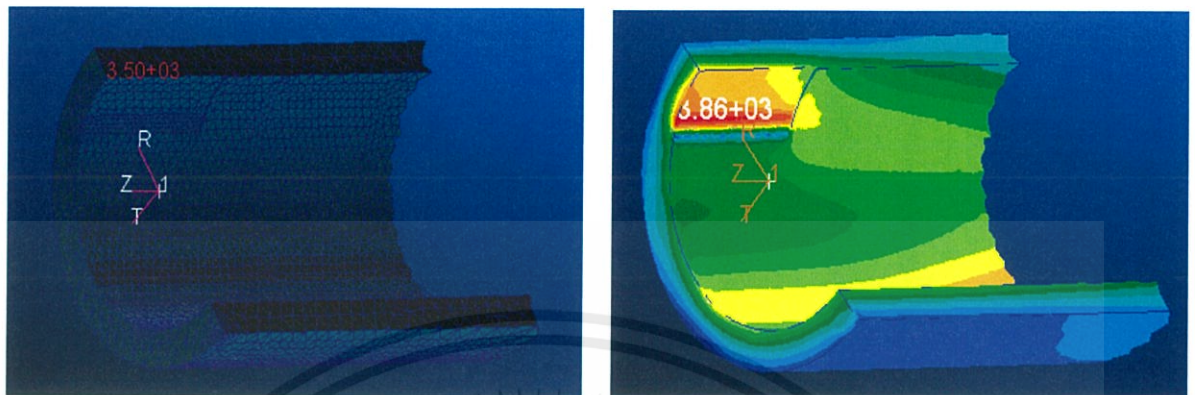
case	X (Longitudinal , In)	Z (Depth , In)	Allowable stress	คำนวณด้วย สมการ	คำนวณจากทาง คอมพิวเตอร์
17.	1	0.7941	4029	3354.714	3195.2
18.	1	0.8047	4029	3557.246	3440
19.	1	0.8264	4029	4039.307	3795
20.	1	0.8481	4029	4660.649	4550.55

ตารางที่ 4.5 แสดงผลลัพธ์ที่มุมมองจากการเกิดรอยการกัดกร่อน 60 องศา



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal, Transversal และ Depth ของรอยการกัดกร่อนที่ 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

รูปที่ 4.17a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 60 องศา ความลึก 0.7941 นิ้ว (case17)

4.17b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 60 องศา ความลึก 0.79741 นิ้ว
(case17)



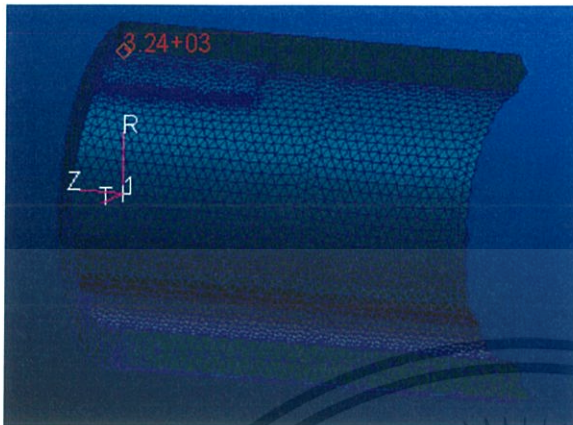
(a)

(b)

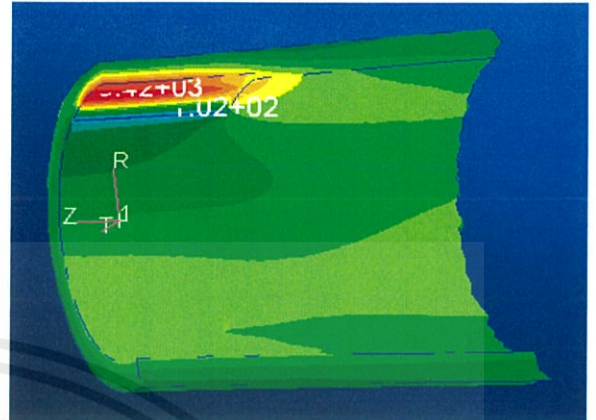
รูปที่ 4.18a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว (case18)

4.18b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8047 นิ้ว
(case18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

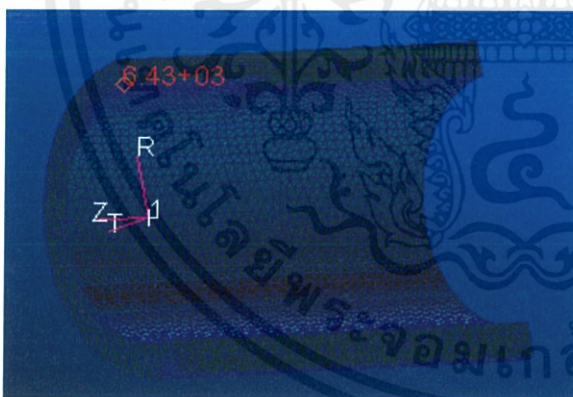


(b)

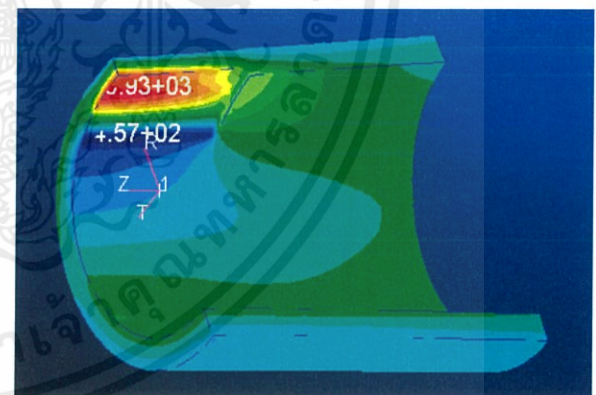
รูปที่ 4.19a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว (case19)

4.19b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8264 นิ้ว

(case19)



(a)



(b)

รูปที่ 4.20a แสดงรูปจำนวนเอลิเมนต์ที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว (case20)

4.20b แสดงรูปผลลัพธ์ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงที่มุม 60 องศา ความลึก 0.8481 นิ้ว

(case20)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองรูปทรงอย่างง่าย 60 กรณี พบว่าผลการศึกษามีแนวโน้มตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยค่าความเค้นทางแกนรอบวง (Hoop stress or circumference) มีค่าใกล้เคียงสมการของ Lamé $\sigma = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2}$ ซึ่งค่าความเค้นทางแกนรอบวง จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยเมื่อความลึก (Depth) ของการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น แต่ทางด้านโค้งตามขวาง (transversal) ในทุกๆ มุม ไม่มีผลต่อค่าความเค้นทางแกนรอบวง

จากการจำลองหาผลคำตอบทางคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์ของรูปทรงที่ศึกษา (Superheater) โดยใช้โปรแกรมแบบจำลองเชิงตัวเลข ผลจากการศึกษา พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมแก่การคำนวณคือ $2 \times 10^6 - 3.5 \times 10^6$ เอลิเมนต์

จากการศึกษานี้ ทำให้ได้ข้อสรุปเบื้องต้นว่า เมื่อผลที่ได้จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ จะมีความแม่นยำสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ Thick wall disturbance และถ้าหากค่าความเค้นทางแกนรอบวง มากกว่าค่าความเค้นที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ (Maximum allowable stress) จะทำให้ท่อ superheater เกิดความเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษานี้เป็นแค่การทดสอบทางคอมพิวเตอร์เท่านั้น ซึ่งในการศึกษาครั้งต่อไป ควรจะมีการศึกษาที่ละเอียดกว่านี้ เนื่องด้วยในการศึกษาครั้งนี้ ใช้เวลาค่อนข้างมากในการได้ผลลัพธ์ และด้วยระยะเวลาที่จำกัดทำให้ไม่เพียงพอต่อการศึกษาให้ละเอียด

บรรณานุกรม

- [1] Jayann Ismar Lira Almeida, Marcelo Cavalcanti Rodrigues, Koje Daniel Vasconcelos Mishina, Modeling and Level 3 Fitness-for-Service Assessment of a Cylindrical Pressure Vessel with General Metal Loss in Conjunction with the Numerical Thermal Transient Analysis Department of Mechanical Engineering, Federal University of Paraiba, João Pessoa, Brazil(2014)
- [2] Parit A. N., Tadamalle A. P., and Ramaswamy V, Thermal Stress and Creep Analysis of Failed Tube of Secondary Super Heater, Department of Mechanical Engineering, Sinhgad college of Engineering, Vadgaon(Bk), Pune, India 411 041(2014)
- [3] P V Burkov, R G Afanas'ev, S P Burkova Computer Simulation of Stress-Strain State of Pipeline Section Affected by Abrasion Due to Mechanical Impurities Tomsk, Russia (2015)

