

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาความเค้นในถังแรงดันชนิดผนังหนา(2D)

Experimental study on stress and deformation in thick wall pressure vessel (2D)



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

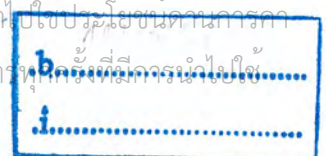
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 55024
วัน,เดือน,ปี..... 4 มิ.ย. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ทั้งห้ามีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปริญญาโทปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาความเค้นในถังแรงดันชนิดผนังหนา(2D)

Experimental study on stress and deformation in thick wall pressure vessel (2D)

ผู้จัดทำ

1. นาย จิตติศักดิ์ ศรีหาผล รหัสประจำตัว 44015375
2. นาย ชานินทร์ กลิ่นระรื่น รหัสประจำตัว 44015379
3. นาย นพรัตน์ รัตนคอน รหัสประจำตัว 44015382
4. นาย พรชัย เจริญลาภสกุลสุข รหัสประจำตัว 44015394

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาความเค้นในถังแรงดันชนิดผนังหนา(2D)

นาย จิตศักดิ์ ศรีหาผล

นาย ชานินทร์ กลิ่นระรื่น

นาย นพรัตน์ รัตนคอน

นายพรชัย เจริญลาภสกุลสุข

รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอถึงการศึกษาเชิงทดลอง และวิเคราะห์ ความเค้นในถังแรงดันแบบผนังหนา ของรูปทรงกระบอกแบบปลายปิดที่อุณหภูมิคงที่ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ ในส่วนของการปฏิบัติ ความเค้นที่ทำการวิเคราะห์จะทำในลักษณะ 2 มิติ คือ ความเค้นในแนวแกน และความเค้นรัศ ถึงความดันแบบปลายปิดที่นำมาทดสอบจะทำการทดสอบทั้งที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอัดความดัน และผ่านกระบวนการอัดความดันจากน้ำมันไฮดรอลิก ที่ 1 รอบ, 10,000 รอบ และ 100,000 รอบตามลำดับ และนำค่าที่ได้จากการทดลองในทางปฏิบัติมาเปรียบเทียบค่าความแตกต่าง

Experimental study on stress and deformation in thick wall pressure vessel (2D)

Thitisak Srihaphon

Tanin klinraruen

Nopparat Rattanakorn

Pornchai Chaloenlapsakulsuk

Assoc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongroj

Advisor 2003


Abstract

This thesis present about the experimental studying and the analysis of the stress in a thick wall pressure tank of cylinder shape close end at constant temperature all of the theory and the practice. In the practice way, the stress view analyze in 2 Dimensions consist of the axial stress and the hoop stress. The pressure tank which use in the practice will test before even though not pass pressure-pressing process and pass pressure-pressing from Hydraulic oil at 1 cycle, 10,000 cycle and 100,000 cycle. After that bring a value from the theory and experiment from practice way to compare the different value.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นบุคคลสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ อาจารย์มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา



นาย จูติศักดิ์ ศรีหาผล
นาย ชานินทร์ กลิ่นระรื่น
นาย นพรัตน์ รัตนคอน
นาย พรชัย เจริญลาภสกุลสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	V
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
สัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ภาคทฤษฎี	3
2.1 แนวความคิดเกี่ยวกับความเค้น	3
2.1.1 เค้นเค้น	
2.1.1.1 ความเค้นตั้งฉาก (σ)	3
2.1.1.2 ความเค้นเฉือน (τ)	4
2.1.2 ระบบพิกัดฉาก	5
2.1.3 ความเครียดตามยาว (ϵ)	6
2.1.4 กฎสภาพยืดหยุ่นของฮุก	6
2.1.5 มอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นและมอดูลัสของยัง	7
2.1.6 แผนภาพความเค้นและความเครียดภายใต้การดึงทดสอบ	8
2.1.7 ความเครียดเฉือน	9
2.1.8 อัตราส่วนของพัวส์ซอง	10
2.2 ความเสียหายของวัสดุ เนื่องจากครีป(Creep)	11
2.3 ความเค้นเนื่องจากความล้า (Fatigue Stress)	12
2.4 ทฤษฎีทรงกระบอกหนา	12
2.5 ทฤษฎีทรงกระบอกผนังหนา	13
2.5.1 สมมติฐานของทรงกระบอก	13
2.5.2 การกำหนดสัญลักษณ์	14
2.5.3 การวิเคราะห์	14
2.5.4 ค่าความเค้นในทรงกระบอกปลายปิด	17
2.5.5 ความเค้นในทรงกระบอกที่มีอุณหภูมิคงที่	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.6 การประยุกต์ใช้กับทรงกระบอกผิวบาง	22
2.5.7 ค่าความเครียดบนทรงกระบอกหนาปลายเปิด	23
2.5.8 การหาค่าความเค้นจากความเครียด	24
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	25
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	25
3.1.1 ปุ่มไฮดรอลิก	25
3.1.2 ชุดกล่อง timer	25
3.1.3 Solinoilvalve	26
3.1.4 ทรงกระบอกผนังหนาที่ใช้ในการทดลอง	26
3.1.5 Strain Gages	27
3.1.6 Strain Indecator	28
3.1.7 Switch box	28
3.2 วิธีการทดลอง	29
บทที่ 4 การคำนวณ	31
4.1 สมการการคำนวณทางทฤษฎี	31
4.2 การคำนวณทางทฤษฎี	31
บทที่ 5 ผลการทดลอง	33
บทที่ 6 สรุปลักษณะและวิเคราะห์ผลการทดลอง	43
6.1 สรุปลักษณะการทดลองจากกราฟ	43
6.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	43
6.3 ข้อเสนอแนะและการพัฒนา	43
ภาคผนวก	45
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงค่าความเค้นทางทฤษฎีและปฏิบัติ	46
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงค่าความเค้นที่รอบการใช้งานต่างๆ	49
ภาคผนวก ค. ตารางแสดงสัญลักษณ์วงจรรีโไฮดรอลิก	54
ภาคผนวก ง. ตารางแสดงคุณสมบัติของโลหะที่ใช้ในทำท่อทรงกระบอกผนังหนาชนิดปลายปิด	57
บรรณานุกรม	.66

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	นิยามความเค้นตั้งฉาก	3
2	ความเค้นเฉือนสำหรับการเฉือนเดี่ยวและเฉือนคู่	4
3	ความเค้นที่จุดใดจุดหนึ่งในวัตถุภายใต้แรงกระทำ	5
4	ความเค้นอย่างสมบูรณ์บนระนาบพิคัต	5
5	การคิดรูปของแท่งโลหะขณะรับแรงดึง	6
6	ขนาดของชิ้นงานทดสอบ	7
7	แผนภาพความเค้นความเครียด	8
8	การคิดรูปโดยการเฉือน	9
9	นิยามอัตราส่วนพิชของสตีล	10
10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นของวัสดุสแตนเลสที่ 1200 F	11
11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ลดลงของอลูมิเนียมและเหล็กกับจำนวนรอบของการหมุน	12
12	ทรงกระบอกผิวหนา	13
13	แสดงชุดปั๊มไฮดรอลิกที่ใช้อัดแรงดันให้กับการทดลอง	25
14	แสดงชุด timer ที่ใช้ควบคุมเวลาในการอัดน้ำมัน	25
15	แสดงชุด Solinoil valve ที่ใช้ควบคุมทางเดินน้ำมัน	26
16	ทรงกระบอกผนังหนาน้ำที่ใช้ในการทดลอง	26
17	แสดงชิ้นงานที่ติด Strain Gages	27
18	แสดงลักษณะ Strain Gages	27
19	แสดงเครื่องมืออ่านค่าความเครียด (Strain Indicator)	28
20	Switch box	28
21	ลักษณะการติดตั้ง Strain Gage	28
22	แสดงแผนงานการทดลอง	29
23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน กับ เวลา	29
24	แสดงชุดไฮดรอลิก	30
25	ภาพแสดงชุดการทดลอง	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลองที่ความดัน 50 bar	34
27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลองที่ความดัน 50 bar	34
28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลองที่ความดัน 100 bar	35
29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลองที่ความดัน 100 bar	35
30 กราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=43$ ความดัน 50 bar	36
31 กราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\varnothing=43$ ความดัน 50 bar	36
32 กราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=60$ ความดัน 50 bar	37
33 กราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\varnothing=60$ ความดัน 50 bar	37
34 กราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=74$ ความดัน 50 bar	38
35 ราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\varnothing=74$ ความดัน 50 bar	38
36 ราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=43$ ความดัน 100 bar	39
37 กราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\varnothing=43$ ความดัน 100 bar	39
38 กราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=60$ ความดัน 100 bar	40
39 กราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\varnothing=60$ ความดัน 100 bar	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
41	กราฟแสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=74$ ความดัน 100 bar	47
40	กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\varnothing=74$ ความดัน 100 bar	48



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 50 bar	47
2 แสดงค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 50 bar	47
3 แสดงค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 100 bar	48
4 แสดงค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 100 bar	48
5 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=43$ ความดัน 50 bar	50
6 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ขนาด $\varnothing=60$ ที่ความดัน 50 bar	50
7 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ขนาด $\varnothing=74$ ที่ความดัน 50 bar	50
8 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ขนาด $\varnothing=43$ ที่ความดัน 50 bar	51
9 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ขนาด $\varnothing=60$ ที่ความดัน 50 bar	51
10 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ขนาด $\varnothing=74$ ที่ความดัน 50 bar	51
11 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=43$ ความดัน 100 bar	52
12 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=60$ ความดัน 100 bar	52
13 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=74$ ความดัน 100 bar	52
14 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ขนาด $\varnothing=43$ ที่ความดัน 100 bar	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
15. แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ขนาด $\varnothing=60$ ที่ความดัน 100 bar	53
15. แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ขนาด $\varnothing=74$ ที่ความดัน 100 bar	53



สัญลักษณ์

σ	ความเค้นดึงฉาก	(Pa , N/m ²)
P	ความดัน	(Pa , N/m ²)
F	แรง	(N , Kg.m/s ²)
A	พื้นที่หน้าตัด	(m ²)
τ	ความเค้นเฉือน	(Pa , N/m ²)
V	แรงเฉือน	(N , Kg.m/s ²)
E	ความเคียด	
L	ความยาว	(m)
δ	ระยะยืด	(m)
E	Modulus of elasticity	(Gpa)
γ	ความเคียดเฉือน	(องศา)
G	Modulus of rigidity	(Gpa)
R	รัศมี	(m)
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	(m)
t	ความหนา	(m)
α	สัมประสิทธิ์การขยายตัว เชิงเส้นเนื่องจากอุณหภูมิ	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันท่อทรงกระบอกที่นิยมใช้ในงานไฮดรอลิกหรือในงานทางด้านอุตสาหกรรมทั่วไปที่จำเป็นจะต้องสามารถรับภาระสูงๆได้ในบางกรณี ซึ่งภายในได้รับการบรรจุของไหลที่มีลักษณะเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) เช่นน้ำ หรือน้ำมันไฮดรอลิก จะสามารถพบเห็นโดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นการลำเลียงหรือการขนถ่ายของเหลว จึงเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในระบบทั่วไปที่พบว่ามีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม เช่น ท่อขนส่งน้ำมัน ท่อรับแรงดันสูงชนิดต่างๆ เป็นต้น ในบางกรณีจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ความดันหรือรับภาระที่เกิดขึ้นสูงๆ ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องรับความดันที่สูงกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานว่าจะสามารถรับภาระหรือแรงดันที่เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดของท่อที่รับแรงดันคือความเค้นที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ โดยที่อุปกรณ์ชนิดนี้ในบางกรณีจะต้องรับความดันสูงๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงอันตรายที่เกิดขึ้นในการใช้งาน เพื่อลดความสูญเสียในด้านต่างๆ

โครงการนี้ได้มุ่งเน้นถึงการวิเคราะห์ถึงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในท่อทรงกระบอก โดยวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการทำท่อของไหลที่รับความดันความดันสูงที่ใช้งานกันจริงในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งทำการทดลอง โดยวิเคราะห์ถึงความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ที่ผ่านกระบวนการอัดความดันเป็นแบบDynamic loadจนถึง100,000 รอบ เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นและเพื่อใช้เป็นแนวทาง ในการออกแบบท่อความดันสูงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าความเค้น ในทรงกระบอกแบบผนังหนาชนิดปลายปิดทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าความเค้นของชิ้นงานทดลองที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอัดความดันและผ่านกระบวนการอัดความดันมาแล้ว ว่ามีผลทำให้ค่าความเค้นของชิ้นงานทดลองเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เมื่อเทียบกับวัสดุที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอัดความดัน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1 ออกแบบชุดทดลองทรงกระบอกผนังหนาชนิดปลายปิด เพื่อใช้ในการทดลอง
- 2 ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการหาความเค้นในทรงกระบอกปลายปิดแบบผนังหนา ใน 2 มิติ ที่อุณหภูมิคงที่ ทั้งที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอัดความดันและผ่านกระบวนการอัดความดันมาแล้ว
- 3 นำค่าที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี โดยใช้สมการความเค้นและความเครียด ของทรงกระบอกแบบปลายปิดทำโดยการติด strain gauge เพื่อวัด ค่าความเครียด ของถึงความดัน ที่ค่าความดันต่างๆกัน แล้วคำนวณหาความเค้นในแนวแกนและความเค้นรัศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับทอผนังนาในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ
2. ออกแบบชุดทดลองและอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ
3. จัดหาวัสดุและอุปกรณ์เพื่อดำเนินการสร้างชุดทดลอง
4. ดำเนินการสร้างชุดทดลองและทำการติดตั้งเพื่อปรับตั้งค่าที่เหมาะสมกับการทดลอง
5. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ภาคทฤษฎี

2.1 แนวความคิดเกี่ยวกับความเค้น

ถ้าวัสดุหนึ่งถูกกระทำด้วยแรงภายนอกจะส่งผลให้เกิดความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ภายในวัสดุนั้น การวิเคราะห์หาความเค้นความเครียดยังต้องอาศัยหลักสมดุลของส่วนตัดของชิ้นส่วนหรือวัสดุนั้น และทฤษฎีของสภาพยืดหยุ่น

2.1.1 ความเค้น

ความเค้น (stress) คือแรงกระทำในเนื้อวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตั้งฉากหรือขนานกับแรงนั้น มีหน่วยเป็น kn/m^2 หรือ kPa

ความเค้นแบ่งออกเป็น

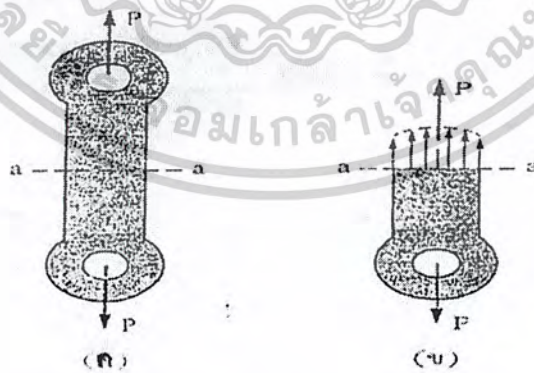
2.1.1.1 ความเค้นตั้งฉาก (σ)

กำหนดชิ้นส่วนรับสองแรง P (แรงดึง) ดังแสดงในรูป (ก) ความเค้นตั้งฉากที่รับภาระในแนวแกนแบ่งออกได้เป็น

1. ความเค้นกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอ ขนาดของแรงลัพธ์ของแรงภายในกระทำตั้งฉากกับส่วนตัด $a-a$ นั้นเท่ากับขนาดของแรงภายนอก P ดังแสดงในรูป (ข) ดังนั้นภายใต้สมดุลแรง ดังชิ้นส่วนรูป (ข) จะได้ว่า

$$p = \int dF = \int \sigma dA \quad (2.1)$$

โดยที่ σ คือความเค้นกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัด A



รูปที่ 1 นิยามของความเค้นตั้งฉาก

2. ความเค้นกระจายอย่างสม่ำเสมอ ในกรณีที่มีความเค้นกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ A จากสมการ (2.1) จะได้

$$P = \sigma A$$

$$\sigma = P/A \quad (2.2)$$

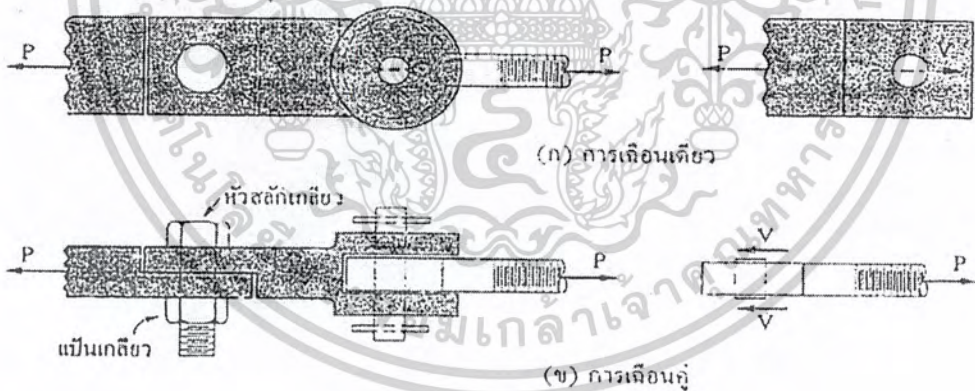
โดยที่ σ คือความเค้นตั้งฉากเฉลี่ย P คือ แรงตั้งฉาก และ A คือพื้นที่หน้าตัดตั้งฉากกับแรง กล่าวคือ ความเค้นตั้งฉากเฉลี่ยก็คือแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่ตั้งฉากกับแรงนั้น

2.1.1.2 ความเค้นเฉือน (τ)

พิจารณาเช่นเดียวกับสมการที่ (2.1) แต่ต่างกันตรงที่แรงกระทำขนานกับพื้นที่หน้าตัด ใช้ด้านแรงเมื่อกำหนดให้ความเค้นเฉือนกระทำอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดเฉือนจะได้ว่า

$$\tau = V/A_s \quad (2.3)$$

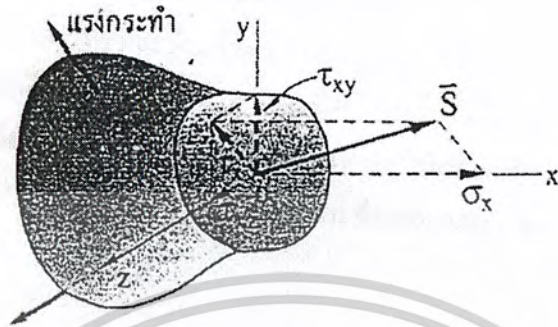
โดยที่ τ คือความเค้นเฉือนเฉลี่ย V คือแรงเฉือน และ A_s คือพื้นที่หน้าตัดเฉือนขนานกับแรง



รูปที่ 2 ความเค้นเฉือนสำหรับการเฉือนเฉียวและเฉือนคู่

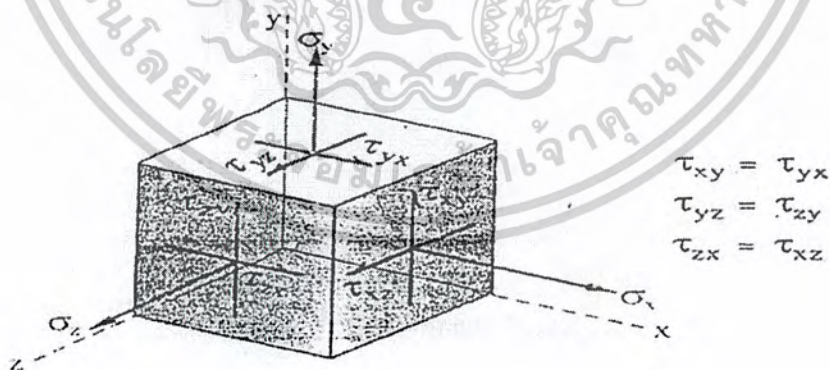
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ระบบพิกัดฉาก



รูปที่ 3 ความเค้นที่จุดใดจุดหนึ่งในวัตถุภายใต้แรงกระทำ

ระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate System) ใช้กำหนดความเค้นอ้างอิงลงบนแกน x, y, z ซึ่งกระทำบนระนาบหนึ่ง ๆ ซึ่งตั้งฉากกับแกนทั้ง 3 นั้นได้อย่างสะดวกกว่า ดังรูป กำหนดระนาบหนึ่งซึ่งมีทิศหันหน้าออกอยู่ในทิศ $+x$ ซึ่งมีความเค้นตั้งฉากในทิศ $+x$ คือ σ_x ความเค้นเฉือนบนระนาบ yz ตั้งฉากกับแกน x คือ τ_{xy} บนแกน y และ z จะได้ τ_{xy} และ τ_{yz} ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความเค้นอย่างสมบูรณ์บนระนาบพิกัด

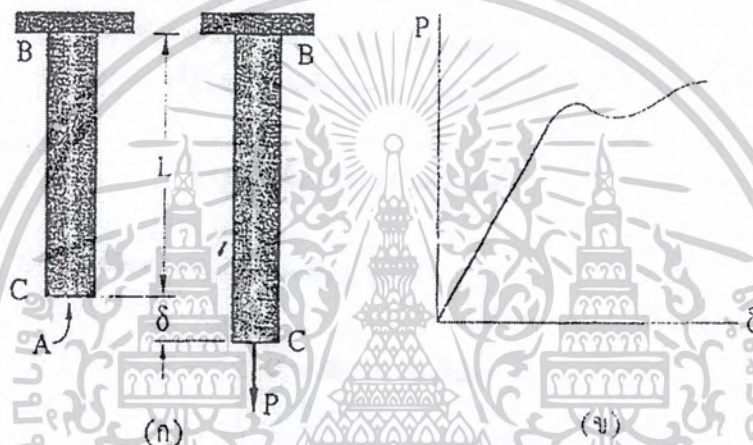
การกำหนดความเค้นย่อยที่กระทำจุดหนึ่ง ๆ ในเนื้อวัตถุบนพิกัดฉาก x, y, z อย่างสมบูรณ์นั้นจะแสดงด้วย

3 ความเค้นย่อย กระทำบนผิวของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดเล็ก ๆ ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมายของ σ และ τ ซึ่งกระทำบนระนาบหนึ่ง ๆ พิจารณาดังนี้ ถ้าแรงกระทำบนระนาบนั้นเป็นแรงดึงพบว่า σ มีเครื่องหมายบวก ส่วน τ นั้นจะมีดัชนีล่าง (superscript) 2 ตัว เช่น τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} ดัชนีล่างตัวแรกแสดงถึง ระนาบ ที่ความเค้นเฉือนกระทำ ส่วนดัชนีล่างตัวที่ 2 แสดงถึง แกน ซึ่งขนานกับความเค้นเฉือนนั้นเช่น τ_{xy} ก็คือความเค้นเฉือนที่กระทำบนระนาบ x ใดๆซึ่งขนานกับแกน y c และชี้ทิศ $+y$

2.1.3 ความเครียดตามยาว (ϵ)



รูปที่ 5 การผิดรูปของแท่งโลหะขณะรับแรงดึง

พิจารณาแท่งโลหะ BC มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ A และความยาวเดิม L ออกแรงดึง P ที่ปลาย C ทำให้แท่งโลหะยืดออก δ ดังรูป ระยะยืดตัวต่อหนึ่งหน่วยความยาวเรียกว่าความเครียด ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon = \delta/L \quad (2.4)$$

2.1.4 กฎสภาพยืดหยุ่นของฮุก

ในช่วงขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน (proportional limit) พบว่า สำหรับวัสดุยืดหยุ่น (elastic material) นั้น ความเค้นตึงฉาก (σ) และความเครียด (ϵ) มีความสัมพันธ์เชิงเส้น

นั่นคือ

$$\sigma \propto \epsilon \quad \text{และ} \quad \sigma/\epsilon = \text{ค่าคงที่} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุใด ๆ ก็ตามที่สภาพยืดหยุ่นได้นั้น เมื่อได้รับภาระหรือแรงกระทำจะทำให้มีการผิดรูป (ยืดหรือหด) ตามแรงนั้น และจะสามารถคืนรูปเดิมอย่างสมบูรณ์ได้เมื่อนำแรงนั้นออกโดยจะไม่มี การเสี ยรูปอย่างถาวร ปกติมักพบในโลหะเจือผสมเหล็ก (ferrous alloys) เป็นส่วนใหญ่

2.1.5 มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นและมอดุลัสของยัง

ค่าคงที่ตามกฎของฮุกในสมการ 1.5 นั้นคือมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity, E) หรือ มอดุลัสของยัง (Young's modulus, Y)

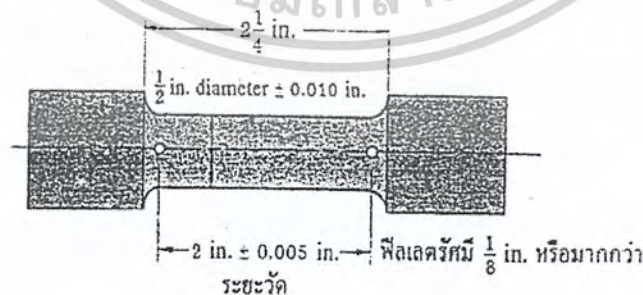
$$E = \text{ความเค้น} / \text{ความเครียด} = \sigma / \epsilon \quad (2.6)$$

แทน σ ด้วย P/A และ ϵ ด้วย δ/L จะได้

$$\sigma = PL / AE = \sigma L / E \quad (2.7)$$

ข้อควรจำ

1. ปกติมอดุลัสของวัสดุในสภาพยืดหยุ่นได้นั้นเป็นค่าคงที่สำหรับสารชนิดเดียวกัน
2. วัสดุใดที่มีค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นสูง วัสดุนั้นจะทนต่อแรงภายนอกได้สูงและรูปร่างเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนวัสดุที่มีค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นต่ำนั้นจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายกว่าเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ

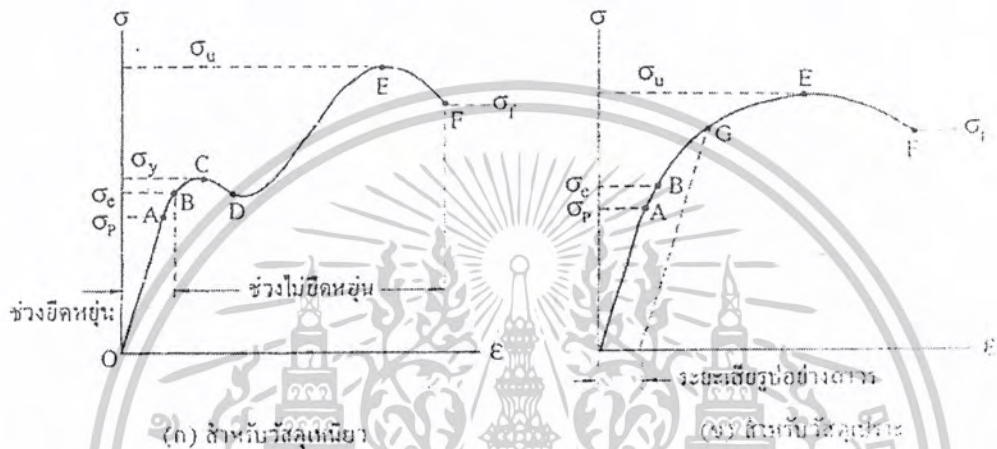


รูปที่ 6 ขนาดของชิ้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 แผนภาพความเค้นและความเครียดภายใต้การดึงทดสอบ

ในการดึงทดสอบนั้น ก่อนดึงทดสอบต้องเตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน AISI (American Iron and Steel Institute) ลักษณะของชิ้นทดสอบจะเตรียมดังรูป จากนั้นจะติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบและอ่านระยะยืดตัว นำผลที่ได้มาเขียนแผนภาพความเค้นและความเครียด



รูปที่ 7 แผนภาพความเค้นความเครียด

จากรูปมีขีดจำกัด คือจุด A เรียกว่า ขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน (σ_p) จุด B เรียกว่า ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (σ_y) จุด C เรียกว่า จุดคราก (σ_c) จุด E เรียกว่า จุดประลัย (σ_u) จุด F เรียกว่า จุดแตกหัก (σ_f) และจุด G เรียกว่า จุดลึกรูปอย่างถาวร

แผนภาพความเค้นและความเครียดให้พฤติกรรมสองช่วง คือ ช่วงยืดหยุ่น และช่วงไม่ยืดหยุ่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

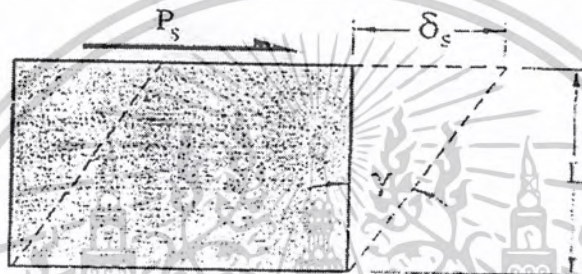
- 1) สำหรับวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะนั้น ในช่วงยืดหยุ่น (ตั้งแต่จุด O ถึง A) พบว่า σ และ ϵ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตามกฎของฮุกคือ $O = \epsilon E$
- 2) ในช่วงไม่ยืดหยุ่น (ตั้งแต่จุด B ถึง F) สำหรับวัสดุทั้งสองประเภท σ และ ϵ มีความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้น
- 3) ถ้าออกแรงดึงต่อชิ้นทดสอบ ทำให้ความเค้นไม่เกินจุด B ($\sigma < \sigma_y$) เมื่อนำแรงนั้นออกไป ชิ้นทดสอบสามารถคืนกลับรูปร่างเดิมได้ ปกติแล้วจะสมมติให้จุด A ซ้อนทับจุด B นั่นคือ $\sigma_p = \sigma_c$ และถ้าออกแรงดึงจนกระทั่งเลยจุด B ชิ้นทดสอบนั้นจะไม่สามารถกลับคืนรูปร่างเดิมได้อีกต่อไป เมื่อความเค้นถึงจุด C จะเรียกว่าจุดครากเริ่มต้น (upper yield point) จากนั้นจะเห็นพฤติกรรมคือ ϵ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยไม่สัมพันธ์กับแรงดึง (หรือ σ) จนกระทั่งถึงจุดครากสุดท้าย (lower yield point)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ถ้าเพิ่มแรงดึงทดสอบมากขึ้นจนความเค้นเลขจุด E พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบจะลดลง และเกิดคอคอด และความเค้นจะลดลงจนถึงจุด F (σ_c) ซึ่งชิ้นทดสอบจะแตกหักเสียหาย

2.1.7 ความเครียดเฉือน

ความเครียดเฉือน (shear strain, γ) คือ การเปลี่ยนแปลงเชิงมุมระหว่างผิวตั้งฉากกันทั้งสองของชิ้นส่วนย่อย



รูปที่ 8 การผิดรูปโดยการเฉือน

จากรูปชิ้นส่วนย่อยรับแรงเฉือนแล้วเปลี่ยนรูปร่างจากสี่เหลี่ยมมุมฉากเป็นสี่เหลี่ยมด้านขนานทำให้ระยะเปลี่ยนแปลงในแนวเฉือน δ_s (บนผิวแนวระดับ) กำหนดความยาวในแนวตั้งคือ L พิจารณาความเครียดเฉือนเฉลี่ยในรูป โดยที่ $\tan \gamma = \delta_s/L$ ปกติ γ เป็นมุมขนาดเล็กมาก ดังนั้น $\tan \gamma = \gamma$ และความเครียดเฉือน คือ

$$\gamma = \delta/L \quad (2.8)$$

อาศัยกฎของฮุกหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และความเครียดเฉือน (γ)

$$\tau = G\gamma \quad (2.9)$$

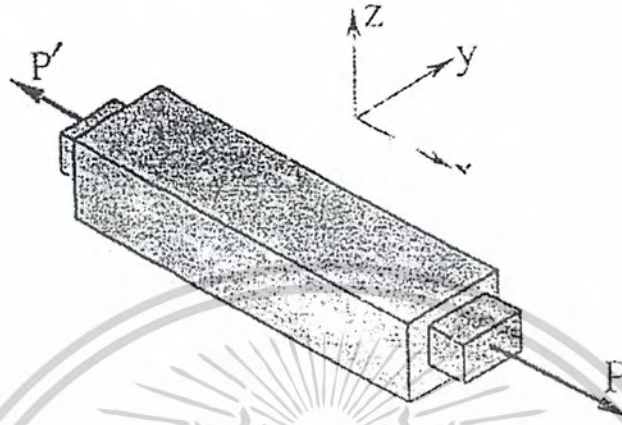
โดยที่ G คือมอดูลัสของความแข็งเกร็ง (modulus of rigidity)

ในที่นี้ $\tau = V/A_s$ (โดยที่ V เป็นแรงเฉือนกระทำบนพื้นที่เฉือน A_s) และ $\gamma = \delta_s/L$ ดังนั้นระยะเปลี่ยนแปลงในแนวเฉือนคือ

$$\delta = VL/A_s G \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.8 อัตราส่วนของพัลส์ซอง



รูปที่ 9 นิยามอัตราส่วนของพัลส์ซอง

นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ ซีม็อง เดอนีส ปัวส์ซอง (Simeon Denis Poisson) พบว่าอัตราส่วนของพัลส์ซอง (ν) ก็คือค่าสัมบูรณ์ของอัตราส่วนความเครียดด้านข้าง (lateral strain) ต่อความเครียดในแนวแกน และมีค่าคงที่สำหรับวัสดุที่มีความเค้นภายในขีดจำกัดความเป็นสัคส่วน

จากรูป เมื่อออกแรงดึง P ในแนวแกนทำให้ขนาดของวัตถุหดตามขวางลดลง ในที่นี้ความเครียดในแนวแกนคือ ϵ_x ซึ่งมีเครื่องหมายบวก สำหรับความเครียดด้านข้างคือ ϵ_y และ ϵ_z ซึ่งมีเครื่องหมายลบ อัตราส่วนของพัลส์ซอง (Poisson's ratio) คือ

$$\nu = -\epsilon_y/\epsilon_x = -\epsilon_z/\epsilon_x$$

สำหรับการผิกรูป 2 แกน แกน x และ y พบว่า

$$\epsilon_x = \sigma_x/E - \nu\sigma_y/E$$

$$\epsilon_y = \sigma_y/E - \nu\sigma_x/E$$

จากสมการเหล่านี้ แก้สมการจะได้

$$\sigma_x = (\epsilon_x + \nu\epsilon_y)E/(1-\nu^2) \quad (2.11)$$

$$\sigma_y = (\epsilon_y + \nu\epsilon_x)E/(1-\nu^2) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการผิกรูป 3 แกน (x, y, z) : กฎของฮุกแบบทั่วไปคือ

$$\text{แกน } x : \quad \epsilon_x = 1/E(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) \quad (2.13)$$

$$\text{แกน } y : \quad \epsilon_y = 1/E(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)) \quad (2.14)$$

$$\text{แกน } z : \quad \epsilon_z = 1/E(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)) \quad (2.15)$$

ข้อสังเกต

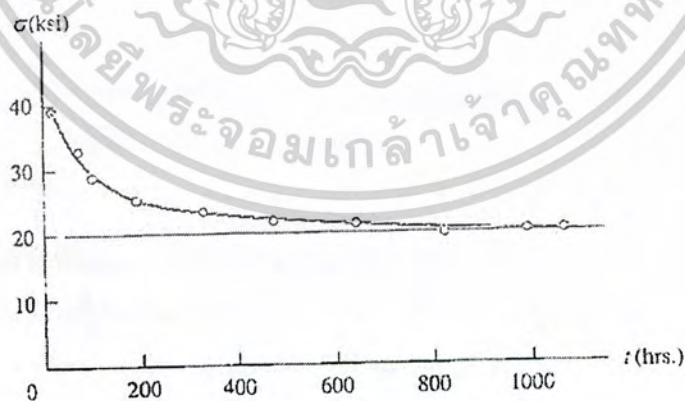
1. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ในช่วงยืดหยุ่น 3 ค่า คือ ν , E และ G

$$G = E/2(1+\nu) \quad (2.16)$$

จากสมการเมื่อทราบ G และ E จะสามารถคำนวณหาค่าของ ν ได้
สำหรับเหล็กกล้ามีอัตราส่วนของพัลส์ของ (ν) อยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.30 สำหรับโลหะอื่น ๆ มี ν ประมาณ 0.33 และสำหรับคอนกรีตมี ν เท่ากับ 0.20

2.2 ความเสียหายของวัสดุ เนื่องจากครีพ (Creep)

ความเสียหายจากครีพ (Creep) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุรับภาระเป็นเวลานาน ๆ มันจะเปลี่ยนรูปร่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด โดยค่าของความเค้นจะลดลงและวัสดุเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร สิ่งนี้คือ ครีพ (Creep)

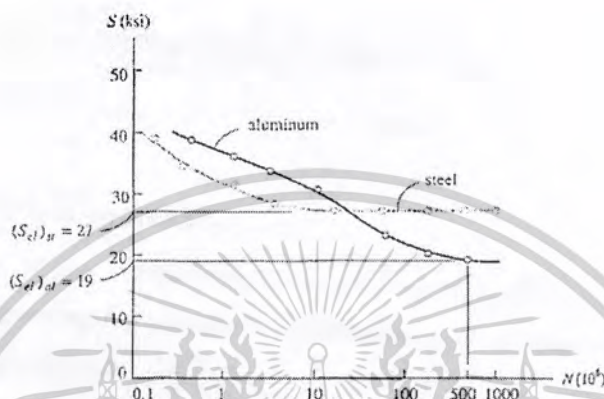


รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นของวัสดุสแตนเลสที่ 1200 °F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ความเค้นเนื่องจากความล้า (Fatigue Stress)

ความล้า เกิดจากวัตถุถูกกระทำซ้ำ ๆ เป็นรอบหรือไซเคิล ซึ่งสามารถทำให้วัตถุแตกหักเสียหาย ได้ดังตัวอย่าง โคอะแกรมรูป 11



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ลดลงของอะลูมิเนียมและเหล็กกับจำนวนรอบของการหมุน

2.4 ทฤษฎีทรงกระบอกหนา

ทรงกระบอกซึ่งภายในได้รับการบรรจุของไหลที่มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่เราพบมากในวงการอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นถึงบรรจุของไหล, ท่อส่งของไหล ประเภทต่าง ๆ รวมถึงในวงการทหาร เช่น ถ้ำกลิ้งปืนใหญ่ซึ่งภายในจะมีความดันสูงขณะที่มีการยิง อุปกรณ์ทรงกระบอกบรรจุความดันที่ใช้อยู่ทั่วไปเหล่านี้ เรามักจะพบว่าทรงกระบอกเป็นทรงกระบอกกลมตรงและความดันภายในดังและความดันภายนอกถึงจะคงที่หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ยกเว้นในกรณีของถ้ำกลิ้งปืนที่เราสนใจในความดันสูงสุดที่เกิดขึ้น นอกเหนือจากนั้นยังอาจพบว่าของไหลที่บรรจุภายในอุณหภูมิที่แตกต่างจากบรรยากาศภายนอก ซึ่งจะทำให้เกิดผลของการเกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิอีกด้วย

สำหรับบทนี้จะเป็นการศึกษาในเรื่องสถานะบรรจุความดันรูปทรงกระบอกกลมตรง ซึ่งในบทที่แล้วเราได้กล่าวถึงทรงกระบอกผิวบางมาแล้วครั้งหนึ่งแต่เป็นการกล่าวถึงอย่างคร่าว ๆ และได้ตั้งสมมติฐานขึ้นมาหลายอย่าง สิ่งหนึ่งที่สำคัญในการตั้งสมมติฐานของทรงกระบอกผิวบางก็คือความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวความหนาหรือรัศมีของทรงกระบอกนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเค้นในแนวอื่น นั่นคือเราได้สมมุติว่า $\sigma_r = 0$ ซึ่งการประมาณเช่นนี้จะถูกต้องมากขึ้นเมื่อความหนาของทรงกระบอกมีค่าน้อยกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอกมาก

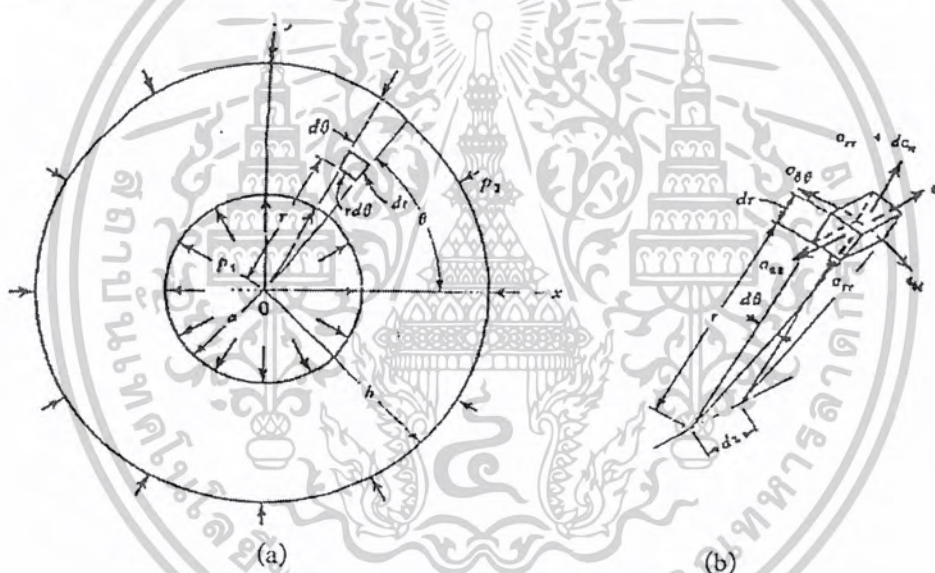
สำหรับบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทรงกระบอกผิวหนาอย่างละเอียดขึ้นดังนั้นในบทนี้จะเป็นการพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในทุกแนวแกน รวมถึงพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม

เนื่องจากจากการพิจารณาในส่วนเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของทรงกระบอกมีเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจำเป็นที่เราจะต้องมีความรู้พื้นฐานทางด้านการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นแม้ว่าในส่วนการพิจารณาสมการหลักเราจะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวรัศมี แต่เราจะไม่เน้นถึงเรื่องนี้ในการนำเสนอการเหล่านี้ไปใช้ นอกจากนี้ส่วนท้ายของบทจะกล่าวถึงทฤษฎีของทรงกระบอกในกรณีที่มีใช้ทรงกระบอกหลาย ๆ ชั้นเพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้นในทรงกระบอกด้วย

2.5 ทฤษฎีทรงกระบอกฉนวน

พิจารณาทรงกระบอกฉนวน ซึ่งภายในคอกอยู่ภายใต้ความดัน P_1 และภายนอกมีมีความดัน P_2 นอกจากนั้นการเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวรัศมีทรงกระบอก $\Delta T = \Delta T(r)$ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในที่นี้เราจะกำหนดให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีเท่านั้น รูปที่ 12 (a) และ (b) แสดงถึงทรงกระบอกและส่วนย่อยของทรงกระบอก สำหรับระบบพิกัดที่ใช้จะใช้ระบบพิกัดทรงกระบอก (r, θ, z) ดังแสดงในรูป ส่วนที่ปลายทั้งสองของทรงกระบอก จะเป็นแบบปลายเปิดหรือปลายปิดก็ได้



รูปที่ 12 ทรงกระบอกฉนวน

2.5.1 สมมติฐานของทรงกระบอก

เพื่อให้การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่กระทำต่อทรงกระบอกและความเค้นที่เกิดขึ้นกับทรงกระบอกเป็นไปด้วยความสะดวกในเบื้องต้นเราจึงจำเป็นต้องตั้งสมมติฐานขึ้นมาก่อนเพื่อกำหนดขอบเขตของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับสมมติฐานของทรงกระบอกฉนวนที่เราจะศึกษาในที่นี้ มีดังนี้

1. วัสดุที่ใช้เป็นไอโซโทรปิก (Isotropic Material)
2. ค่าความเค้นอยู่ในช่วงการยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elasticity)
3. ค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจะสมมาตรรอบแกนกลางของทรงกระบอก

(Axisymmetric)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ในกรณีที่ทรงกระบอกเป็นทรงกระบอกปลายปิด ซึ่งปกติจะเกิดค่าความเครียดที่ปลายสูง เนื่องจากต้องมียรอยต่อที่ปลายทำให้เกิดความเค้นเข้มข้น (Stress Concentration) ขึ้นที่บริเวณนั้นได้ เพื่อความสะดวกแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่จะสร้างขึ้นนี้จะใช้พิจารณาเฉพาะบริเวณที่ห่างจากปลายทรงกระบอกมาพอที่จะทำให้ไม่มีผลกระทบจากค่าความเค้นเข้มข้นที่บริเวณปลายซึ่งจะทำให้ค่าความเค้น-ความเครียด-การขจัดที่บริเวณที่ห่างจากปลายพอสมควรจะไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางตามแนวแกนของทรงกระบอก ซึ่งจากรูปที่ 12 เรากำหนดให้เป็นแนวแกน z
 5. สำหรับทรงกระบอกปลายเปิด การขจัดโดยแล้วจะไม่เกิดขึ้นกับทิศทางตามแนวแกนของทรงกระบอก หรือแนวแกน z
 6. จากสมมุติฐาน ข้อ 4 หรือ 5 เราจะพบว่า บริเวณที่ห่างจากปลายทรงกระบอกอย่างเพียงพอ นั้น แนวหน้าตัดเดิมก่อนการมีความดันกระทำซึ่งเป็นระนาบตรงยังคงเป็นหน้าตัดระนาบตรงภายหลังมีความดันกระทำ ซึ่งทำให้ค่าการขจัดตามแนวแกนจะเท่ากัน ในทุกรัศมี
 7. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเกิดขึ้นในแนวรัศมีเท่านั้น $\Delta T = \Delta T(r)$
 8. ไม่พิจารณาแรงเนื่องจากวัตถุ (Body Force)
- จากสมมุติฐานที่กำหนดมาทั้งหมดนี้จะทำให้เราวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้สะดวกยิ่งขึ้น ดังที่จะกล่าวต่อไป

2.5.2 การกำหนดสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ เราใช้พิกัดทรงกระบอก (r, θ, z) และให้ (u, v, w) เป็นการขจัดตามแนวแกนพิกัดเหล่านั้นตามลำดับ

2.5.3 การวิเคราะห์

จากสมมุติฐานข้อ 1 และ 2 เป็นการกำหนดขอบข่ายของประเภทวัสดุและช่วงการยืดหยุ่นที่เราจะพิจารณาในขั้นนี้ สำหรับสมมุติฐานข้อ 3 กำหนดให้การขจัดทรงกระบอกเป็นอิสระในแนวเส้นสัมผัส (หรือแนวเส้นรอบวง), θ , นอกเหนือจากนั้นในเมื่อหน้าตัดไม่ได้เกิดการบิดตัวไปตามแนวเส้นสัมผัสเราจึงสรุปได้ว่าไม่เกิดการขจัดขึ้นตามแนวเส้นสัมผัส ดังนั้น

$$u = u(r, Z), \quad v = 0, \quad w = w(r, Z) \quad (2.17)$$

จากสมมุติฐานข้อ 6 เราสามารถสรุปได้ว่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีเฉพาะความเค้นตั้งฉากซึ่งเป็นฟังก์ชัน ของรัศมีเท่านั้น หรือ

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rr}(r) \quad (2.18)$$

และ
$$\sigma_{zz} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{z\theta} = 0 \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.17) ในเมื่อความเค้นขึ้นอยู่กับระยะตามแนวรัศมีเท่านั้น ดังนั้นความเครียดที่เกิดขึ้นก็ควรจะเป็นฟังก์ชันของรัศมีเท่านั้น นั่นคือ

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(r) \quad (2.20)$$

ขั้นต่อไปเพื่อให้แน่ใจว่าระบบของทรงกระบอกตกอยู่ภายใต้สมดุลสถิต เราจะพิจารณาระบบสมการความสมดุลของทรงกระบอกนี้ โดยเราพิจารณาส่วนเล็ก ๆ บนหน้าตัดทรงกระบอก ส่วนย่อย $rdrd\theta$ ตามรูปที่ 12 (b) และจากสมการความสมดุล ในระบบแกนทรงกระบอกเราได้

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta\theta}}{r} + B_r = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\sigma_{r\theta}}{r} + B_{\theta} = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{2\sigma_{rz}}{r} + B_z = 0 \quad (2.23)$$

เมื่อ B_i คือแรงเนื่องจากน้ำหนักซึ่งเราจะไม่พิจารณาคตามสมมุติฐานข้อที่ 8 จากสมมุติฐานตามสมการ (2.17) จะได้ว่าสมการความสมดุลทั้งหมดจะเป็นจริง ถ้า

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \sigma_{\theta\theta} - \sigma_r \quad (2.24)$$

หรือ
$$\frac{d}{dr}(r\sigma_r) = \sigma_{\theta\theta} \quad (2.25)$$

สำหรับความสัมพันธ์ของความเครียดและการขจัด ตามที่เราได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ในระบบแกนทรงกระบอกจะเป็น

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (2.26)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \quad (2.27)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.28)$$

$$\gamma_{r\theta} = 2\varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma_{rz} = 2\varepsilon_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \quad (2.30)$$

$$\gamma_{\theta z} = 2\varepsilon_{\theta z} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \quad (2.31)$$

ซึ่งจากสมมติฐานและสมการ (2.17) จะได้

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (2.32)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u}{r} \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.34)$$

นอกเหนือจากนั้น เนื่องจากการขจัดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในย่านที่ห่างจากปลายพอดสมควรจะต้องเกิดขึ้นเท่า ๆ กันในทุกกรณีเพื่อให้หน้าตัดคงสภาพเป็นระนาบอยู่ได้ และแรงที่ทำให้เกิดการยึดตัวตามแนวแกนของทรงกระบอกเป็นแรงที่ส่งผ่านมาจากปลายที่ปิดอยู่ของทรงกระบอก ซึ่งจะคล้ายกับการที่เราดึงทรงกระบอกตามแนวแกนของมัน ดังนั้นนอกจากจะประมาณว่าการขจัดหรือความเครียดตามแนวแกนมีค่าเท่ากันในทุกกรณีแล้ว เรายังสามารถประมาณได้ว่าความเครียดในแนวตั้งกล่าวจะมีค่าคงที่ด้วย นั่นคือ

$$\varepsilon_{zz} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.35)$$

ค่าอนุพันธ์ของสมการ (2.33) เทียบต่อ r จะได้

$$\frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2}$$

$$r \frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial r} = \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r}$$

และใช้สมการ (2.33) กับพจน์สุดท้ายจะได้

$$r \frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial r} = \frac{\partial u}{\partial r} - \varepsilon_{\theta\theta} \quad (2.36)$$

และจากสมการ (2.32) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r \frac{\partial \epsilon_{\theta\theta}}{\partial r} = \epsilon_r - \epsilon_{\theta\theta} \quad (2.37)$$

หรือ

$$\frac{d}{dr}(r\epsilon_{\theta\theta}) = \epsilon_r \quad (2.38)$$

สำหรับความสัมพันธ์ของความเครียด-ความเค้น-อุณหภูมิตามที่ได้ศึกษามาจะเป็น

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})] + \alpha\Delta T \quad (2.39)$$

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E} [\sigma_{\theta\theta} - \nu(\sigma_r + \sigma_{zz})] + \alpha\Delta T \quad (2.40)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_r + \sigma_{\theta\theta})] + \alpha\Delta T = \text{ค่าคงที่} \quad (2.41)$$

เมื่อ E, ν , α คือค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น, อัตราส่วนปัวร์ซอง และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากอุณหภูมิ ตามลำดับ

2.5.4 ค่าความเค้นในทรงกระบอกปลายปิด

พิจารณาทรงกระบอกปลายปิดอันหนึ่ง ภายในทรงกระบอกตกอยู่ภายใต้ความดัน P_1 ส่วนภายนอกมีความดัน P_2 ขณะที่แรงตามแนวแกนมีค่า F และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่า ΔT ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในทรงกระบอกจะเป็นความเค้นตั้งฉาก σ_r , $\sigma_{\theta\theta}$ และ σ_{zz} โดยการหาค่าความเค้นเหล่านี้หาได้จาก การนำเอาสมการ (2.39) และ (2.40) แทนลงในสมการที่ (2.41) จะได้

$$r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{E} [\sigma_{\theta\theta} - \nu(\sigma_r + \sigma_{zz})] + \alpha\Delta T \right) = \left(\frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})] + \alpha\Delta T \right) - \left(\frac{1}{E} [\sigma_{\theta\theta} - \nu(\sigma_r + \sigma_{zz})] + \alpha\Delta T \right)$$

และในเมื่อค่า α , ν และ E เป็นค่าคงที่ของวัสดุ เราจะได้

$$\frac{rd\sigma_{\theta\theta}}{Edr} - \frac{r\nu d\sigma_r}{Edr} - \frac{r\nu d\sigma_{zz}}{Edr} + r\alpha \frac{d\Delta T}{dr} = \frac{r}{E} (\sigma_r - \sigma_{\theta\theta}) + \frac{\nu}{E} (\sigma_r - \sigma_{\theta\theta})$$

แต่จากสมการที่ (2.24) จะได้ค่าทางขวามือของสมการเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{r}{E} \frac{d\sigma_{\theta\theta}}{dr} - \frac{rv}{E} \frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{rv}{E} \frac{d\sigma_{zz}}{dr} + r\alpha \frac{d\Delta T}{dr} = -\frac{r}{E} \frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{rv}{E} \frac{d\sigma_r}{dr}$$

หรือ

$$\frac{r}{E} \frac{d\sigma_{\theta\theta}}{dr} - \frac{rv}{E} \frac{d\sigma_{zz}}{dr} + r\alpha \frac{d\Delta T}{dr} = -\frac{r}{E} \frac{d\sigma_r}{dr} \quad (2.42)$$

จากสมการ (2.41) หาคอนุพันธ์เทียบกับ r จะได้

$$\frac{d\varepsilon_{zz}}{dr} = \frac{d}{dr} \left\{ \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - v(\sigma_r + \sigma_{\theta\theta})] + \alpha \Delta T \right\} = 0$$

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma_{zz}}{dr} - \frac{v}{E} \frac{d}{dr} (\sigma_r + \sigma_{\theta\theta}) + \alpha \frac{d(\Delta T)}{dr} = 0$$

หรือ

$$\frac{d\sigma_{zz}}{dr} - v \frac{d}{dr} (\sigma_r + \sigma_{\theta\theta}) + \alpha E \frac{d(\Delta T)}{dr} = 0 \quad (2.43)$$

แทนค่าสมการ (2.42) ลงในสมการ (2.43) จะได้

$$\frac{r}{E} \frac{d\sigma_{\theta\theta}}{dr} - \frac{rv}{E} \left[v \frac{d}{dr} (\sigma_r + \sigma_{\theta\theta}) - \sigma E \frac{d(\Delta T)}{dr} \right] + r\alpha \frac{d\Delta T}{dr} = -\frac{r}{E} \frac{d\sigma_r}{dr}$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{r}{E} (1-v^2) \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{r}{E} (1-v^2) \frac{d\sigma_{\theta\theta}}{dr} + (1+v)r\alpha \frac{d\Delta T}{dr} = 0$$

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + r \frac{d\sigma_{\theta\theta}}{dr} + r \frac{d\sigma}{dr} \left(\frac{2E(\Delta T)}{(1-v)} \right) = 0$$

หรือ

$$\frac{d}{dr} \left\{ \sigma_r + \sigma_{\theta\theta} + \frac{\alpha E (\Delta T)}{1-v} \right\} = 0 \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะพบว่าสมการที่ (2.44) นี้ ได้มากจากความสัมพันธ์ของความเค้น ความเครียด และ อุณหภูมิของ วัสดุ และสมการความสมดุล (Equation of Equilibrium) ซึ่งทำให้เราแน่ใจได้ว่าระบบความเค้นดังกล่าวนี้จะทำให้ทรงกระบอกตกอยู่ในสภาพสมดุล สำหรับสมการการเข้ากันได้ (Compatibility Equation) นั้นเนื่องจากเราเริ่มต้นการวิเคราะห์จากการขจัดที่เกิดขึ้นบนทรงกระบอก ดังนั้นสมการการเข้ากันได้จะเป็นจริงอยู่แล้ว

ถ้าเราหาปริพันธ์ของสมการ (2.44) เราจะได้

$$\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} = 2C_1 \quad (2.45)$$

เมื่อ $2C_1$ เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการหาปริพันธ์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ 2 ที่รวมอยู่ด้วยนั้นเพื่อความง่ายในการพิจารณาต่อไป ต่อจากนั้นแทนค่า $\sigma_{\theta\theta}$ จากสมการ (2.25) ลงในสมการ (2.45) จะได้

$$\sigma_{rr} + \frac{d}{dr}(r\sigma_{rr}) + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} = 2C_1$$

ใช้ r คูณตลอด

$$r\sigma_{rr} + r \frac{d}{dr}(r\sigma_{rr}) + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} r = 2C_1 r$$

หรือ

$$\frac{d}{dr}(r^2\sigma_{rr}) + \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} r = 2C_1 r$$

$$\frac{d}{dr}(r^2\sigma_{rr}) = -\frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} r - 2C_1 r \quad (2.46)$$

จากนั้นหาปริพันธ์สมการ (2.46) อีกครั้งหนึ่งจะได้

$$r^2\sigma_{rr} = -\int_a^r \frac{\alpha E \Delta T r dt}{1-\nu} + C_1 r^2 + c_2$$

โดยการหาปริพันธ์นี้ จะเริ่มต้นจากรัศมีภายในของทรงกระบอก a ถึงรัศมี r ใด ๆ ของทรงกระบอก หรือหากนำ r^2 หาสมการตลอด จะได้

$$\sigma_{rr} = -\frac{\alpha E}{(1-\nu)r^2} \int_a^r (\Delta T) r dr + C_1 + \frac{C_2}{r^2} \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าคงที่จากการหาปริพันธ์ C_1 และ C_2 จะหาได้จากสภาพขอบเขตของทรงกระบอกซึ่งสามารถกำหนดได้ดังนี้

- ที่ผิวด้านในของทรงกระบอก หรือที่ $r = a$ ค่าความเค้นดึงจากหรือความเค้นในแนวรัศมี σ_r จะเท่ากับค่าความดันภายใน $-p_1$
- ที่ผิวด้านนอกของทรงกระบอก หรือที่ $r = b$ ค่าความเค้นดึงจากหรือความเค้นในแนวรัศมี σ_r จะเท่ากับค่าความดันภายนอก $-p_2$

สาเหตุที่ความเค้นมีเครื่องหมายเป็นลบเพราะความดันจะเป็นความเค้นกด ดังนั้นเมื่อแทนค่า $\sigma_r = -p_1$ ที่ $r = a$ และ $\sigma_r = -p_2$ ที่ $r = b$ และแก้สมการหาค่าคงที่จากการหาปริพันธ์ ซึ่งจะได้

$$C_1 = \frac{1}{b^2 - a^2} \left(p_1 a^2 - p_2 b^2 + \frac{\alpha E}{1 - \nu} \int (\Delta T) r dr \right) \quad (2.48)$$

$$C_2 = -p_1 a^2 \quad (2.49)$$

เมื่อทราบค่า C_1 และ C_2 ก็จะสามารถทราบค่า σ_r ได้จากสมการ (2.47) ส่วนการหาค่า $\sigma_{\theta\theta}$ จะได้จากการแทนค่า σ_r และ C_1 ลงในสมการ (2.45) นั่นคือ

$$\frac{\sigma_r + \sigma_{\theta\theta}}{2} = \frac{p_1 a^2 - p_2 b^2}{b^2 - a^2} - \frac{\alpha E \Delta T}{2(1 - \nu)} + \frac{E}{(1 - \nu)(b^2 - a^2)} \int (\Delta T) r dr \quad (2.50)$$

ซึ่งเราสามารถใส่สมการทั้งสองหาค่าความเค้นในทรงกระบอกทั้งสองแนวได้

อย่างไรก็ตามการที่เราจะหาปริพันธ์ในพจน์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิได้ เราจำเป็นต้องทราบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของรัศมีเสียก่อน ซึ่งการจะหาค่าฟังก์ชันได้เราจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวข้องในเรื่องการถ่ายเทความร้อนอยู่บ้าง ซึ่งทำให้อยู่นอกขอบข่ายที่เราจะศึกษาในวิชานี้ ดังนั้นในส่วนต่อไปเราจะกล่าวถึงค่าความเค้นและความเครียดในกรณีที่อุณหภูมิของทรงกระบอกคงที่

2.5.5 ความเค้นในทรงกระบอกที่มีอุณหภูมิคงที่

ในกรณีที่อุณหภูมิในทรงกระบอกอยู่ในสภาพสมดุล จะทำให้ $\Delta T = 0$ จากสมการที่ผ่านมาทำให้เราได้ค่าความเค้นในแนวรัศมีและแนวเส้นรอบวงเป็น

$$\sigma_r = \frac{p_1 a^2 - p_2 b^2}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} (p_1 - p_2) \quad (2.51)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_1 a^2 - p_2 b^2}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} (p_1 - p_2) \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และหากเรารวมสมการ (2.51) และ (2.52) เราจะได้

$$\sigma_r + \sigma_{\theta\theta} = \frac{2(p_1 a^2 - p_2 b^2)}{b^2 - a^2} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.53)$$

นั่นคือจากสมการ (2.53) เราจะได้ว่าผลรวมของความเค้นตามแนวรัศมีและความเค้นตามแนวเส้นรอบวง จะมีค่าคงที่ จากนั้นหากเราพิจารณาค่าความดัน p_1 และ p_2 เป็นความดันเกจ และหากเรากำหนดให้ความดันภายนอกของทรงกระบอกเป็นความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นกรณีที่เราพบอยู่ทั่วไป จะทำให้ $p_2 = 0$ ซึ่งจะได้

$$\sigma_r = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2 p_1}{r^2 (b^2 - a^2)}$$

หรือ

$$\sigma_r = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.54)$$

ทำนองเดียวกันเมื่อ $p_2 = 0$ จะได้

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.55)$$

และ

$$\sigma_r + \sigma_{\theta\theta} = \frac{2p_1 a^2}{b^2 - a^2} \quad (2.56)$$

สำหรับความเค้นตามแนวแกน σ_{zz} ของทรงกระบอก หากว่าอุณหภูมิคงที่หรือ $\Delta T = 0$ เมื่อพิจารณาทรงกระบอกปลายเปิด ค่าความเค้นตามแนวแกนเนื่องจากความดันจะเป็นศูนย์เพราะทรงกระบอกไม่ได้รับแรงตามแนวแกน ส่วนในกรณีของทรงกระบอกปลายปิดจะเป็น

$$\sigma_{zz} = \frac{p_1 a^2 - p_2 b^2}{b^2 - a^2} + \frac{F}{\pi(b^2 - a^2)} \quad (2.57)$$

เมื่อ F คือ แรงกระทำที่ปลายของทรงกระบอก ในกรณีที่ไม่มีแรงกระทำมีปลายทรงกระบอกปลายปิดอุณหภูมิคงที่และ $p_2 = 0$ จะได้

$$\sigma_{zz} = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \quad \text{ทรงกระบอกปลายปิด} \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสำหรับทรงกระบอกปลายเปิดในกรณีที่ไม่มีความเค้นกระทำที่ปลาย

$$\sigma_{zz} = 0 \quad \text{ทรงกระบอกปลายเปิด} \quad (2.59)$$

ส่วนกรณีที่มีแรงเมื่อ F กระทำที่ปลายของทรงกระบอกค่าความเค้นของทั้งสองกรณีก็จะเพิ่มขึ้นอีกเท่ากับ $\frac{F}{\pi(b^2 - a^2)}$ ในทั้งสองกรณี

2.5.6 การประยุกต์ใช้กับทรงกระบอกผิวบาง

สำหรับทรงกระบอกผิวบาง จะมีค่ารัศมีภายนอกและภายในคือค่า a และ b มีค่าใกล้เคียงกันมาก และนอกเหนือจากนั้นความหนาของทรงกระบอก $t = (b - a)$ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่ารัศมี a หรือ b ดังนั้นหากพิจารณา

$$\begin{aligned} b^2 - a^2 &= (b + a)(b - a) \\ &= (a + t + a)(t) \\ &= 2a + t)(t) \\ &= 2at \end{aligned}$$

ดังนั้น หากเราพิจารณาความเค้นในแนวรัศมี จะได้

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \\ &= \frac{p_1 a^2}{2t} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากรัศมีทรงกระบอกจะประมาณว่าเท่ากับรัศมีภายนอก $r \approx b$ ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$\sigma_r = 0 \quad \text{ทรงกระบอกผิวบาง} \quad (2.60)$$

สำหรับความเค้นในแนวเส้นรอบวง จะมีค่าเป็น

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

แต่เนื่องจากรัศมีทรงกระบอกจะประมาณว่าเท่ากับรัศมีภายนอก $r \approx b$ ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_1 a}{2t} (2)$$

หรือ

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_1 a}{t} \quad \text{ทรงกระบอกผิวบาง} \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในทำนองเดียวกันจะได้ สำหรับทรงกระบอกผิวบางปลายปิด

$$\sigma_{zz} = \frac{p_1 a}{2t} \quad \text{ทรงกระบอกผิวบางปลายปิด} \quad (2.62)$$

ซึ่งสมการ (2.60), (2.61) และ (2.62) ก็จะเป็นไปตามทฤษฎีของทรงกระบอกผิวบางที่ศึกษามาแล้ว

2.5.7 ค่าความเครียดบนทรงกระบอกหนาปลายเปิด

สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ค่าความเครียดบนทรงกระบอกหนาปลายเปิด หากเราพิจารณาทรงกระบอกหนาปลายเปิด ซึ่งความดันภายนอกเป็นความดันบรรยากาศ $p_2 = 0$ และอุณหภูมิคงที่ ซึ่งเราได้ความเค้นดังนี้

$$\sigma_r = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_{zz} = 0$$

ดังนั้นค่าความเครียดหาได้จาก

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} \left[\frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) - \nu \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \right]$$

$$\epsilon_r = \frac{p_1 a^2}{E b^2 - a^2} \left[\left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) - \nu \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \right] \quad (2.63)$$

ทำนองเดียวกันจะได้

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{p_1 a^2}{E b^2 - a^2} \left[\left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) - \nu \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \right] \quad (2.64)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{-2\nu p_1 a^2}{E (b^2 - a^2)} \quad (2.65)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.8 การหาค่าความเค้นจากความเครียด

ในกรณีที่ผ่านมาเป็นการหาความเค้นที่เกิดในทรงกระบอกจากความดันที่กำหนดให้ ดังนั้นหากเราไม่ทราบค่าความดันภายในทรงกระบอกจะไม่สามารถหาค่าความเค้นภายในทรงกระบอกได้ ซึ่งในทางปฏิบัติบางกรณีค่าความดันในทรงกระบอกอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเครื่องมือพื้นฐานไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ก็ได้ หรือในกรณีที่เรารู้ค่าความดันและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในทรงกระบอกและต้องการที่จะเปรียบเทียบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากการวัดค่าจริงกับค่าที่เกิดขึ้นจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความคล้ายคลึงและแตกต่างกันเล็กน้อยเพียงใด เราก็จะสามารถที่จะทำได้โดยการหาค่าความเค้นจากค่าความเครียดสามารถทำได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดสำหรับวัสดุในย่านยืดหยุ่น เมื่อไม่มีความเครียดในแนวแกนและทรงกระบอกเป็นทรงกระบอกปลายเปิดได้เป็น

$$\sigma_{\pi} = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_{\pi} + \nu\epsilon_{\theta\theta}) \quad (2.66)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_{\theta\theta} + \nu\epsilon_{\pi}) \quad (2.67)$$

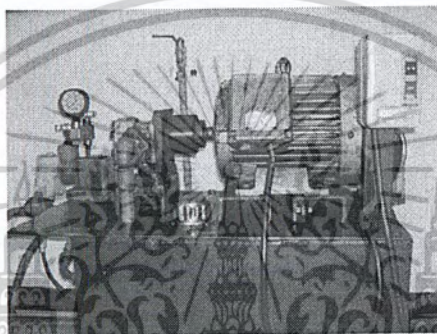
บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ปัมป์ไฮดรอลิก

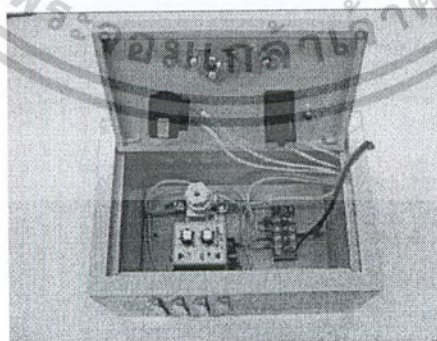
เป็นปั๊มไฮดรอลิกที่มีขนาดความดันสูงสุด 250 bar และใช้เป็นเครื่องมือในการอัดน้ำมันไฮดรอลิกเข้าสู่ทรงกระบอกผนังหนาที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 13 แสดงชุดปั๊มไฮดรอลิกที่ใช้อัดแรงดันในการทดลอง

3.1.2 ชุดกล่อง timer

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมเวลาในการอัดน้ำมันให้เป็นวัฏจักร โดยจะตั้งเวลา on-off ไว้ที่ 4 และ 1 วินาทีตามลำดับ

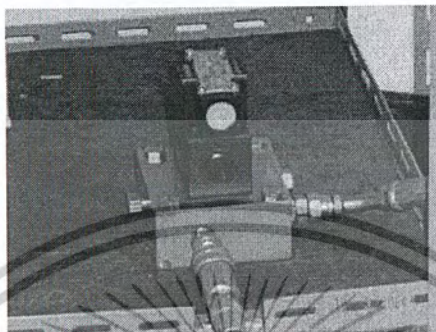


รูปที่ 14 แสดงชุด timer ที่ใช้ควบคุมเวลาในการอัดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 Solenoid valve

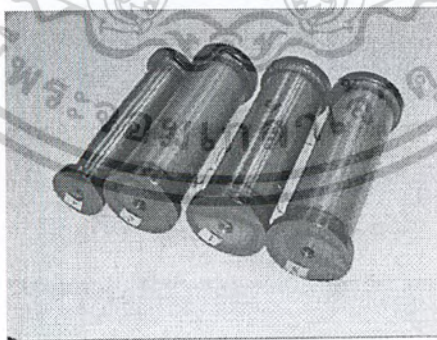
เลือกใช้ Solenoid valve ที่มีขนาดช่องทางเข้าออก 4 หุน แบบ 4/3 เป็นวาล์วควบคุมทิศทางการไหล (Directional valve)



รูปที่ 15 แสดงชุด solenoid valve ที่ใช้ควบคุมทางเดินน้ำมัน

3.1.4 ทรงกระบอกผนังหนาที่ใช้ในการทดลอง

ทรงกระบอกผนังหนาที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 9 กระบอก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 43 , 60 และ 74 มิลลิเมตร โดยแต่ละขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จะแบ่งเป็น 3 ความหนา คือ 5 , 6 และ 7 มิลลิเมตร โดยแต่ละกระบอกจะมีจะเชื่อมปิดหัวท้ายให้เป็น ทรงกระบอกผนังหนาแบบปลายปิดด้วยหน้าแปลน ดังรูปที่ 16

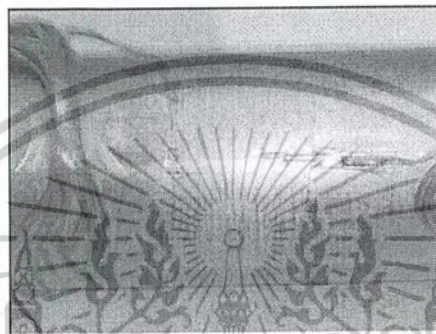


รูปที่ 16 แสดงทรงกระบอกผนังหนาที่ใช้ทดลอง

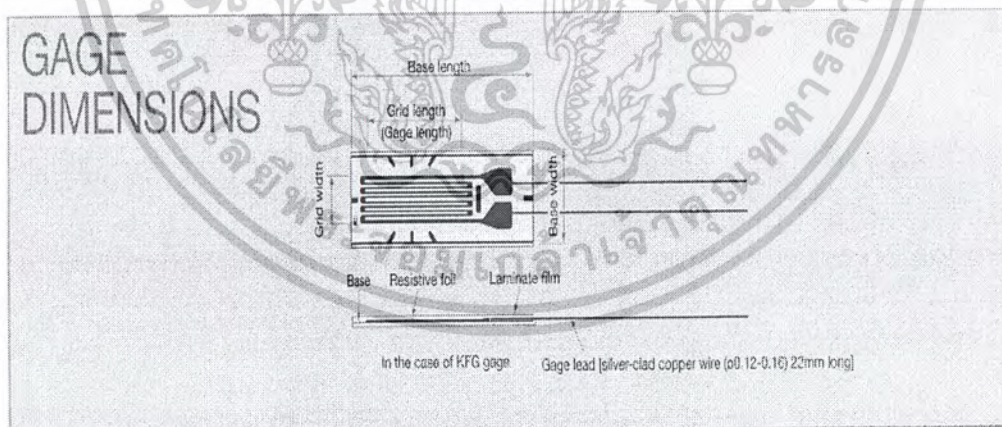
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 Strain Gages

เลือกใช้ Strain Gages รุ่น KFG-2-120-C1-11-L1M2R ทั้งหมด 18 ตัว พร้อมด้วยกาวติด Strain Gages โดยการติด Strain Gages จะติดให้ห่างจากหัวและท้ายของกระบอกให้มากที่สุดเพราะที่ส่วนหัวและท้ายของกระบอกจะมีความเข้มของความเค้นสูง



รูปที่ 17 แสดงชิ้นงานที่ติด Strain Gages

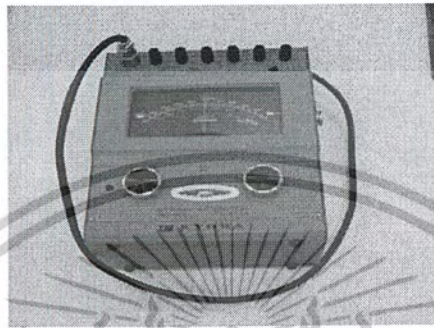


รูปที่ 18 แสดงลักษณะ Strain Gages

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 Strain Indicator

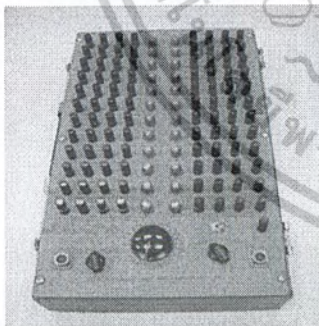
Strain Indicator ยี่ห้อ KYOWA รุ่น SDB-321 B ซึ่งเป็นเครื่องมืออ่านค่าของความเครียด (Strain) เป็นแบบ Analog ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 แสดงเครื่องมืออ่านค่าความเครียด (Strain Indicator)

3.1.7 Switch Box

Switch Box ยี่ห้อ KYOWA รุ่น SS-24 R มี 24 chanal ที่สามารถต่อกับ Strain Gages 24 ตัวได้ พร้อมกัน ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 Switch Box

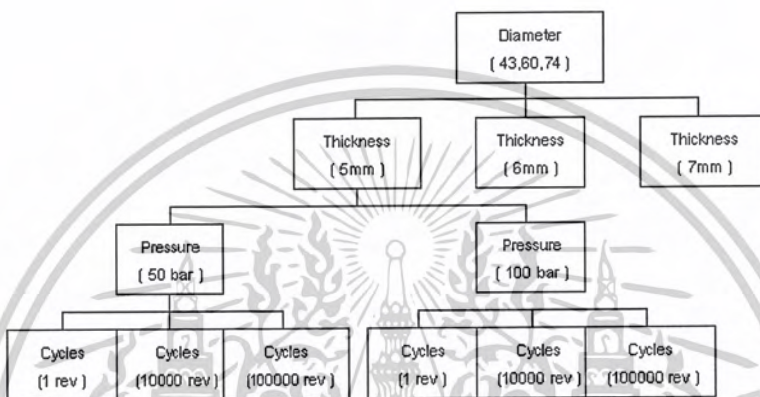


รูปที่ 20 แสดงการเชื่อมต่อ Strain gages

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

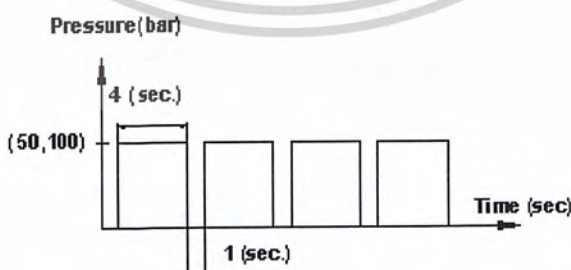
3.2 วิธีการทดลอง

นำชุดทดลองถังทรงกระบอกแบบปลายปิด แต่ละขนาดต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์วงจรไฮดรอลิก วัดค่าความต้านทานที่ได้จาก strain gauge นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดจากสมการ หลังจากนั้นนำค่าความเครียดที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเค้น จากสมการความเค้นของทรงกระบอกผนังหนา จะมีการทดลองที่ค่าความดัน ความหนาของผนังท่อ และจำนวนรอบที่ผ่านกระบวนการอัดความดันที่ขนาดต่างๆ ดังนี้



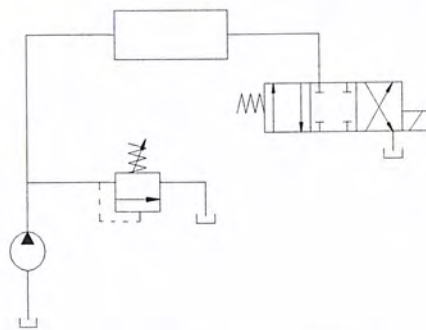
รูปที่ 22 แสดงแผนงานการทดลอง

ในการอัดน้ำมันไฮดรอลิกเพื่อให้ความดันกับชิ้นงานทดสอบจะทำในลักษณะที่เพิ่มความดันให้คงที่ ค้างไว้ที่ระยะเวลาหนึ่ง และลดความดันลง แล้วค้างไว้ ทำลักษณะเป็นcycle ตามลักษณะ รูปที่ 6 เพื่อทดสอบชิ้นงานทดลองที่ผ่านกระบวนการอัดความดัน และยังไม่ผ่านกระบวนการอัดความดัน

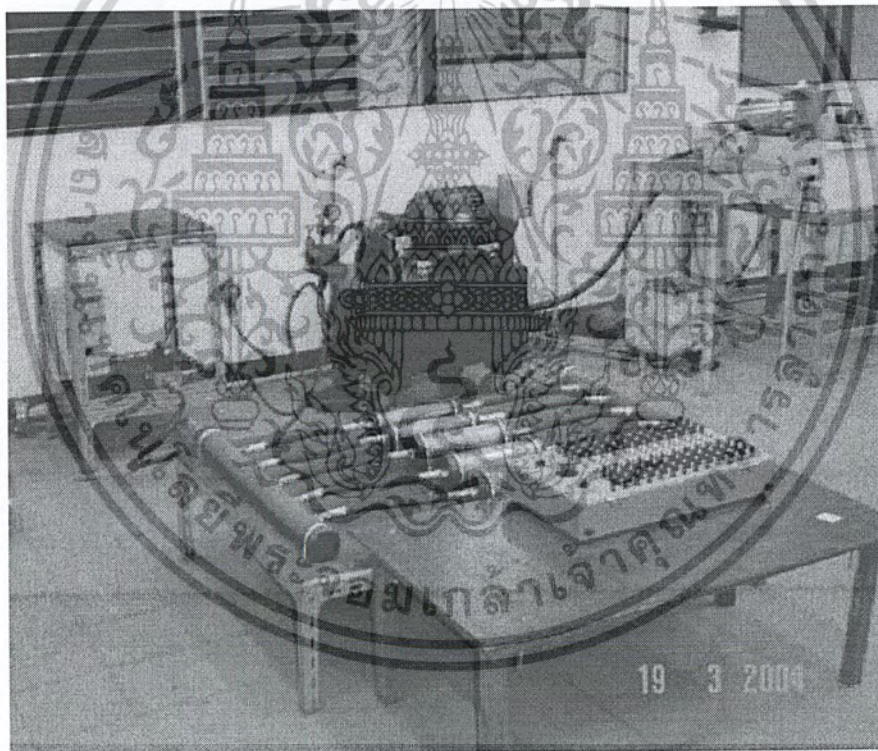


รูปที่ 23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับ ความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 24 แสดงวงจรไฮดรอลิก



รูปที่ 25 ภาพแสดงชุดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การคำนวณ

4.1 สมการการคำนวณทางทฤษฎี

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2}$$

$$\sigma_{rr} = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right)$$

4.2 การคำนวณทางทฤษฎี

ในการคำนวณเราจะใช้คุณสมบัติ ASTM A106 B มีคุณสมบัติ

Tensile strength 415 MPa

Yield strength 240 MPa

Modulus of Elastic 200 GPa

Poisson's ratio 0.30

ในกรณีที่ทรงกระบอกมี $\phi=43$ มม. และหนา 5 มม. และอัดแรงดันที่ 50 bar

จะได้ว่า

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta} &= \frac{[(50 \cdot 10^5 \cdot 0.0215^2) / (0.0265^2 - 0.0215^2)] [1 + (0.0215^2 / 0.0215^2)]}{1} \\ &= 19.26 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\sigma_{zz} = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= \frac{(50 \cdot 10^5 \cdot 0.0165^2) / (0.0215^2 - 0.0165^2)}{1} \\ &= 9.63 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่า Stress จาก Strain ที่ได้จากการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.40, 2.41 จะได้

$$\epsilon_{\theta\theta}E = \sigma_{\theta\theta} - \nu\sigma_{zz}$$

$$\epsilon_{zz}E = \sigma_{zz} - \nu\sigma_{\theta\theta}$$

ในกรณีที่ทรงกระบอกมี $\phi=43$ มม.และหนา 5 มม.และอัดแรงดันที่ 50 bar

จะได้ค่า $\epsilon_{\theta\theta} = 0.000037$ และ $\epsilon_{zz} = 0.000148$

$$\epsilon_{\theta\theta}E = \sigma_{\theta\theta} - \nu\sigma_{zz}$$

$$0.000037 \cdot 200 \cdot 10^9 = \sigma_{\theta\theta} - (0.3\sigma_{zz})$$

$$7 \cdot 10^6 = \sigma_{\theta\theta} - (0.3\sigma_{zz})$$

และ

$$\epsilon_{zz}E = \sigma_{zz} - \nu\sigma_{\theta\theta}$$

$$0.000148 \cdot 200 \cdot 10^9 = \sigma_{zz} - (0.3\sigma_{\theta\theta})$$

$$29.6 \cdot 10^6 = \sigma_{zz} - (0.3\sigma_{\theta\theta})$$

แก้สมการหาค่าได้ $\sigma_{\theta\theta} = 19.26$ Mpa $\sigma_{zz} = 9.63$ Mpa



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

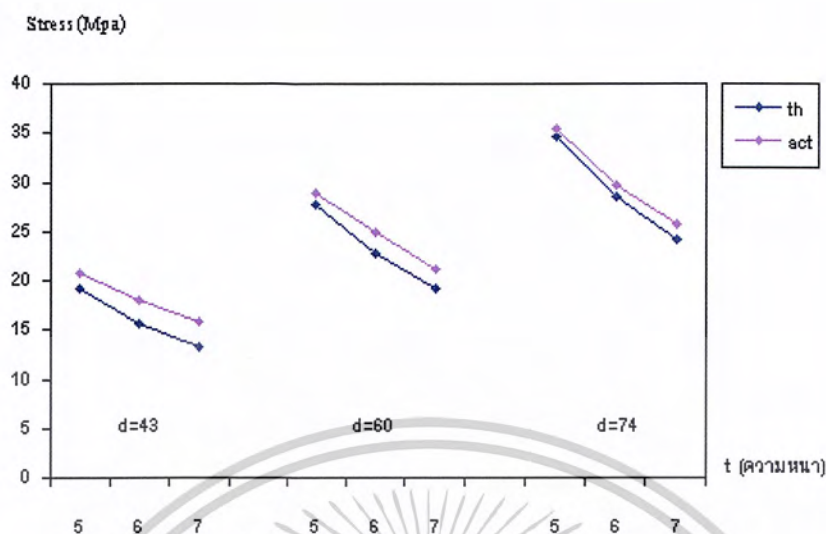
ผลการทดลอง

จากการทดลอง โดยการอัดน้ำมันไฮดรอลิกลงในทรงกระบอกผนังหนาแบบปลายปิดเป็นแบบ cycle ทั้ง 9 กระบอก ดังนี้

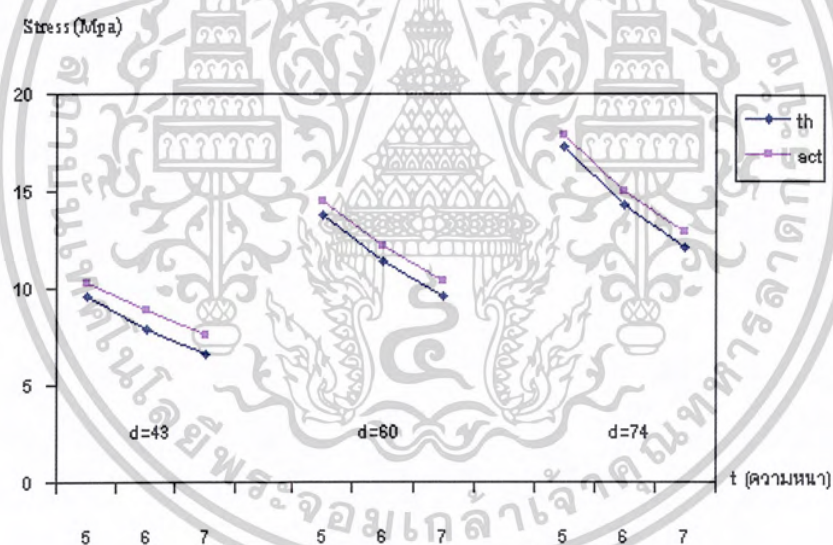
1. ขนาด $\varnothing=43$ มม. หนา 5 มม.
2. ขนาด $\varnothing=43$ มม. หนา 6 มม.
3. ขนาด $\varnothing=43$ มม. หนา 7 มม.
4. ขนาด $\varnothing=60$ มม. หนา 5 มม.
5. ขนาด $\varnothing=60$ มม. หนา 6 มม.
6. ขนาด $\varnothing=60$ มม. หนา 7 มม.
7. ขนาด $\varnothing=74$ มม. หนา 5 มม.
8. ขนาด $\varnothing=74$ มม. หนา 6 มม.
9. ขนาด $\varnothing=74$ มม. หนา 7 มม.

แล้วดูแนวโน้มของค่าความเค้นและความเครียดที่ความดัน 50 bar และ 100 bar ซึ่ง จะ แสดง ตารางการทดลองและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในทางทฤษฎีกับที่ได้จากการทดลองแสดงอยู่ในหน้าถัดไปจากนี้





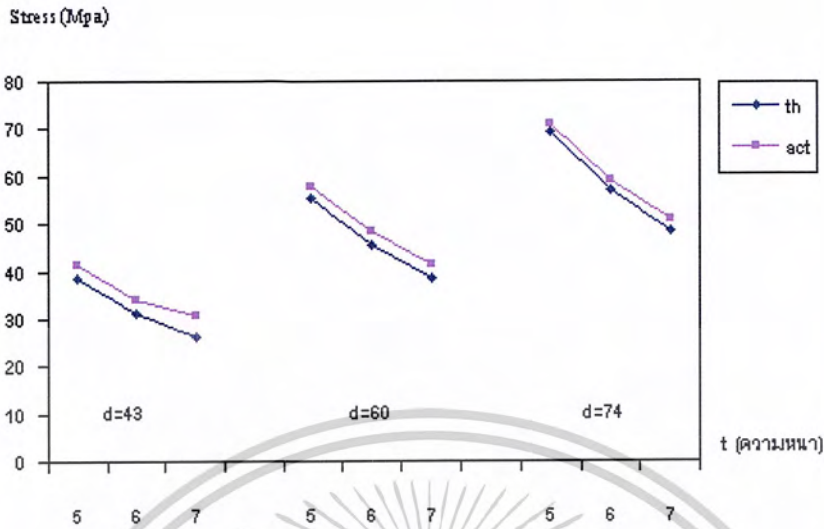
รูปที่ 26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นรัศมี ($\sigma_{\theta\theta}$) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 50 bar



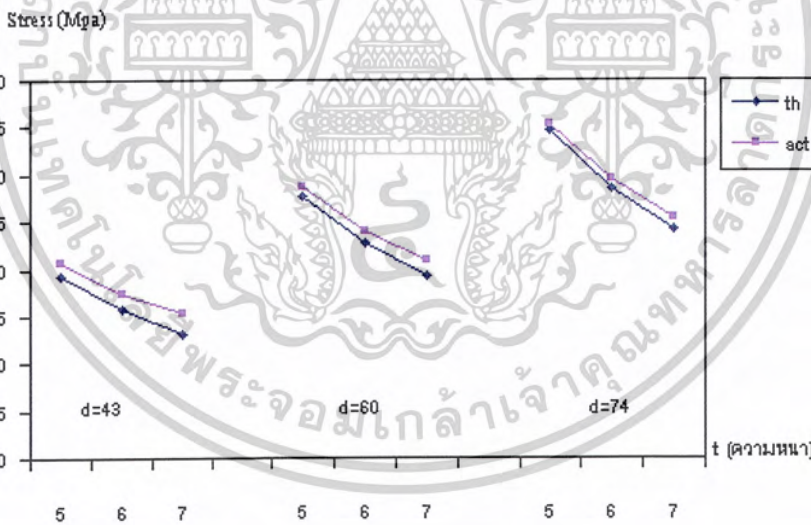
รูปที่ 27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 50 bar

จากรูปที่ 26-27 จะพบว่า ที่ความดัน 50 bar ขนาด $\varnothing=74$ ค่าความเค้นรัศมี และ ค่าความเค้นตามแนวแกน จะมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี มากกว่า ที่ $\varnothing=60$ และ $\varnothing=43$ และ ที่ความหนา $t=5$ จะมีค่าความเค้นใกล้เคียงกับทางทฤษฎี มากกว่าที่ $t=6$ และ $t=7$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



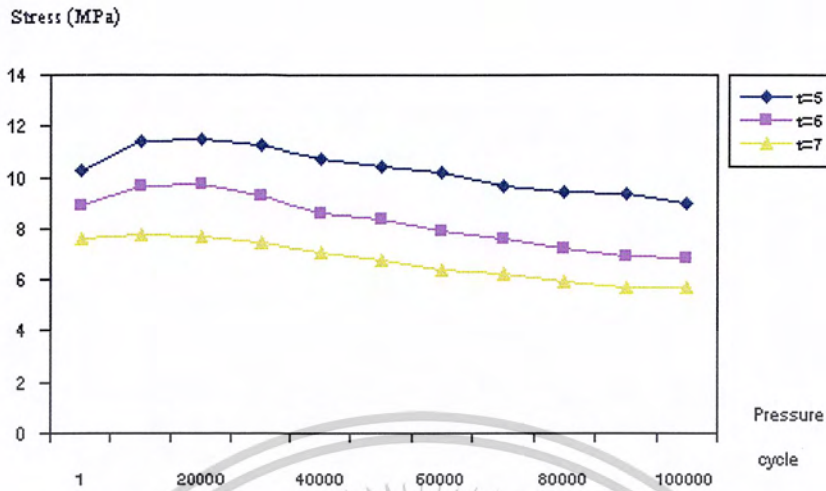
รูปที่ 28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นรัศ (σ_{θθ}) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 100 bar



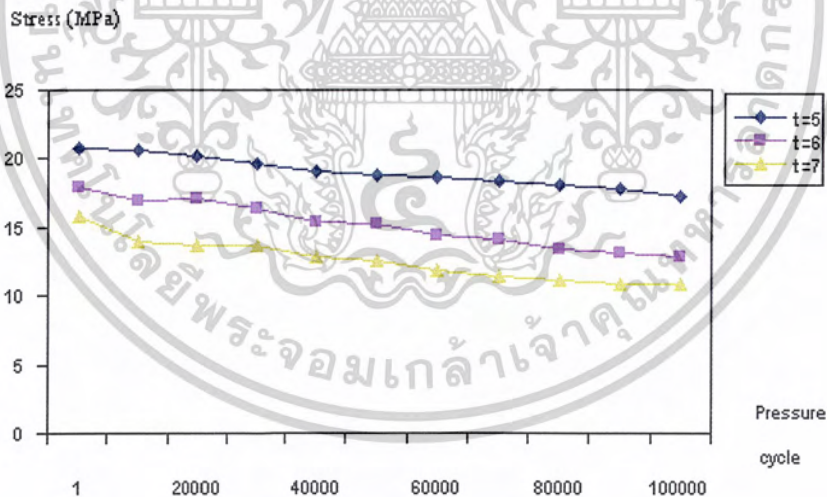
รูปที่ 29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 100 bar

จากรูปที่ 28-29 จะพบว่า ที่ความดัน 100 bar ขนาด Ø=74 ค่าความเค้นรัศและ ค่าความเค้นตามแนวแกน จะมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี มากกว่า ที่ Ø=60 และ Ø=43 และ ที่ความหนา t=5 จะมีค่าความเค้น ใกล้เคียงกับทางทฤษฎี มากกว่าที่ t=6 และ t=7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

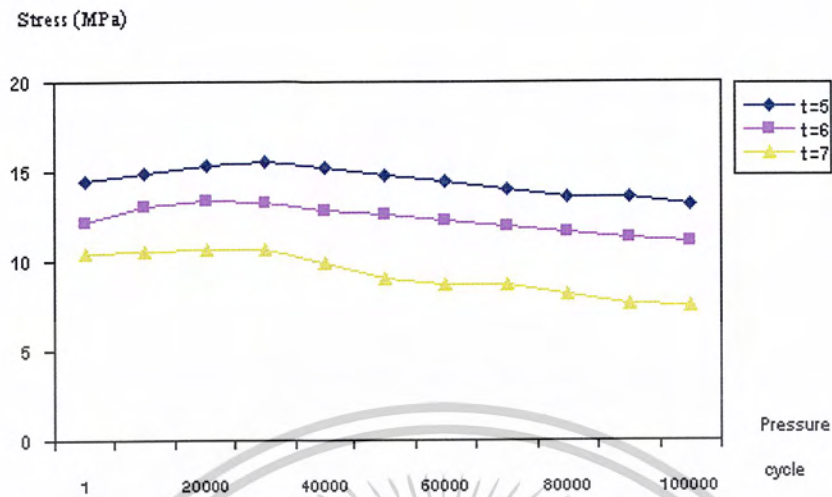


รูปที่ 30 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\phi=43$ ความดัน 50 bar

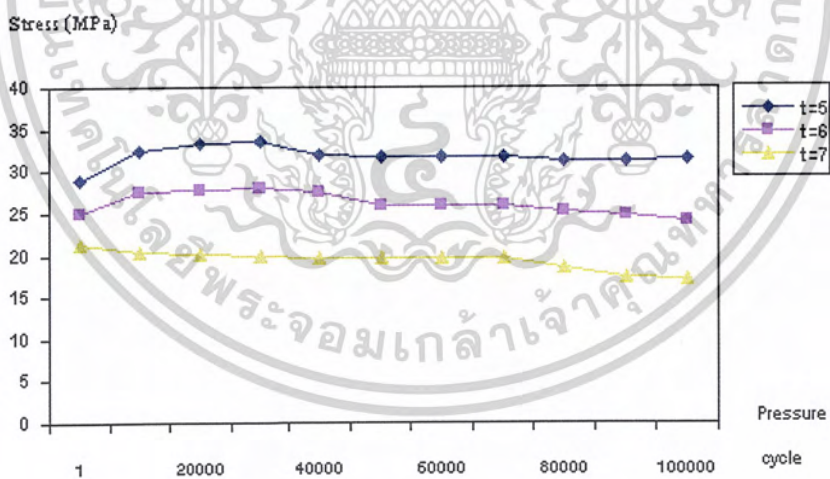


รูปที่ 31 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\phi=43$ ความดัน 50 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

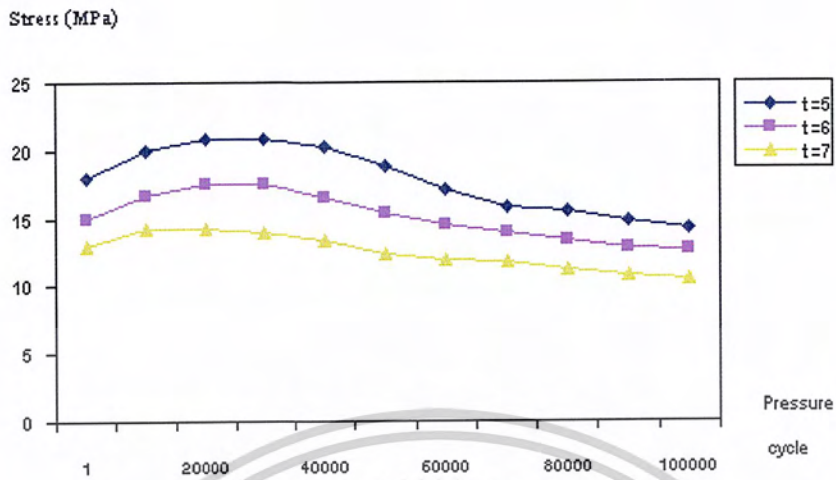


รูปที่ 32 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\varnothing=60$ ความดัน 50 bar

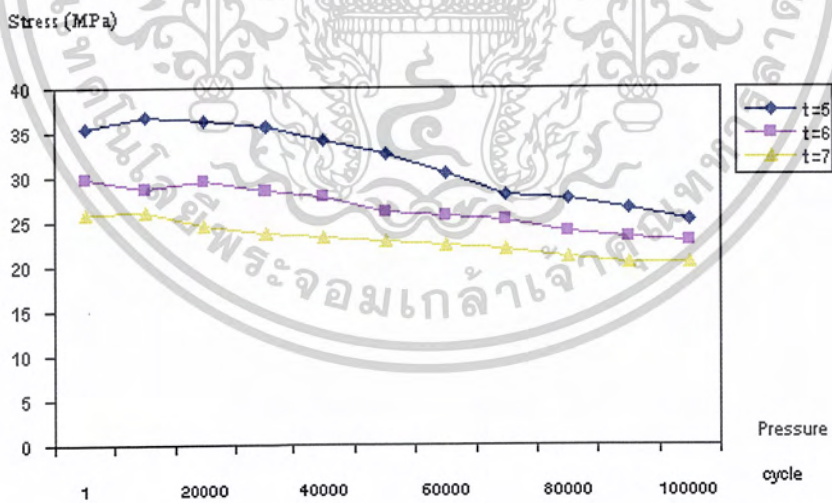


รูปที่ 33 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\varnothing=60$ ความดัน 50 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

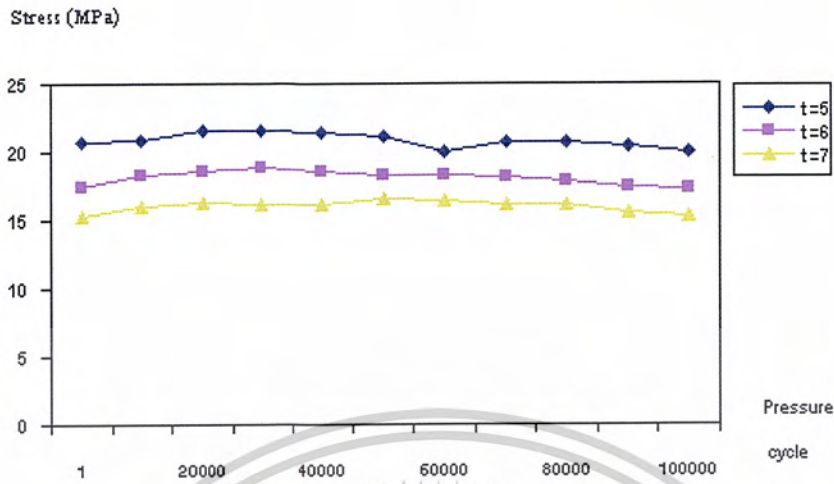


รูปที่ 34 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\phi=74$ ความดัน 50 bar

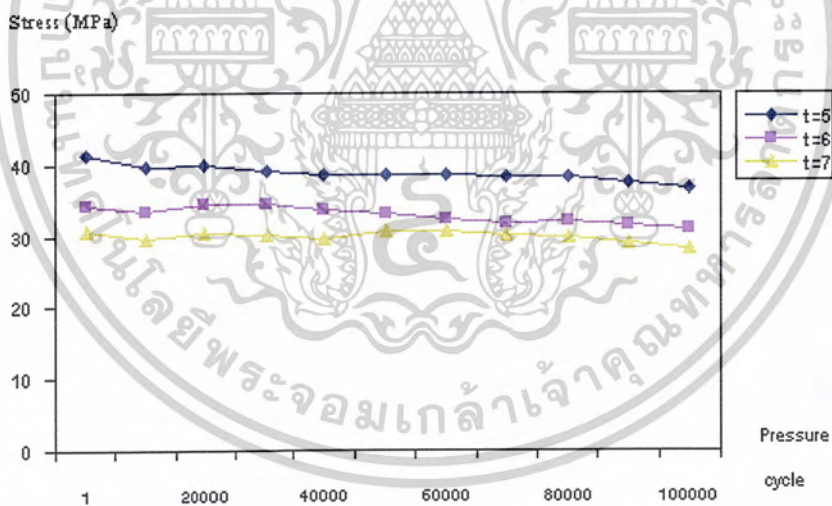


รูปที่ 35 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\phi=74$ ความดัน 50 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

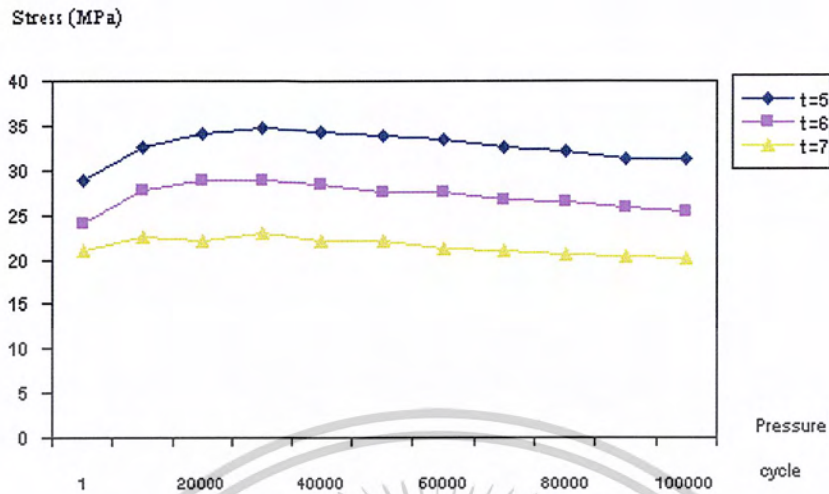


รูปที่ 36 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\phi=43$ ความดัน 100 bar

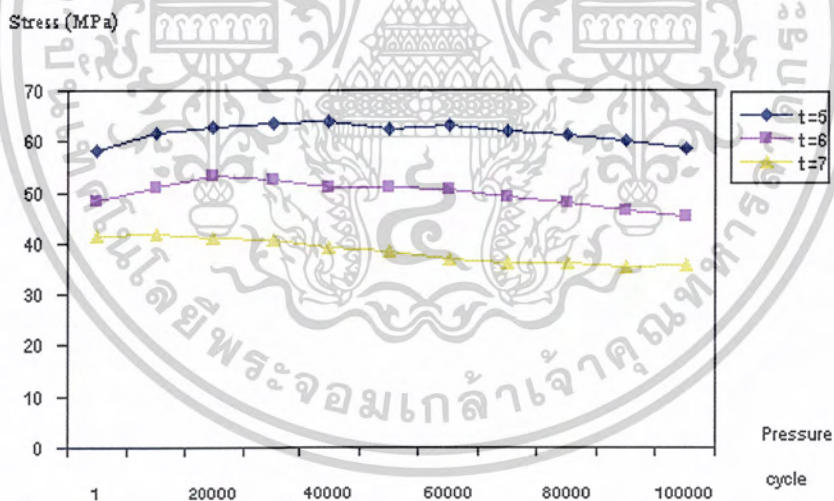


รูปที่ 37 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\phi=43$ ความดัน 100 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

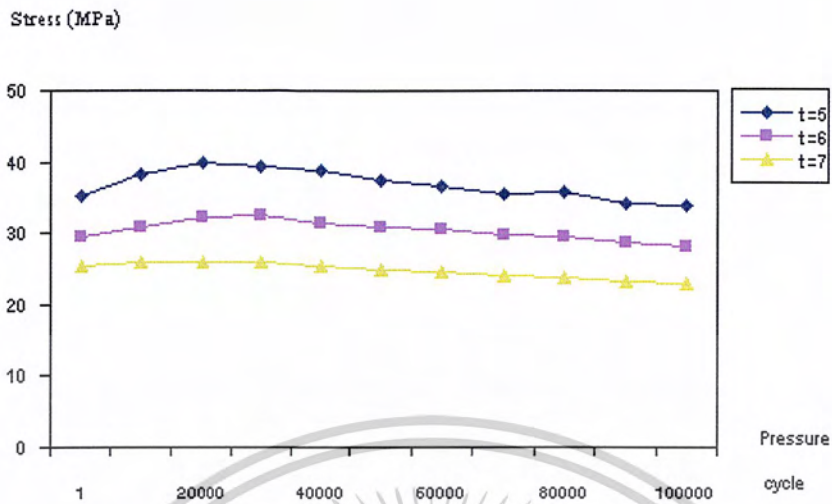


รูปที่ 38 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\phi=60$ ความดัน 100 bar

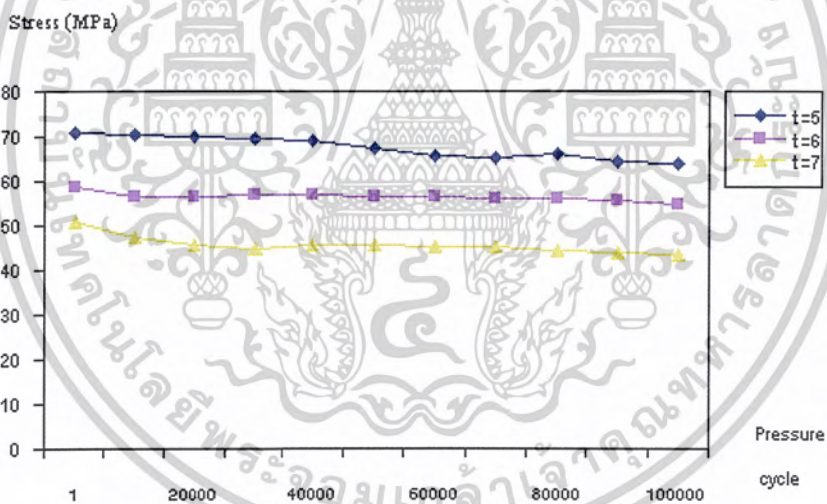


รูปที่ 39 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\phi=60$ ความดัน 100 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 40 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\phi=74$ ความดัน 100 bar



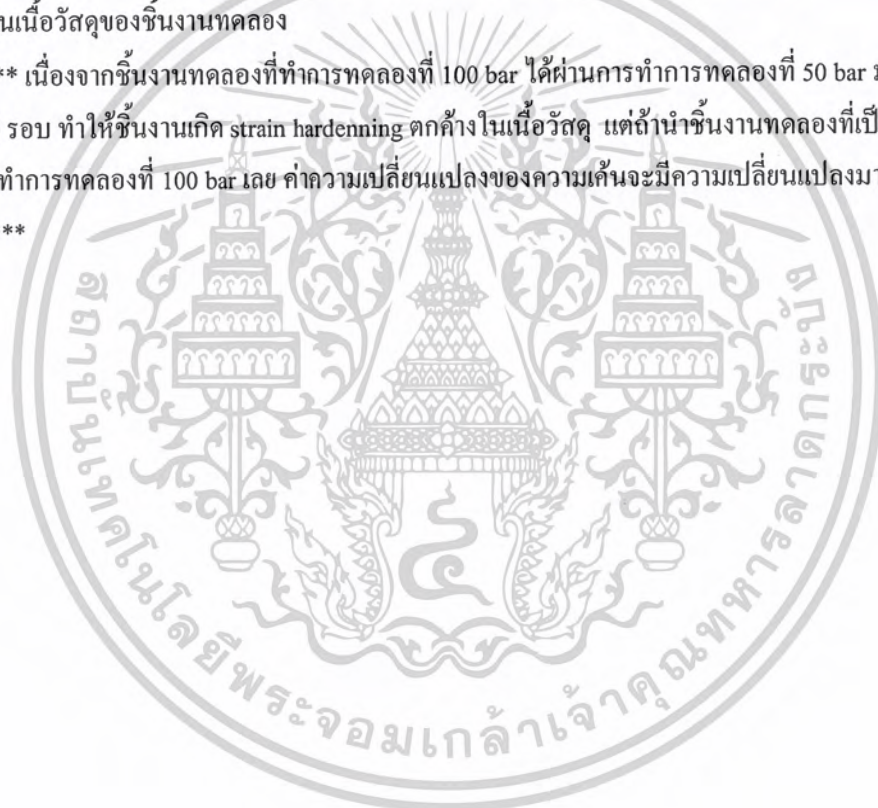
รูปที่ 41 กราฟ แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน ($\sigma_{\theta\theta}$) ที่ขนาด $\phi=74$ ความดัน 100 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 30-35 พบว่า ที่ 50 bar ความเค้นรัศ และ ความเค้นตามแนวแกนของชิ้นงานทดลอง ที่ 100,000 รอบมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ กับค่าความเค้นของชิ้นงานทดลอง ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอัดความดัน และ พบว่า ที่ความหนา $t=5$ mm. ค่าความเค้นจะมีค่าความเปลี่ยนแปลงมากกว่า ที่ความหนา $t=6$ mm. และ $t=7$ mm.ความเค้นรัศจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าความเค้นตามแนวแกนเมื่อดูจากกราฟ

จากรูปที่ 36-41 พบว่า ที่ 100 bar ความเค้นรัศ และ ความเค้นตามแนวแกนของชิ้นงานทดลอง ที่ 100,000 รอบมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ กับค่าความเค้นของชิ้นงานทดลอง ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอัดความดัน และ พบว่า ที่ความหนา $t=5$ mm. ค่าความเค้นจะมีค่าความเปลี่ยนแปลงมากกว่า ที่ความหนา $t=6$ mm.และ $t=7$ mm.ความเค้นรัศจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าความเค้นตามแนวแกน และ ความเปลี่ยนแปลงของกราฟจะมีความเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าที่ 50 bar เนื่องจากเกิด strain hardening ตกค้างในเนื้อวัสดุของชิ้นงานทดลอง

*** เนื่องจากชิ้นงานทดลองที่ทำการทดลองที่ 100 bar ได้ผ่านการทำการทดลองที่ 50 bar มาแล้วถึง 100,000 รอบ ทำให้ชิ้นงานเกิด strain hardening ตกค้างในเนื้อวัสดุ แต่ถ้านำชิ้นงานทดลองที่เป็น วัสดุใหม่ มาทำการทดลองที่ 100 bar เลย ค่าความเปลี่ยนแปลงของความเค้นจะมีความเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่ 50 bar ***



บทที่ 6

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 สรุปผลการทดลองจากกราฟ

ค่าการเกิด Strain ของทรงกระบอกผนังหนาในแนว Circumferential และ Longitudinal นั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความดันแบบแปรผันตามกัน คือเมื่อค่าความดันเพิ่มขึ้นค่า Strain ก็เพิ่มขึ้นด้วย ทั้ง 2 แนว และมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี

ในการวัดค่า Stress-Strain ในทรงกระบอกผนังหนาที่ขนาด \varnothing เดียวกันแต่ความหนาต่างกันนั้น พบว่าที่ความหนาน้อยที่สุดจะมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีมากที่สุดและในการวัดค่า Stress-Strain ในทรงกระบอกผนังหนาที่ความหนาเดียวกันแต่ความ \varnothing ต่างกันนั้น พบว่า ที่ \varnothing ใหญ่ที่สุดจะมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีมากที่สุด

ชิ้นงานทดลองที่ผ่านกระบวนการอัดความดันมาแล้วนั้น ชิ้นงานทดลองจะเกิดมีความเค้นลดลง วัสดุมีความแข็งมากขึ้น และค่าความยืดหยุ่นของโลหะมีค่าลดลง

6.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองเมื่อนำค่าที่วัดได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ทางทฤษฎีนั้นเห็นได้ว่าค่าที่ได้ส่วนใหญ่ ได้ค่าที่สอดคล้องสัมพันธ์กันมีเพียงบางตำแหน่งและบางจุดเท่านั้นที่ได้ค่าคลาดเคลื่อนไปจากแนวโน้ม โดยรวมซึ่งสามารถสรุปได้ว่าน่าจะเกิดจากสาเหตุดังนี้

1. เครื่องมือที่ใช้ในการวัด (Strain Indicator) นั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีการแกว่งจึงต้องใช้ในการเฉลี่ยค่า
2. เครื่องมือที่ใช้อ่านค่าความดัน (Pressure Gage) นั้นมีช่องการวัดค่อนข้างกว้างไม่ค่อยละเอียด ทำให้ความดันที่ใช้ อาจไม่ตรงกับความเป็นจริง
3. การขึ้นกลึงขึ้นรูปให้ได้ขนาดตามต้องการและการเชื่อมปิดหน้าแปลนหัวท้ายนั้น อาจเกิด Strain ตกค้างในเนื้อวัสดุทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนได้

6.3 ข้อเสนอแนะและการพัฒนา

ในการทำชุดทดลองขึ้นมาเพื่อศึกษาเชิงทดลอง และวิเคราะห์ ความเค้นในถังแรงดันแบบผนังหนา ของรูปทรงกระบอกแบบปลายปิดที่อุณหภูมิคงที่ทั้งที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอัดความดัน และผ่านกระบวนการอัดความดันจากน้ำมันไฮดรอลิก ที่ 1 รอบ, 10,000 รอบ และ 100,000 รอบตามลำดับ ผลที่ได้ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจในเรื่องนี้ดีขึ้นและเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการพัฒนาเพื่อลดทรัพยากรของภาระความดันที่สร้างขึ้นให้ใช้งานได้จริง แต่ในสภาพการจริงนั้นภาระความดันมีเงื่อนไขและองค์ประกอบที่ต้องพิจารณามาก ในการทดลองครั้งนี้ไม่สามารถกำหนดเงื่อนไขและองค์ประกอบที่ต้องพิจารณาให้เท่ากับสภาพการใช้งานจริงได้มาก เนื่องจากจะต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขบางอย่างบางอย่างที่ยังไม่ได้พิจารณาในการทดลองครั้งนี้ น่าจะก่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจได้ดีขึ้น จึงขอเสนอแนะแนวทางเพื่อผู้ที่มีความสนใจจะได้ศึกษาเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

1. เพิ่มจำนวนรอบที่ใช้ในการทำการทดลอง เพื่อจะได้ทราบถึงอายุการใช้งานของวัสดุ
2. เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการทำทรงกระบอกผนังหนา เพราะคุณสมบัติของวัสดุที่ต่างกันมีต่อการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียด
3. เปลี่ยนลักษณะการให้แรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดลอง เนื่องจากการรับแรงที่กระทำต่างกัน จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียดได้เช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่Diameter=43 mm		
ความหนา (t)	Stress ทางทฤษฎี(Mpa)	Stress ทางทดลอง(Mpa)
5	19.26	20.8
6	15.72	18
7	13.2	15.8
ที่Diameter=60 mm.		
5	27.69	28.9
6	22.73	24.9
7	19.19	21.2
ที่Diameter=74 mm		
5	34.65	35.5
6	28.52	29.8
7	24.14	25.8

ตารางที่ 1 แสดงค่าความเค้นรัศ (σ_{θθ}) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 50 bar

ที่Diameter=43 mm		
ความหนา (t)	Stress ทางทฤษฎี(Mpa)	Stress ทางทดลอง(Mpa)
5	9.63	10.3
6	7.86	8.9
7	6.6	7.6
ที่Diameter=60 mm.		
5	13.84	14.5
6	11.36	12.2
7	9.56	10.4
ที่Diameter=74 mm		
5	17.33	17.89
6	14.36	15
7	12.07	12.9

ตารางที่ 2 แสดงค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 50 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่Diameter=43 mm		
ความหนา (t)	Stress ทางทฤษฎี(Mpa)	Stress ทางทดลอง(Mpa)
5	38.52	41.3
6	31.15	34.2
7	26.4	30.6
ที่Diameter=60 mm.		
5	55.38	58.04
6	45.46	48.5
7	38.38	41.3
ที่Diameter=74 mm		
5	69.3	71
6	57.04	58.9
7	48.28	58.9

ตารางที่ 3 แสดงค่าความเค้นรัศ ($\sigma_{\theta\theta}$) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 100 ba

ที่Diameter=43 mm		
ความหนา (t)	Stress ทางทฤษฎี(Mpa)	Stress ทางทดลอง(Mpa)
5	19.26	20.8
6	15.72	18
7	13.2	15.8
ที่Diameter=60 mm.		
5	27.69	28.9
6	22.73	24.9
7	19.19	21.2
ที่Diameter=74 mm		
5	34.65	35.5
6	28.52	29.8
7	24.14	25.8

ตารางที่ 4 แสดงค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง ที่ความดัน 100 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

t (mm) \ N(cycle)	N(cycle)										
	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	10.3	11.38	11.47	11.27	10.7	10.42	10.19	9.69	9.4	9.34	8.99
6	8.9	9.67	9.73	9.32	8.61	8.39	7.91	7.63	7.2	6.92	6.85
7	7.6	7.78	7.71	7.49	7.08	8.79	6.37	6.24	5.96	5.67	5.67

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\phi=43$ ความดัน 50 bar

t (mm) \ N(cycle)	N(cycle)										
	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	14.5	14.88	15.36	15.49	15.18	14.83	14.48	14.04	13.62	13.56	13.2
6	12.2	13.09	13.36	13.27	12.83	12.61	12.26	11.97	11.62	11.34	11.07
7	10.4	10.5	10.7	10.7	9.9	9	8.68	8.68	8.13	7.58	7.51

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ขนาด $\phi=60$ ที่ความดัน 50 bar

t (mm) \ N(cycle)	N(cycle)										
	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	17.84	20.4	20.88	20.9	20.22	18.79	17.09	15.84	15.49	14.79	14.17
6	15	16.63	17.49	17.53	16.52	15.4	14.52	13.95	13.4	12.77	12.63
7	12.9	14.22	14.19	13.93	13.36	12.41	11.91	11.78	11.14	10.72	10.5

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ขนาด $\phi=74$ ที่ความดัน 50 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

t (mm) \ N(cycle)	N(cycle)										
	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	20.8	20.61	20.24	19.58	19.01	18.72	18.66	18.3	18.02	17.8	17.29
6	18.	16.9	17.12	16.39	15.38	15.32	14.37	14.08	13.26	13.07	12.85
7	15.8	13.93	13.71	13.64	12.92	12.64	11.91	11.47	11.18	10.9	10.9

ตารางที่ 8 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ (σ_{00}) ขนาด $\phi=43$ ที่ความดัน 50 bar

t (mm) \ N(cycle)	N(cycle)										
	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	28.9	32.26	33.2	33.64	32	31.6	31.6	31.6	31.2	31.2	31.36
6	24.9	27.4	27.8	28	27.4	26	26	26	25.3	24.8	24
7	21.2	20.3	20.08	19.8	19.73	19.67	19.6	19.6	18.44	17.27	17.06

ตารางที่ 9 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ (σ_{00}) ขนาด $\phi=60$ ที่ความดัน 50 bar

t (mm) \ N(cycle)	N(cycle)										
	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	35.5	36.81	36.21	35.67	34.06	32.63	30.33	28.15	27.64	26.63	25.25
6	29.8	28.79	29.64	28.46	27.75	26.02	25.75	25.18	24.02	23.23	22.79
7	25.8	26.06	24.65	23.78	23.2	22.72	22.37	21.93	21.14	20.41	20.35

ตารางที่ 10 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ (σ_{00}) ขนาด $\phi=74$ ที่ความดัน 50 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N(cycle) t (mm)	N(cycle)										
	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	20.7	20.9	21.62	21.51	21.38	21.16	20.01	20.72	20.66	20.46	20.04
6	17.5	18.22	18.57	18.79	18.52	18.33	18.28	18.15	17.84	17.49	17.29
7	15.3	16.03	16.35	16.21	16.08	16.63	16.41	16.21	16.15	15.51	15.31

ตารางที่ 11 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\phi=43$ ความดัน 100 bar

N(cycle) t (mm)	N(cycle)										
	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	28.81	32.52	34.19	34.83	34.37	33.95	33.51	32.66	32.17	31.15	31.23
6	24	27.69	28.83	28.79	28.46	27.6	27.6	26.7	26.37	25.69	25.42
7	20.9	22.59	22.17	22.85	22.17	21.97	21.29	21.03	20.59	20.24	20.15

ตารางที่ 12 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\phi=60$ ความดัน 100 bar

N(cycle) t (mm)	N(cycle)										
	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	35.25	38.13	39.84	39.42	38.77	37.36	36.74	35.58	35.78	34.28	33.93
6	29.47	31.01	32.19	32.62	31.45	30.79	30.5	29.84	29.4	28.74	28.26
7	25.4	26.02	26.08	25.89	25.34	24.83	24.61	24.17	23.69	23.12	22.9

ตารางที่ 13 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นตามแนวแกน (σ_{zz}) ที่ขนาด $\phi=74$ ความดัน 100 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N(cycle) t (mm)	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	41.3	39.67	40.08	39.05	38.61	38.55	38.7	38.4	38.19	37.53	36.81
6	34.2	33.4	34.57	34.63	33.75	33.09	32.28	31.84	32.15	31.64	30.99
7	30.6	29.62	30.5	30.06	29.62	30.79	30.72	30.06	29.84	29.05	28.39

ตารางที่ 14 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ (σ_{00}) ขนาด $\phi=43$ ที่ความดัน 100 bar

N(cycle) t (mm)	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	58.04	61.75	62.66	63.45	63.91	62.5	63.05	62.19	61.25	60.15	58.77
6	48.5	50.8	53.45	52.63	50.8	50.8	50.68	49.01	47.91	46.3	45.42
7	41.3	41.97	41.25	40.85	39.25	38.59	36.98	36.1	35.97	35.47	35.84

ตารางที่ 15 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ (σ_{00}) ขนาด $\phi=60$ ที่ความดัน 100 bar

N(cycle) t (mm)	1	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	100,000
5	71	70.44	70.15	69.42	69.23	67.2	65.8	65.27	65.93	64.28	63.78
6	58.9	56.7	56.66	56.79	56.83	56.63	56.35	56.15	56.02	55.82	54.88
7	50.81	47.4	45.62	44.96	45.8	45.45	45.38	45.25	44.3	43.73	43.67

ตารางที่ 16 แสดงผลการทดลองค่าความเค้นรัศ (σ_{00}) ขนาด $\phi=74$ ที่ความดัน 100 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงสัญลักษณ์วงจรไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PUMPS		MISCELLANEOUS UNITS (CONT.)	
PUMP, SINGLE FIXED DISPLACEMENT		TEMPERATURE GAGE	
PUMP, SINGLE VARIABLE DISPLACEMENT		FLOW METER (FLOW RATE)	
MOTOR AND CYLINDERS		ELECTRIC MOTOR	
MOTOR, ROTARY FIXED DISPLACEMENT		ACCUMULATOR, SPRING- LOADED	
MOTOR, ROTARY VARIABLE DISPLACEMENT		ACCUMULATOR, GAS- CHARGED	
MOTOR, OSCILLATING		FILTER OR STRAINER	
CYLINDER, SINGLE-ACTING		HEATER	
CYLINDER, DOUBLE-ACTING		COOLER	
CYLINDER, DIFFERENTIAL ROD		TEMPERATURE CONTROLLER	
CYLINDER, DOUBLE- END ROD		INTENSIFIER	
CYLINDER, CUSHIONS BOTH ENDS		PRESSURE SWITCH	
MISCELLANEOUS UNITS		BASIC VALVE SYMBOLS	
DIRECTION OF ROTATION (ARROW IN FRONT OF SHAFT)		CHECK VALVE	
COMPONENT ENCLOSURE		MANUAL SHUT-OFF VALVE	
RESERVOIR, VENTED		BASIC VALVE ENVELOPE	
RESERVOIR, PRESSURIZED		VALVE, SINGLE-FLOW PATH, NORMALLY CLOSED	
PRESSURE GAGE		VALVE, SINGLE-FLOW PATH, NORMALLY OPEN	
		VALVE, MAXIMUM PRESSURE (RELIEF)	
		BASIC VALVE SYMBOL, MULTIPLE FLOW PATHS	
		FLOW PATHS BLOCKED IN CENTER POSITION	
		MULTIPLE FLOW PATHS (ARROW SHOWS FLOW DIRECTION)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VALVE EXAMPLES		METHODS OF OPERATION	
UNLOADING VALVE, INTERNAL DRAIN, REMOTELY OPERATED		PRESSURE COMPENSATOR	
DECELERATION VALVE, NORMALLY OPEN		DETENT	
SEQUENCE VALVE, DIRECTLY OPERATED, EXTERNALLY DRAINED		MANUAL	
PRESSURE-REDUCING VALVE		MECHANICAL	
COUNTERBALANCE VALVE WITH INTEGRAL CHECK		PEDAL OR TREADLE	
TEMPERATURE- AND PRESSURE-COMPENSATED FLOW CONTROL WITH INTEGRAL CHECK		PUSH BUTTON	
DIRECTIONAL VALVE, TWO-POSITION, THREE-CONNECTION		LEVER	
DIRECTIONAL VALVE, THREE-POSITION, FOUR-CONNECTION		PILOT PRESSURE	
PROPORTIONAL DIRECTIONAL CONTROL VALVE, INFINITE POSITIONING (INDICATED BY HORIZONTAL BARS)		SOLENOID	
		SOLENOID CONTROLLED, PILOT-PRESSURE-OPERATED	
		SPRING	
		SERVO	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

38

TABLE 1
CHEMICAL REQUIREMENTS

	Composition, %		
	Grade A	Grade B	Grade C
Carbon, max. ^a	0.25	0.30	0.35
Manganese	0.27-0.93	0.29-1.06	0.29-1.06
Phosphorus, max	0.035	0.035	0.035
Sulfur, max	0.035	0.035	0.035
Silicon, min	0.10	0.10	0.10
Chrome, max. ^b	0.40	0.40	0.40
Copper, max. ^c	0.40	0.40	0.40
Molybdenum, max. ^d	0.15	0.15	0.15
Nickel, max. ^e	0.40	0.40	0.40
Vanadium, max. ^f	0.08	0.08	0.08

^a For each reduction of 0.01% below the specified carbon maximum, an increase of 0.06% manganese above the specified maximum will be permitted up to a maximum of 1.35%.

^g Crude side elements combined shall not exceed 1%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PART A — FERROUS MATERIAL SPECIFICATIONS

SA-106

TABLE 2
TENSILE REQUIREMENTS

98

	Grade A (Explanatory Note 2)		Grade B		Grade C	
	Longitu- dinal	Transverse	Longitu- dinal	Transverse	Longitu- dinal	Transverse
Tensile strength, min, psi (MPa)	48 000 (330)		60 000 (415)		70 000 (485)	
Yield strength, min, psi (MPa)	30 000 (205)		35 000 (240)		40 000 (275)	
Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %:						
Basic minimum elongation transverse strip tests, and for all small sizes tested in full section	25	25	30	16.5	30	16.5
When standard round 2 in. or 50 mm gage length test specimen is used	28	20	22	12	20	12
For longitudinal strip tests	4.8		4.8		4.8	
For transverse strip tests, a deduction for each $\frac{1}{16}$ in. (0.8 mm) decrease in wall thickness above $\frac{1}{16}$ in. (2.2 mm) from the basic minimum elongation of the following percentage shall be made			1.25 ^c	1.00 ^c		1.00 ^c

^aThe minimum elongation in 2 in. (50.8 mm) shall be determined by the following equation:

$$e = 625,000 A^0.712$$

where:

e = minimum elongation in 2 in. (50.8 mm), %, rounded to the nearest 0.5%

A = cross-sectional area of the tension test specimen, in.², based on specified outside diameter or nominal specimen width and specified wall thickness rounded to the nearest 0.01 in.². If the area thus calculated is greater than 0.75 in.², shall be used, and

U = specified tensile strength, psi.

^b See Table 3 for minimum elongation values for various size tension specimens and grades.

^c The following table gives the computed minimum values.

Wall Thickness	Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %	
	Grade A, Transverse	Grades B and C, Transverse
$\frac{1}{16}$ (0.312)	7.6	15.50
$\frac{1}{8}$ (0.261)	7.1	15.50
$\frac{3}{32}$ (0.250)	6.4	15.50
$\frac{1}{4}$ (0.219)	5.6	
$\frac{5}{16}$ (0.188)	4.8	
$\frac{3}{8}$ (0.156)	4.0	
$\frac{1}{2}$ (0.125)	3.2	
$\frac{5}{8}$ (0.094)	2.4	
$\frac{3}{4}$ (0.062)	1.6	

Note — The above table gives the computed minimum elongation values for each $\frac{1}{16}$ in. (0.8 mm) decrease in wall thickness. Where the wall thickness lies between two values shown above, the minimum elongation value is determined by the following equation:

Grade	Direction of Test	Equation
A	Transverse	$E = 40t + 12.50$
B and C	Transverse	$E = 32t + 6.40$

where:

E = elongation in 2 in. or 50 mm, %, and

t = actual thickness of specimen, in.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 3
ELONGATION VALUES

Area, in. ² [Note (1)]	Tension Test Specimen Wall Thickness, in. [Note (2)]				Elongation in 2 in. min., Specified Tensile Strength, psi		
	½ in. Specimen	¾ in. Specimen	1 in. Specimen	1½ in. Specimen	Grade A	Grade B	Grade C
					48 000	60 000	70 000
≥0.75	≥1.491	≥0.994	≥0.746	≥0.497	36.0	29.5	25.5
0.74	1.470-1.490	0.988-0.993	0.735-0.745	0.490-0.496	36.0	29.5	25.5
0.73	1.451-1.469	0.967-0.979	0.726-0.734	0.484-0.489	36.0	29.5	25.5
0.72	1.430-1.450	0.954-0.966	0.715-0.725	0.477-0.483	36.0	29.5	25.5
0.71	1.411-1.429	0.941-0.953	0.706-0.714	0.471-0.476	35.5	29.0	25.5
0.70	1.390-1.410	0.927-0.940	0.695-0.705	0.464-0.470	35.5	29.0	25.5
0.69	1.371-1.389	0.914-0.926	0.686-0.694	0.457-0.463	35.5	29.0	25.5
0.68	1.350-1.370	0.900-0.913	0.676-0.685	0.450-0.456	35.5	29.0	25.0
0.67	1.331-1.349	0.887-0.899	0.666-0.674	0.444-0.449	35.5	29.0	25.0
0.66	1.310-1.330	0.874-0.886	0.655-0.665	0.437-0.443	35.0	29.0	25.0
0.65	1.291-1.309	0.861-0.873	0.646-0.654	0.431-0.436	35.0	28.5	25.0
0.64	1.270-1.290	0.847-0.860	0.635-0.645	0.424-0.430	35.0	28.5	25.0
0.63	1.251-1.269	0.834-0.844	0.625-0.634	0.417-0.423	35.0	28.5	25.0
0.62	1.230-1.250	0.820-0.833	0.615-0.625	0.410-0.416	35.0	28.5	25.0
0.61	1.211-1.229	0.807-0.819	0.606-0.614	0.404-0.409	34.5	28.5	24.5
0.60	1.190-1.210	0.794-0.806	0.595-0.605	0.397-0.403	34.5	28.5	24.5
0.59	1.171-1.189	0.781-0.793	0.586-0.594	0.391-0.396	34.5	28.0	24.5
0.58	1.150-1.170	0.767-0.780	0.575-0.585	0.384-0.390	34.5	28.0	24.5
0.57	1.131-1.149	0.754-0.766	0.566-0.573	0.377-0.383	34.0	28.0	24.5
0.56	1.110-1.130	0.740-0.753	0.555-0.565	0.370-0.376	34.0	28.0	24.5
0.55	1.091-1.109	0.727-0.739	0.546-0.554	0.364-0.369	34.0	28.0	24.9
0.54	1.070-1.090	0.714-0.726	0.535-0.545	0.357-0.363	34.0	27.5	24.0
0.53	1.051-1.069	0.701-0.713	0.526-0.534	0.351-0.356	33.5	27.5	24.0
0.52	1.030-1.050	0.687-0.700	0.515-0.525	0.344-0.350	33.5	27.5	24.0
0.51	1.011-1.029	0.674-0.686	0.506-0.514	0.337-0.343	33.5	27.5	24.0
0.50	0.990-1.010	0.660-0.673	0.495-0.505	0.330-0.336	33.5	27.0	23.5
0.49	0.971-0.989	0.647-0.659	0.486-0.494	0.324-0.329	33.0	27.0	23.5
0.48	0.950-0.970	0.634-0.646	0.475-0.485	0.317-0.323	33.0	27.0	23.5
0.47	0.931-0.949	0.621-0.633	0.466-0.474	0.311-0.316	33.0	27.0	23.5
0.46	0.910-0.930	0.607-0.620	0.455-0.465	0.304-0.310	33.0	27.0	23.5
0.45	0.891-0.909	0.594-0.606	0.446-0.454	0.297-0.303	32.5	26.5	23.0
0.44	0.870-0.890	0.580-0.593	0.435-0.445	0.290-0.296	32.5	26.5	23.0
0.43	0.851-0.869	0.567-0.579	0.426-0.434	0.284-0.289	32.5	26.5	23.0
0.42	0.830-0.850	0.554-0.566	0.415-0.425	0.277-0.283	32.0	26.5	23.0
0.41	0.811-0.829	0.541-0.553	0.406-0.414	0.271-0.276	32.0	26.0	23.0
0.40	0.790-0.810	0.527-0.540	0.395-0.405	0.264-0.270	32.0	26.0	22.5
0.39	0.771-0.789	0.514-0.526	0.386-0.394	0.257-0.263	31.5	26.0	22.5
0.38	0.750-0.770	0.500-0.513	0.375-0.385	0.250-0.256	31.5	26.0	22.5
0.37	0.731-0.749	0.487-0.499	0.366-0.374	0.244-0.249	31.5	25.5	22.5
0.36	0.710-0.730	0.474-0.486	0.355-0.365	0.237-0.243	31.0	25.5	22.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 3 (CONT'D)
ELONGATION VALUES

Area, in. ² (Note (1))	Tension Test Specimen Wall Thickness, in. (Note (2))				Elongation in 2 in. min., Specified Tensile Strength, psi		
	1/2 in. Specimen	3/4 in. Specimen	1 in. Specimen	1 1/2 in. Specimen	Grade A	Grade B	Grade C
					48 000	60 000	70 000
0.35	0.691-0.709	0.461-0.473	0.346-0.354	0.231-0.236	31.0	25.5	22.0
0.34	0.670-0.690	0.447-0.460	0.335-0.345	0.224-0.230	31.0	25.0	22.0
0.33	0.651-0.669	0.434-0.446	0.326-0.334	0.217-0.223	30.5	25.0	22.0
0.32	0.630-0.650	0.420-0.433	0.315-0.325	0.210-0.216	30.5	25.0	21.5
0.31	0.611-0.629	0.407-0.419	0.306-0.314	0.204-0.209	30.5	25.0	21.5
0.30	0.590-0.610	0.394-0.406	0.295-0.305	0.197-0.203	30.0	24.5	21.5
0.29	0.571-0.589	0.381-0.393	0.286-0.294	0.191-0.196	30.0	24.5	21.5
0.28	0.550-0.570	0.367-0.380	0.275-0.285	0.184-0.190	29.5	24.5	21.0
0.27	0.531-0.549	0.354-0.366	0.266-0.274	0.177-0.183	29.5	24.0	21.0
0.26	0.510-0.530	0.340-0.353	0.255-0.265	0.170-0.176	29.0	24.0	21.0
0.25	0.490-0.509	0.327-0.339	0.246-0.254	0.164-0.169	29.0	23.5	20.5
0.24	0.470-0.490	0.314-0.326	0.235-0.244	0.157-0.163	29.0	23.5	20.5
0.23	0.451-0.469	0.301-0.313	0.226-0.234	0.151-0.156	28.5	23.5	20.5
0.22	0.430-0.450	0.287-0.300	0.215-0.224	0.144-0.150	28.5	23.0	20.0
0.21	0.411-0.429	0.274-0.286	0.206-0.214	0.137-0.143	28.0	23.0	20.0
0.20	0.390-0.410	0.260-0.273	0.195-0.205	0.130-0.136	27.5	22.5	19.5
0.19	0.371-0.389	0.247-0.259	0.186-0.194	0.124-0.129	27.5	22.5	19.5
0.18	0.350-0.370	0.234-0.246	0.175-0.185	0.117-0.123	27.0	22.0	19.5
0.17	0.331-0.349	0.221-0.233	0.166-0.174	0.111-0.116	27.0	22.0	19.0
0.16	0.310-0.330	0.207-0.220	0.155-0.165	0.104-0.110	26.5	21.5	19.0
0.15	0.291-0.309	0.194-0.206	0.146-0.154	0.097-0.103	26.0	21.5	18.5
0.14	0.270-0.290	0.180-0.193	0.135-0.145	0.091-0.096	26.0	21.0	18.5
0.13	0.251-0.269	0.167-0.179	0.126-0.134	0.084-0.090	25.5	21.0	18.0
0.12	0.230-0.250	0.154-0.166	0.115-0.125	0.077-0.083	25.0	20.5	18.0
0.11	0.211-0.229	0.141-0.153	0.106-0.114	0.071-0.076	24.5	20.0	17.5
0.10	0.190-0.210	0.127-0.140	0.095-0.105	0.064-0.070	24.0	19.5	17.0
0.09	0.171-0.189	0.114-0.126	0.086-0.094	0.057-0.063	23.5	19.5	17.0
0.08	0.150-0.170	0.100-0.113	0.075-0.085	0.050-0.056	23.0	19.0	16.5
0.07	0.131-0.149	0.087-0.099	0.066-0.074	0.044-0.049	22.5	18.5	16.0
0.06	0.110-0.130	0.074-0.086	0.055-0.065	0.037-0.043	22.0	18.0	15.5
0.05	0.091-0.109	0.061-0.073	0.046-0.054	0.031-0.036	21.0	17.0	15.0
0.04	0.070-0.090	0.047-0.060	0.035-0.045	0.024-0.030	20.0	16.5	14.5
0.03	0.051-0.069	0.034-0.046	0.026-0.034	0.017-0.023	19.0	15.5	13.5
0.02	0.030-0.050	0.020-0.033	0.015-0.025	0.010-0.016	17.5	14.5	12.5
≤0.01	≤0.029	≤0.019	≤0.014	≤0.009	15.0	12.5	11.0

NOTES:
(1) 1 in.² = 645.16 mm².
(2) 1 in. = 25.4 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 4
VARIATIONS IN OUTSIDE DIAMETER

NPS Designator	Permissible Variations in Outside Diameter			
	Over		Under	
	in.	mm	in.	mm
½ to 1½, incl	¼ (0.015)	0.40	¼ (0.015)	0.40
Over 1½ to 4, incl	⅓ (0.031)	0.79	⅓ (0.031)	0.79
Over 4 to 8, incl	⅓ (0.052)	1.59	⅓ (0.031)	0.79
Over 8 to 18, incl	⅓ (0.093)	2.38	⅓ (0.031)	0.79
Over 18 to 26, incl	⅓ (0.125)	3.18	⅓ (0.031)	0.79
Over 26 to 34, incl	⅓ (0.156)	3.97	⅓ (0.031)	0.79
Over 34 to 48, incl	⅓ (0.187)	4.76	⅓ (0.031)	0.79

TABLE 5
MARKING

Hydro	NDE	Marking
Yes	No	Test Pressure
No	Yes	SDE
No	No	NH
Yes	Yes	Test Pressure/NDE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUPPLEMENTARY REQUIREMENTS

91

One or more of the following supplementary requirements shall apply only when specified in the purchase order. The purchaser may specify a different frequency of test or analysis than is provided in the supplementary requirement. Subject to agreement between the purchaser and manufacturer, retest and retreatment provisions of these supplementary requirements may also be modified.

S1. Product Analysis

S1.1 Product analysis shall be made on each length of pipe. Individual lengths failing to conform to the chemical composition requirements shall be rejected.

S2. Transverse Tension Test

S2.1 A transverse tension test shall be made on a specimen from one end or both ends of each pipe NPS 8 and over. If this supplementary requirement is specified, the number of tests per pipe shall also be specified. If a specimen from any length fails to meet the required tensile properties (tensile, yield, and elongation), that length shall be rejected subject to retreatment in accordance with Specification A 530/A 530M and satisfactory retest.

S3. Flattening Test

S3.1 The flattening test of Specification A 530/A 530M shall be made on a specimen from one end or both ends of each pipe. Crop ends may be used. If this supplementary requirement is specified, the number of tests per pipe shall also be specified. If a specimen from any length fails because of lack of ductility prior to satisfactory completion of the first step of the flattening test requirement, that pipe shall be rejected subject to retreatment in accordance with Specification A 530/A 530M and satisfactory retest. If a specimen from any length of pipe fails because of a lack of soundness, that length shall be rejected, unless subsequent retesting indicates that the remaining length is sound.

S4. Metal Structure and Etching Test

S4.1 The steel shall be homogeneous as shown by etching tests conducted in accordance with the appropriate sections of Method E 381. Etching tests shall be made on a cross section from one end or both ends of each pipe and shall show sound and reasonable uniform material free from injurious laminations, cracks,

and similar objectionable defects. If this supplementary requirement is specified, the number of tests per pipe required shall also be specified. If a specimen from any length shows objectionable defects, the length shall be rejected, subject to removal of the defective end and subsequent retests indicating the remainder of the length to be sound and reasonably uniform material.

S5. Carbon Equivalent

S5.1 The steel shall conform to a carbon equivalent (CE) of 0.50 maximum as determined by the following formula:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Mo}{5} + \frac{\%V}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \%Cu$$

S5.2 A lower CE maximum may be agreed upon between the purchaser and the producer.

S5.3 The CE shall be reported on the test report.

S6. Heat Treated Test Specimens

S6.1 At the request of the purchaser, one tensile test shall be performed by the manufacturer on a test specimen from each heat of steel furnished which has been either stress relieved at 1250°F or normalized at 1650°F, as specified by the purchaser. Other stress relief or annealing temperatures, as appropriate to the analysis, may be specified by agreement between the purchaser and the manufacturer. The results of this test shall meet the requirements of Table 2.

S7. Internal Cleanliness — Government Orders

S7.1 The internal surface of hot finished ferritic steel pipe and tube shall be manufactured to a free of scale condition equivalent to the visual standard listed in SSPC-SP6. Cleaning shall be performed in accordance with a written procedure that has been shown to be effective. This procedure shall be available for audit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

XI. CALCULATED H VALUES FOR SEAMLESS PIPE

XI.1 Table XI.1 and XI.2 lists values for H to be used for the test of Section 12.

TABLE XI.1
CALCULATED "H" VALUES FOR SEAMLESS PIPE

NPS Designator	Outside Diameter, in.	Wall Thickness, in.	Schedule Number	Distance, in inches, Between Plates "H" by Equation: $H = \frac{11 + 0.1t}{e + 1.0D}$		NPS Designator	Outside Diameter, in.	Wall Thickness, in.	Schedule Number	Distance, in inches, Between Plates "H" by Equation: $H = \frac{11 + 0.1t}{e + 1.0D}$				
				Grade A	Grades B & C					Grade A	Grades B & C			
				Inch-Pound Units						Inch-Pound Units				
2 1/2	2.875	0.203	40	2.456	2.565	14	14.000	0.250	10	2.759	3.045			
				0.274	3.694					3.724	0.112	70	3.294	3.617
				0.375	5.025					5.092	0.175	30	3.792	4.146
3	3.500	0.216	40	2.646	2.765	14	14.000	0.250	10	2.949	3.235			
				0.300	3.995					4.062	0.175	30	3.447	3.770
				0.475	5.406					5.473	0.250	20	3.945	4.268
3 1/2	4.000	0.228	40	2.736	2.855	14	14.000	0.250	10	3.039	3.325			
				0.312	4.166					4.233	0.175	30	3.537	3.860
				0.475	5.577					5.644	0.250	20	4.035	4.358
4	4.500	0.237	40	2.799	2.918	14	14.000	0.250	10	3.092	3.378			
				0.312	4.279					4.346	0.175	30	3.590	3.913
				0.475	5.690					5.757	0.250	20	4.088	4.411
5	5.500	0.256	40	2.862	2.981	14	14.000	0.250	10	3.145	3.431			
				0.330	4.440					4.507	0.175	30	3.643	3.966
				0.475	5.851					5.918	0.250	20	4.140	4.463
6	6.625	0.283	40	3.027	3.146	14	14.000	0.250	10	3.308	3.594			
				0.357	4.607					4.674	0.175	30	3.806	4.129
				0.500	6.018					6.085	0.250	20	4.304	4.627
8	8.625	0.315	40	3.252	3.371	14	14.000	0.250	10	3.531	3.817			
				0.389	4.932					4.999	0.175	30	4.029	4.352
				0.532	6.343					6.410	0.250	20	4.527	4.850
10	10.750	0.350	40	3.477	3.596	14	14.000	0.250	10	3.754	4.040			
				0.424	5.137					5.204	0.175	30	4.252	4.575
				0.567	6.548					6.615	0.250	20	4.750	5.073
12	12.750	0.385	40	3.702	3.821	14	14.000	0.250	10	3.977	4.263			
				0.459	5.263					5.330	0.175	30	4.475	4.798
				0.602	6.674					6.741	0.250	20	4.973	5.296

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X2. MINIMUM WALL THICKNESSES

X2.1 Table X2.1 lists minimum wall thicknesses for nominal pipe wall thickness.

**TABLE X2.1
MINIMUM WALL THICKNESSES ON INSPECTION FOR NOMINAL (AVERAGE) PIPE WALL THICKNESS**

Note 1 — The following equation, upon which this table is based, may be applied to calculate minimum wall thickness from nominal (average) wall thickness:

$$t_m \times 0.875 = t_n$$

where:

t_n = nominal (average) wall thickness, in. and

t_m = minimum wall thickness, in.

The wall thickness is expressed to three decimal places, the fourth decimal place being carried forward or dropped, in accordance with Practice E 29.

Note 2 — This table covers some wall thicknesses associated with standard pipe sizes but is not meant to imply that these are the only thicknesses obtainable under this specification.

Nominal (Average) Thickness (t_n)		Minimum Thickness on Inspection (t_m)		Nominal (Average) Thickness (t_n)		Minimum Thickness on Inspection (t_m)		Nominal (Average) Thickness (t_n)		Minimum Thickness on Inspection (t_m)	
in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
0.068	1.73	0.060	1.52	0.281	7.14	0.246	6.25	0.884	21.94	0.756	19.20
0.083	2.11	0.073	1.85	0.294	7.47	0.257	6.53	0.878	22.22	0.766	19.46
0.088	2.24	0.077	1.96	0.300	7.62	0.262	6.65	0.906	23.01	0.793	20.14
0.091	2.31	0.080	2.03	0.307	7.80	0.269	6.83	0.938	23.82	0.821	20.85
0.095	2.41	0.083	2.11	0.308	7.82	0.270	6.86	0.968	24.59	0.847	21.51
0.109	2.77	0.095	2.41	0.312	7.92	0.273	6.93	1.000	25.40	0.875	22.22
0.113	2.87	0.099	2.51	0.318	8.07	0.278	7.06	1.031	26.19	0.902	22.91
0.119	3.02	0.104	2.64	0.322	8.18	0.282	7.16	1.062	26.97	0.929	23.60
0.125	3.18	0.109	2.77	0.330	8.38	0.289	7.34	1.094	27.79	0.957	24.31
0.126	3.20	0.110	2.79	0.337	8.56	0.295	7.49	1.125	28.58	0.984	24.99
0.133	3.38	0.116	2.95	0.344	8.74	0.301	7.69	1.156	29.36	1.012	25.70
0.140	3.56	0.122	3.10	0.358	9.09	0.313	7.95	1.219	30.96	1.066	27.08
0.141	3.58	0.123	3.12	0.365	9.27	0.319	8.10	1.250	31.75	1.094	27.79
0.145	3.68	0.127	3.23	0.375	9.52	0.328	8.33	1.281	32.54	1.121	28.47
0.147	3.73	0.129	3.28	0.382	9.70	0.334	8.48	1.312	33.32	1.148	29.16
0.154	3.91	0.135	3.43	0.400	10.16	0.350	8.89	1.375	34.92	1.203	30.56
0.156	3.96	0.136	3.45	0.406	10.31	0.355	9.02	1.406	35.71	1.230	31.24
0.172	4.37	0.150	3.81	0.432	10.97	0.378	9.60	1.438	36.53	1.258	31.95
0.179	4.55	0.157	3.99	0.436	11.07	0.382	9.70	1.500	38.10	1.312	33.32
0.188	4.78	0.164	4.17	0.438	11.12	0.383	9.73	1.531	38.89	1.340	34.04
0.191	4.85	0.167	4.24	0.469	11.91	0.410	10.41	1.562	39.67	1.367	34.72
0.200	5.08	0.175	4.44	0.500	12.70	0.438	11.13	1.594	40.49	1.395	35.43
0.203	5.16	0.178	4.52	0.531	13.49	0.465	11.81	1.635	41.53	1.431	36.35
0.210	5.33	0.184	4.67	0.552	14.02	0.483	12.27	1.750	44.45	1.531	38.89
0.216	5.49	0.189	4.80	0.562	14.27	0.492	12.50	1.781	45.24	1.558	39.57
0.218	5.54	0.191	4.85	0.594	15.09	0.520	13.21	1.812	46.02	1.586	40.28
0.219	5.56	0.192	4.88	0.600	15.24	0.525	13.36	1.875	47.62	1.641	41.68
0.226	5.74	0.198	5.01	0.625	15.88	0.547	13.89	1.909	50.01	1.723	43.76
0.237	6.02	0.207	5.26	0.656	16.66	0.574	14.58	2.000	50.80	1.750	44.45
0.250	6.35	0.219	5.56	0.674	17.12	0.590	14.99	2.082	52.37	1.804	45.82
0.258	6.55	0.226	5.74	0.688	17.48	0.602	15.29	2.125	53.98	1.859	47.22
0.276	7.01	0.242	6.15	0.719	18.26	0.629	15.98	2.200	55.88	1.925	48.90
0.277	7.04	0.242	6.15	0.750	19.05	0.656	16.66	2.344	59.54	2.051	52.10
0.279	7.09	0.244	6.19	0.812	20.62	0.710	18.03	2.500	63.50	2.188	55.58
0.280	7.11	0.245	6.22	0.844	21.44	0.739	18.77				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] R.C.Hibbeler, " Mechanics of Materials " ,Phentice Hall
- [2] Anthony Esposito, "Fluid Power with Applications" ,Phentice Hall
- [3] Jacok J. Skrzypek Richard B.Hetmarski,"Plasticity and Creep",RCS
- [4] Timoshenko, S. and Young, D.H., " Element of strength of materials, Van Nostrand
- [5] Beer, Ferdinand P., Mechanics of Materials, McGraw-Hill, Tnc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้