

การออกแบบและสร้างเครื่องอัดแรงดันสูงสำหรับเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH PRESSURE COMPRESSOR FOR
SUPERCRITICAL CARBONDIOXIDE EXTRACTOR



ไกรวงศ์ โตทับเที่ยง
ธเนศ เอกอาณามกรกุล
สิริบุศย์ นิลวงศ์

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การออกแบบและสร้างเครื่องอัดแรงดันสูงสำหรับเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH PRESSURE COMPRESSOR FOR
SUPERCRITICAL CARBONDIOXIDE EXTRACTOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH PRESSURE COMPRESSOR FOR
SUPERCRITICAL CARBONDIOXIDE EXTRACTOR



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องอัดแรงดันสูงสำหรับเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH PRESSURE COMPRESSOR FOR SUPERCRITICAL
CARBONDIOXIDE EXTRACTOR

ผู้จัดทำ

1. นายไกรวงศ์ โตทับเที่ยง รหัสประจำตัว 57010123
2. นายธเนศ เอกอาณากรกุล รหัสประจำตัว 57010593
3. นายสิริบุศย์ นิลวงศ์ รหัสประจำตัว 57011371



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สยาม สงวนรัมย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างคอมเพรสเซอร์แรงดันสูงสำหรับเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย

นายไกรวงศ์	โตทับเที่ยง	57010123
นายธเนศ	เอกอาณาจักรกุล	57010593
นายสิริบุศย์	นิลวงศ์	57011371
อาจารย์สยาม	สงวนรัมย์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

โครงการนี้คือการออกแบบและสร้างเครื่องอัดแรงดันสูงสำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด ซึ่งเครื่องอัดแรงดันสูงประกอบไปด้วยมอเตอร์ขนาด 400 วัตต์, ตัวส่งกำลังที่มีอัตราทด 1:500 และกระบอกสูบขนาด 120 ลูกบาศก์เซนติเมตร วิชาที่ใช้ในการคำนวณและสร้างเครื่องจักรนี้ประกอบไปด้วย อุณหพลศาสตร์, กลศาสตร์วัสดุ และการออกแบบเครื่องจักรกล สุดท้าย เครื่องอัดแรงดันสูงนี้สามารถอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่ความดัน 150 บาร์

คำหลัก: เครื่องอัดแรงดันสูง, คาร์บอนไดออกไซด์สถานะวิกฤตยิ่งยวด, เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย

Design and construction of a high pressure compressor for supercritical carbon dioxide extractor

Kraiwong Tohtubtiang 57010123

Thaned Ekarnakonkul 57010593

Siribut Nilwong 57011371

Sayam Saganrum Advisor

Year 2017

ABSTRACT

This project is to design and construct a supercritical carbon dioxide compressor. The compressor consists of a 400 watt motor, a 1:500 transmission and 120 cubic centimeter cylinder. Thermodynamics, Mechanics of Materials and Machine Designs are applied to calculate and build the machine. Finally, the compressor can compress carbon dioxide up to 150 bar.

Keyword: Compressor, Supercritical carbon dioxide, Extractor

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์อาจารย์สยาม สงวนรัมย์ เป็นอย่างสูง ที่ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ซึ่งแนวทางในการทำปริญญาานิพนธ์รวมทั้งติดตามความก้าวหน้าของการจัดทำปริญญาานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่เสมอมา จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สอบปริญญาานิพนธ์ รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว, ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร และผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ และช่วยแก้ไขข้อบกพร่องเพื่อให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความสำเร็จ ตามวัตถุประสงค์

ขอขอบพระคุณอาจารย์เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์ นายจุลวิรัช มาพัก และนายเจตจำนง เกษประดิษฐ์ ที่ช่วยสนับสนุนในการทำปริญญาานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณนางวาสนา ม่วงโพธิ์ และนายหฤष्ณู สิริโกการ ในการอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ตลอดมา

น้อมรำลึกถึงครูบาอาจารย์ทุกท่าน ทั้งครูเจ้าของวิชา ครูผู้สืบทอดวิชา ครูผู้สอน ทั้งในโลก ตะวันออกและตะวันตก

สุดท้ายรำลึกถึงคุณแห่งบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่ให้กำลังใจในการเรียนตลอดสี่ปี

คุณค่าอันเป็นประโยชน์พึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอถวายเป็นพระราชกุศลแด่ พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช สมเด็จพระเจ้าอยู่หัวมหาวชิราลงกรณ ตลอดจนบูรพกษัตริย์แห่งราชวงศ์จักรีทุกพระองค์ ขออุทิศแด่ เจ้าพระยาสุรวงษ์ไวยวัฒน์ (วร บุนนาค) ศ.หลวงพรตพิทยพยัต ท่านเลี่ยม ตลอดจนทุกท่านที่สร้างประโยชน์ให้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนึ่งหากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำกราบขออภัย ณ ที่นี้ด้วย

นายไกรวงศ์

โตทับเที่ยง

นายธเนศ

เอกอณากรกุล

นายสิริบุศย์

นิลวงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญ (ต่อ).....	V
สารบัญ (ต่อ).....	VI
สารบัญ (ต่อ).....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่ศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.7 แผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีของไหลวิฤตยิ่งยวด.....	4
2.2 ทฤษฎีสำหรับการออกแบบเครื่องอัดแรงดันสูง.....	5
2.2.1 กระบวนการขยายตัวและการอัดตัวของก๊าซจริง.....	5
2.2.2 การหาปริมาตรและขนาดที่เหมาะสมของกระบอกสูบ.....	6
2.2.3 การหาความเค้นบนผนังของกระบอกสูบ.....	6
2.3 ตัวประกอบความปลอดภัย.....	8
2.4 ทฤษฎีการหาแรงที่เกิดจากความดันและการหาขนาดชิ้นส่วน.....	8
2.4.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือน.....	9
2.4.2 ทฤษฎีความเค้นดึง.....	9
2.4.3 ความเค้นดัด.....	10
2.5 ทฤษฎีการหาแรงบิด.....	10
2.6 ทฤษฎีการหาโมเมนต์ของแรงคู่ควบ.....	10

2.7	ทฤษฎีการหาความเร็วรอบในการอัดความดัน.....	11
2.8	ทฤษฎีการทดรอบในการอัดความดัน.....	11
2.9	การเลือกใช้ออร์ริง.....	11
2.9.1	การบอกขนาดของออร์ริง.....	12
2.9.2	การหามิติต่าง ๆ ของออร์ริง.....	12
2.10	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเลือกใช้ตัลบลูกปืน.....	13
2.11	การคำนวณขนาดของโบลต์.....	14
2.11.1	ทฤษฎีตัวยึดที่รับภาระก่อนในภาวะแรงดึง.....	14
2.11.2	ทฤษฎีตัวยึดที่รับภาระก่อนของโบลต์ในภาวะสถิต.....	15
2.11.3	ทฤษฎีการรับภาระในเกลียวของโบลต์.....	16
2.12	การเลือกขนาดโซ่.....	18
2.13	กฎการอนุรักษ์พลังงาน.....	19
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการ.....	21
3.1	การคำนวณเพื่อออกแบบกระบอกสูบของเครื่องอัดแรงดัน.....	21
3.1.1	กระบวนการขยายตัวและอัดตัวของก๊าซจริง.....	21
3.1.2	การคำนวณอัตราส่วนการอัดของกระบอกสูบ.....	21
3.1.3	การคำนวณขนาดให้เหมาะสมกับอัตราส่วนการอัดของกระบอกสูบ.....	22
3.2	การคำนวณความเค้นของกระบอกสูบและถังเก็บความดัน.....	22
3.2.1	การคำนวณความเค้นแบบผนังหนาในแนวต่างๆของกระบอกสูบ.....	22
3.2.2	การคำนวณหาค่าตัวประกอบความปลอดภัยของกระบอกสูบ.....	24
3.2.3	การคำนวณความเค้นแบบผนังหนาในแนวต่างๆของถังเก็บความดัน.....	25
3.2.4	การคำนวณหาค่าตัวประกอบความปลอดภัยของถังเก็บความดัน.....	27
3.3	การคำนวณอัตราทดรอบของตัวส่งกำลัง.....	27
3.3.1	การคำนวณหาแรงบิดสูงสุด.....	27
3.3.2	การคำนวณอัตราทดรอบ.....	28
3.4	การคำนวณค่าตัวประกอบความปลอดภัยของชิ้นส่วน.....	29
3.4.1	การคำนวณแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น.....	29
3.4.2	การคำนวณความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นเฉือนสูงสุด.....	29
3.4.3	การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน.....	30
3.4.4	ตัวประกอบความปลอดภัยที่แผ่นยึดกระบอกสูบ.....	30
3.4.5	ตัวประกอบความปลอดภัยที่ลูกสูบ.....	31
3.4.6	ตัวประกอบความปลอดภัยที่สลักลูกสูบ.....	32
3.4.7	ตัวประกอบความปลอดภัยที่ก้านสูบ.....	33
3.4.8	ตัวประกอบความปลอดภัยที่สลักยึดก้านสูบ.....	34

3.4.9	ตัวประกอบความปลอดภัยที่เพลาช้อเหวี่ยง.....	34
3.4.10	ตัวประกอบความปลอดภัยที่เสาและฐาน.....	35
3.5	การคำนวณโบลต์.....	36
3.6	ความแข็งแรงของเกลียวโบลต์และถึงเก็บความดัน.....	38
3.6.1	ตัวประกอบความปลอดภัยของซีเกลียวโบลต์ที่เสาและแผ่นยึดกระบอกสูบ.....	38
3.6.2	ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงดึงเกลียว ของถึงเก็บความดันและฝาเกลียว.....	39
3.6.3	ตัวประกอบความปลอดภัยต่อหนึ่งซีเกลียวของถึงเก็บความดันและฝาเกลียว.....	42
3.7	การคำนวณงานที่ใช้ในการอัดความดัน.....	42
3.8	สรุปการคำนวณชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่เลือกใช้.....	47
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง.....	48
4.1	ผลการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์.....	48
4.1.1	ที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส.....	48
4.1.2	ที่อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส.....	50
4.1.3	ที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส.....	51
4.1.4	ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส.....	53
4.2	ผลการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์.....	54
4.2.1	ที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส.....	54
4.2.2	ที่อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส.....	55
4.2.3	ที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส.....	57
4.2.4	ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส.....	58
4.3	ผลการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์.....	59
4.3.1	ที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส.....	59
4.3.2	ที่อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส.....	61
4.3.3	ที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส.....	62
4.3.4	ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส.....	63
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง วิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ.....	65
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	65
5.2	วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	65
5.3	ข้อเสนอแนะ.....	65

บรรณานุกรม.....	66
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	79
ภาคผนวก ง.....	80



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงความเค้นรูปแบบต่าง ๆ ที่กระทำต่อผิวทรงกระบอก.....	6
2.2 แสดงแรงเฉือนที่กระทำกับวัตถุ.....	9
2.3 แสดงแรงดิ่งกระทำกับวัตถุ.....	9
2.4 แผนภาพแสดงตัวแปรที่ใช้หาขนาดของโอรัง.....	13
2.5 แผนภาพแสดงโบลต์ที่ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน.....	14
2.6 แสดงขนาดต่าง ๆ ของเกลียว.....	16
2.7 แสดงตัวแปรและลักษณะของโซ่.....	18
2.8 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเอ็นทัลปีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	20
3.1 แสดงแรงที่กระทำกับแผ่นยึดกระบอกสูบ.....	31
3.2 แสดงแรงที่กระทำกับลูกสูบ.....	31
3.3 แสดงแรงที่กระทำกับสลักลูกสูบ.....	32
3.4 แสดงแรงที่กระทำกับก้านสูบ.....	33
3.5 แสดงแรงที่กระทำกับสลักยึดก้านสูบ.....	34
3.6 แสดงแรงที่กระทำกับเสาและฐาน.....	35
3.7 แสดงตำแหน่งของโบลต์ระหว่างเสาและแผ่นยึดกระบอกสูบ.....	36
3.8 แสดงลักษณะของถังเก็บความดันและฝาถังเก็บความดัน.....	39
4.1 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส.....	49
4.2 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส.....	51
4.3 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส.....	52
4.4 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส.....	54
4.5 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส.....	55
4.6 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส.....	56
4.7 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส.....	58
4.8 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส.....	59

4.9 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส.....	60
4.10 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส.....	62
4.11 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส.....	63
4.12 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดันที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส.....	64
ก.1 ภาพแสดงลักษณะของเครื่องอัดแรงดันสูง.....	68
ก.2 ภาพแสดงลักษณะของกระบอกสูบ.....	69
ก.3 ภาพแสดงลักษณะของลูกสูบ.....	70
ก.4 ภาพแสดงลักษณะของก้านสูบ.....	71
ก.5 ภาพแสดงลักษณะของเพลลาข้อเหวี่ยง.....	72
ก.6 ภาพแสดงการถอดประกอบของชิ้นส่วน (ก).....	73
ก.7 ภาพแสดงการถอดประกอบของชิ้นส่วน (ข).....	74
ก.8 ภาพแสดงการถอดประกอบของชิ้นส่วน (ค).....	74
ก.9 ภาพแสดงการถอดประกอบของชิ้นส่วน (ง).....	75
ค.1 แผนผังแสดงชุดอุปกรณ์ในการทดลอง.....	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการทำงานปี 2560 และ 2561.....	3
2.1 ตารางแสดงค่าคงที่วิกฤตของตัวทำละลายบางชนิดที่ใช้เป็นตัวทำละลายของการสกัดด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด.....	4
2.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ระหว่างของไหลวิกฤตยิ่งยวด ก๊าซและของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์.....	5
2.3 ตารางคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ทำโอรัง.....	12
2.4 คุณสมบัติของตั้บลูกปืนแต่ละชนิด.....	13
2.5 แสดงขนาดและความแข็งแรงของโซ่.....	18
3.1 ตารางสรุปการคำนวณและตัวประกอบความปลอดภัยของชิ้นส่วนต่างๆ.....	47
3.2 ตารางแสดงอุปกรณ์ที่เลือกใช้.....	47
4.1 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส.....	49
4.2 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส.....	50
4.3 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส.....	52
4.4 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส.....	53
4.5 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส.....	55
4.6 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส.....	56
4.7 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส.....	57
4.8 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส.....	59
4.9 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส.....	60

4.10 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 30 องศาเซลเซียส.....	61
4.11 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 40 องศาเซลเซียส.....	63
4.12 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 50 องศาเซลเซียส.....	64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่ศึกษา

การสกัดน้ำมันหอมระเหยโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะวิกฤตยิ่งยวด จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการอัดความดันสูงเพื่อให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะวิกฤตยิ่งยวด โดยโครงการที่ผ่านมาได้มีการสร้างเครื่องอัดความดันสูงแล้ว แต่ทางกลุ่มเห็นถึงข้อเสียของเครื่องอัดความดันสูงแบบเดิม ทางกลุ่มจึงจัดทำโครงการนี้ขึ้นเพื่อพัฒนาส่วนของเครื่องอัดความดันสูงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

ย้อนกลับไปตั้งแต่โครงการแรกจนถึงปัจจุบันมีการสร้างเครื่องอัดแรงดันสูงมาแล้ว 2 ครั้ง ซึ่งครั้งนี้เป็นครั้งที่ 3 เครื่องอัดแรงดันสูงในรุ่นแรกสุดนั้นเป็นการอัดแรงดันโดยใช้การทดแรงด้วยสกรู [1] ซึ่งจากการที่ได้ศึกษาพบว่า การอัดแบบสกรูนั้นเมื่ออัดที่แรงดันสูงสกรูจะเกิดการรูด และจากการหมุนของสกรูเป็นเหตุให้ก้านสูบหมุนตาม ทำให้เกิดความเสียหายที่กระบอกสูบและลูกสูบ ส่งผลให้เกิดการรั่วของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แถมยังสิ้นเปลืองกำลังคนในการอัดแรงดันเนื่องมาจากแรงดันที่สูงมากขึ้นถึง 150 บาร์ และเวลาในการอัดแรงดันที่นานถึง 180 นาที ทำให้ต้องใช้แรงในการอัดที่มาก ต่อมาได้มีการพัฒนาและสร้างเครื่องอัดแรงดันสูงขึ้นเป็นครั้งที่ 2 ซึ่งเครื่องอัดแรงดันสูงรุ่นที่ 2 นี้เป็นการอัดแรงดันโดยใช้การทดแรงด้วยคั่นโยกไฮดรอลิก [2] ซึ่งจากการศึกษาเครื่องอัดแรงดันสูงนี้ถือเป็นเครื่องอัดแรงดันที่ค่อนข้างสมบูรณ์ในระดับหนึ่ง แต่เนื่องจากความดันที่สูงถึง 150 บาร์ เราพบว่ายังคงเกิดปัญหาการสิ้นเปลืองกำลังคนและเวลาที่นาน ถึงแม้ว่าจะสามารถลดระยะเวลาลงเหลือเพียง 45 นาทีแล้วก็ตาม ทางกลุ่มจึงจัดทำโครงการนี้ขึ้นเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอัดแรงดันสูงเพื่อลดระยะเวลาในการอัดความดัน โดยใช้มอเตอร์และลูกสูบแทนการอัดด้วยมือแบบในเครื่องอัดแรงดันสูงรุ่นที่ผ่านมา

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอัดแรงดันสูงที่สามารถนำไปอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีความดันสูงถึง 150 บาร์ ที่อุณหภูมิ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

1.2.2 เพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

1.2.3 เพื่อปรับปรุงระบบการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตให้สะดวก

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 การไหลในเครื่องอัดแรงดันสูงเป็นการไหลแบบคงตัว (Steady-flow process)
- 1.3.2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประพฤติตัวแบบก๊าซจริง
- 1.3.3 ระบบเป็นกระบวนการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform-flow)
- 1.3.4 ระบบเป็นกระบวนการขยายตัวและอัดตัวของก๊าซจริง (Polytropic process)

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอัดแรงดันสูงที่นำไปอัดความดันโดยจะอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำไปใช้ในการสกัดน้ำมันหอมระเหยโดยค่าความดันเริ่มต้นในการออกแบบจะอยู่ที่ 20 บาร์ และค่าความดันที่มากที่สุดในการออกแบบอยู่ที่ 150 บาร์

1.4.2 การออกแบบเครื่องอัดแรงดันสูงให้สามารถอัดให้ความดันสูงสุดที่ 150 บาร์

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะของไหลเหนือจุดวิกฤต (Supercritical fluid)

1.5.2 ศึกษาเครื่องอัดแรงดันชนิดต่าง ๆ เพื่อเลือกแบบเครื่องอัดแรงดันที่เหมาะสมกับการอัดแรงดันสูงสุดที่ 150 บาร์

1.5.3 ศึกษาทฤษฎีการอัดตัวและขยายตัวของก๊าซจริงในการคำนวณเพื่อใช้ในอัตราส่วนการอัด

1.5.4 ศึกษาทฤษฎีอัตราส่วนการอัดของกระบอกสูบ เพื่อหาปริมาตรที่เหมาะสม

1.5.5 ศึกษาทฤษฎีผนังความดันในการคำนวณเพื่อใช้เลือกวัสดุที่เหมาะสมในการออกแบบ

1.5.6 ศึกษาทฤษฎีที่ใช้ในการหาตัวประกอบความปลอดภัย เพื่อหาขนาดของวัสดุ

1.5.7 ศึกษาทฤษฎีการหาแรงบิดและการหาโมเมนต์ของแรงคู่ควบของลูกสูบในเครื่องอัดแรงดันที่ใช้ในการอัดความดัน

1.5.8 ศึกษาการทรอบของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับรอบการอัดของเครื่องอัดแรงดันใช้ทฤษฎีการทรอบของเฟือง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถนำไปอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 150 บาร์เพื่อนำไปสกัดน้ำมันหอมระเหย
- 1.6.2 ช่วยลดระยะเวลาในการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1.7 แผนการดำเนินงาน

ตารางงานที่	ปี 2560				ปี 2561					
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.
1. ศึกษาข้อมูลงานวิจัยในอดีต										
2. ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
3. ออกแบบงานวิจัย										
4. คำนวณงานวิจัย										
5. ตรวจสอบความถูกต้องที่ออกแบบ										
6. สร้างชิ้นงานวิจัย										
7. ทดลองและบันทึกผลการทดลอง										
8. จัดทำข้อมูลและสรุปผลการทดลอง										

ตารางที่ 1.1 แผนการทำงานปี 2560 และ 2561



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของไหลวิกฤตยิ่งยวด

ของไหลวิกฤตยิ่งยวดที่นิยมใช้คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะที่จุดวิกฤตมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งในตารางยังระบุถึงค่าความดันและความหนาแน่นที่จุดวิกฤตด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสถานะวิกฤตยิ่งยวดเป็นตัวทำละลายที่ดี เยื่อต่อบุญกิริยาเคมีและไม่เกิดการตกค้างในตัวถูกละลาย

สารประกอบ	อุณหภูมิวิกฤต		ความดันวิกฤต		ความหนาแน่นวิกฤต
	K	°C	MPa	bar (atm)	(kg/m ³)
เอทิลีน	283	9.9	5.12	51.2 (50.2)	230
คาร์บอนไดออกไซด์	304.1	31	7.39	73.9 (72.9)	470
ไนตรัสออกไซด์	309.6	36.5	7.26	72.6 (71.7)	460
โพรเพน	369.8	96.7	4.26	42.6 (42.0)	220
ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์	318.8	45.7	3.76	37.6 (37.1)	750
เมทานอล	513.4	240.3	7.99	79.9 (78.9)	270
น้ำ	627	363.9	22.1	221 (218.1)	320
แอมโมเนีย	405.4	132.3	11.3	113 (111.5)	240
เอ็น-เพนเทน	469.8	196.7	3.37	33.7 (33.3)	230

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าคงที่วิกฤตของตัวทำละลายบางชนิดที่ใช้เป็นตัวทำละลายของการสกัดสารด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด [4,5]

ของไหลวิกฤตยิ่งยวด หากนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย อนุภาคของแข็งที่เป็นตัวถูกละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลเหนือจุดวิกฤตและเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคกับอนุภาคทำให้เอนทัลปีลดลงและเกิดการละลายได้ดี นอกจากนี้ของไหลวิกฤตยิ่งยวดมีความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายที่ใกล้เคียงกับก๊าซ ทำให้สามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างของของแข็งได้ดี ดังแสดงในตารางที่ 2.2

วิฤภาคของคาร์บอนไดออกไซด์	คาร์บอนไดออกไซด์		สารแนฟธาซีนในคาร์บอนไดออกไซด์
	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความหนืด (μPa·s)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (m ² /s)
ก๊าซ 313 K, 1 bar	2	16	5.1×10^{-6}
วิกฤตยิ่งยวด 313 K, 100 bar	632	17	1.4×10^{-8}
ของเหลว 300 K, 500 bar	1029	133	8.7×10^{-9}

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ระหว่างของไหลวิกฤตยิ่งยวด ก๊าซ และของเหลวของคาร์บอนไดออกไซด์ [4,5]

จากตารางที่ 2.2 ของไหลวิกฤตยิ่งยวดจึงเป็นสถานะที่เหมาะสมต่อการสกัดน้ำมันหอมระเหยมากกว่าของเหลว เพราะมีอัตราการถ่ายเทมวลเร็วกว่าและมีความสามารถในการทำละลายดีกว่า โดยจากการศึกษาและเปรียบเทียบการสกัดระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหลวและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดมีอัตราการสกัดสูงกว่าประมาณ 2.5 เท่า

2.2 ทฤษฎีสำหรับการออกแบบเครื่องอัดแรงดันสูง

2.2.1 กระบวนการขยายตัวและการอัดตัวของก๊าซจริง

ในกระบวนการขยายตัวและอัดตัวของก๊าซจริง (Polytropic process) เป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตร

$$P_2 = P_1 (r_c)^k \quad (1)$$

$$T_2 = T_1 (r_c)^{k-1} \quad (2)$$

- เมื่อ r_c คือ อัตราส่วนการอัด
 P คือ ความดัน (Pa)
 T คือ อุณหภูมิ (K)
 k คือ ค่าคงที่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (มีค่าเป็น 1.29)

2.2.2 การหาปริมาตรและขนาดที่เหมาะสมของกระบอกสูบ

อัตราส่วนการอัดของกระบอกสูบ

$$r_c = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}} = \frac{V_c + V_d}{V_c} \quad (3)$$

เมื่อ	r_c	คือ อัตราส่วนการอัด
	V_{BDC}	คือ ปริมาตรที่ศูนย์ตายล่าง (m^3)
	V_{TDC}	คือ ปริมาตรที่ศูนย์ตายบน (m^3)
	V_d	คือ ปริมาตรการกระจัด (m^3)
	V_c	คือ ปริมาตรช่องว่าง (m^3)

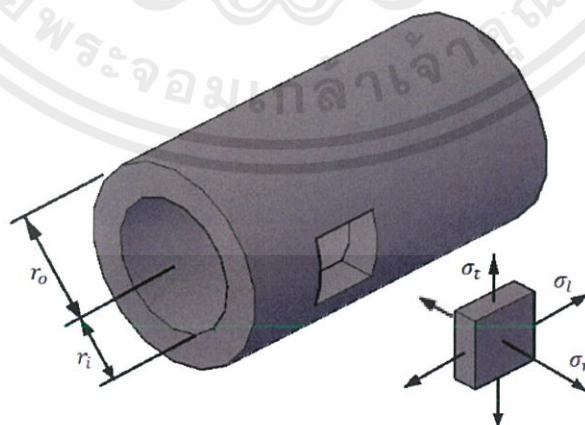
การคำนวณหารัศมีและความยาวของกระบอกสูบหาได้จาก

$$V = \pi r^2 h \quad (4)$$

เมื่อ	V	คือ ปริมาตรของทรงกระบอก (m^3)
	h	คือ ความสูงของทรงกระบอก (m)
	r	คือ รัศมีภายในของทรงกระบอก (m)

2.2.3 การหาความเค้นบนผนังของกระบอกสูบ

การคำนวณหาความหนาของกระบอกสูบต้องคำนึงถึงความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผนังของกระบอกสูบดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยอ้างอิงจากทฤษฎีความเค้นบนผนังของกระบอกสูบ (Thick wall theory)



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงความเค้นรูปแบบต่าง ๆ ที่กระทำต่อผิวทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ใช้ในการคำนวณความเค้นรูปแบบต่างๆ ที่กระทำต่อผิวทรงกระบอก

ก) ความเค้นแนวสัมผัส (Tangential stress)

$$\sigma_t = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (5)$$

ข) ความเค้นแนวรัศมี (Radial stress)

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (6)$$

ค) ความเค้นแนวยาว (Longitudinal stress)

$$\sigma_l = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (7)$$

ง) ความเค้นรวมสูงสุดที่เกิดขึ้น

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

จ) ความเค้นเฉือนในระนาบต่างๆ

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \quad (9)$$

$$\tau_{yz} = \frac{\sigma_y - \sigma_z}{2} \quad (10)$$

$$\tau_{zx} = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \quad (11)$$

เมื่อ σ_t คือ ความเค้นแนวสัมผัส (Pa)
 σ_r คือ ความเค้นแนวรัศมี (Pa)
 σ_l คือ ความเค้นแนวยาว (Pa)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

σ'	คือ ความเค้นรวมสูงสุดที่เกิดขึ้น (Pa)
τ_{xy}	คือ ความเค้นเฉือนในระนาบ xy (Pa)
τ_{yz}	คือ ความเค้นเฉือนในระนาบ yz (Pa)
τ_{zx}	คือ ความเค้นเฉือนในระนาบ zx (Pa)
P_i	คือ ความดันภายใน (Pa)
P_o	คือ ความดันภายนอก (Pa)
r_i	คือ รัศมีภายใน (m)
r_o	คือ รัศมีภายนอก (m)

โดยกำหนดให้ $r_i \leq r \leq r_o$ ใช้ $r = r_i$ เนื่องจากพิจารณาความดันที่ผิวด้านในของทรงกระบอกเป็นหลัก

2.3 ตัวประกอบความปลอดภัย

ค่าความเค้นสูงสุดและความเค้นเฉือนสูงสุดต้องไม่เกินค่าคุณสมบัติของวัสดุที่เลือกใช้ (σ_{yield} , τ_{yield}) โดยตัวประกอบความปลอดภัยต้องมากกว่า 1 ตรวจสอบการหาตัวประกอบความปลอดภัย (Safety factor, S.F.) จากสมการ

$$S.F. = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{max}} = \frac{\tau_{yield}}{\tau_{max}} \quad (12)$$

เมื่อ	σ_{max}	คือ ความเค้นสูงสุดในการใช้งาน
	τ_{max}	คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดในการใช้งาน

2.4 ทฤษฎีการหาแรงที่เกิดจากความดันและการหาขนาดชิ้นส่วน

แรงสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อความดันมีค่าสูงที่สุดและสามารถหาได้จากสมการ

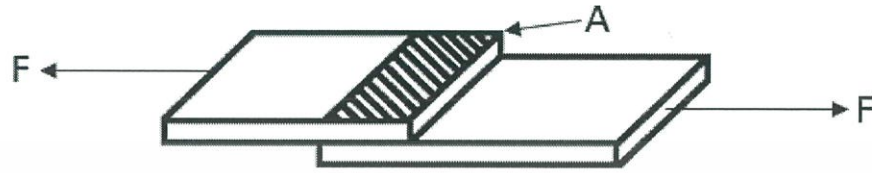
$$P = \frac{F}{A} \quad (13)$$

เมื่อ	P	คือ ความดัน (Pa)
	F	คือ แรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ (N)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแรง (m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือน

แรงที่ทำให้เกิดความเค้นเฉือนภายในพื้นที่หน้าตัดนั้น ๆ แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงแรงเฉือนที่กระทำกับวัตถุ

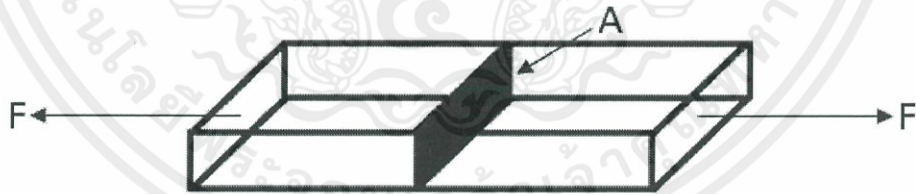
จากสมการความเค้นเฉือน

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (14)$$

เมื่อ τ คือ ความเค้นเฉือน (Pa)
 F คือ แรงที่กระทำในแนวขนานกับพื้นที่ (N)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ขนานกับแรง (m^2)

2.4.2 ทฤษฎีความเค้นดึง

แรงที่ทำให้เกิดความเค้นดึงภายในพื้นที่หน้าตัดนั้น ๆ แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงแรงดึงที่กระทำกับวัตถุ

จากสมการความเค้นดึง

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (15)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นดึง (Pa)
 F คือ แรงดึงที่กระทำกับวัตถุ (N)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (m^2)

2.4.3 ทฤษฎีความเค้นดัด

ความเค้นดัด (Bending stress) เกิดขึ้นที่หน้าตัดของคานาที่ตั้งฉากกับแกนตามความยาวของคานานั้น ความเค้นดัดสามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_b = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (16)$$

เมื่อ	σ_b	คือ ความเค้นดัด (Pa)
	F	คือ แรงที่กระทำ (N)
	L	คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (m)
	b	คือ ความกว้าง (m)
	h	คือ ความหนา (m)

2.5 ทฤษฎีการหาแรงบิด

การอัดความดันโดยเครื่องอัดแบบลูกสูบทำให้เกิดแรงบิด (Torque) ขึ้นที่บริเวณข้อเหวี่ยงของลูกสูบ ซึ่งค่าแรงบิด (Torque) ที่มากที่สุดสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการทอของมอเตอร์ที่เหมาะสมได้ การหาแรงบิด (Torque) เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$T = Fr \cos \theta \quad (17)$$

เมื่อ	T	คือ แรงบิด ($N \cdot m$)
	F	คือ แรงที่กระทำ (N)
	r	คือ รัศมีของจานหมุน (m)

2.6 ทฤษฎีการหาโมเมนต์ของแรงคู่ควบ

โมเมนต์ของแรงคู่ควบที่เกิดขึ้นบริเวณข้อเหวี่ยงสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$M = Fs \cos \theta \quad (18)$$

เมื่อ	M	คือ โมเมนต์ของแรงคู่ควบ ($N \cdot m$)
	F	คือ แรงที่กระทำ (N)
	s	คือ ความยาวของข้อเหวี่ยง (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ทฤษฎีการหาความเร็วรอบในการอัดความดัน

การหาความเร็วรอบที่ใช้ในการอัดความดัน สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของมอเตอร์และแรงบิดที่เกิดขึ้น ดังสมการ

$$P = T\omega \quad (19)$$

$$\omega = 2\pi N \quad (20)$$

เมื่อ	P	คือ กำลังของมอเตอร์ (<i>Watt</i>)
	T	คือ แรงบิด ($N \cdot m$)
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม (rad / s)
	N	คือ ความเร็วรอบในการอัด (Hz)

2.8 ทฤษฎีการทดรอบในการอัดความดัน

โดยการทดรอบใช้สายพานในการส่งกำลังระหว่างเพลากับเพลา โดยอาศัยหลักการทดรอบมาใช้ในการทดสอบเพื่อเพิ่มและลดความเร็วของเฟืองตัวที่ใช้ขับได้ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณคือดังนี้

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (21)$$

เมื่อ	N	คือ ความเร็วรอบของเฟือง (Hz)
	n	คือ จำนวนฟันของเฟือง

2.9 การเลือกใช้โอริง

โอริง เป็นชิ้นส่วนที่อยู่ระหว่างอุปกรณ์ 2 ชิ้นที่เคลื่อนที่ การใช้งานลักษณะนี้ถ้าใช้ความดันสูงก็จะสามารถกันรั่วได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขนาดความแข็งของยางซิลิโคน (Shore A) ที่เหมาะสมต่อการใช้งานที่ความดันสูงคือ 80 และ 90 โดยที่ในการทำงานของโอริงนั้นมีส่วนที่สัมพันธ์กับส่วนที่เคลื่อนที่ ในการใช้งานโอริงนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ แรงดันและอุณหภูมิของจุดที่ใช้งานเพื่อที่จะเลือกค่าความแข็งและวัสดุที่ใช้ทำโอริงได้ถูกต้อง ดังตารางที่ 2.3

ยาง	เกรดทางการค้า	ความแข็ง (Shore A)	อุณหภูมิที่ใช้งาน (เซลเซียส)	การประยุกต์ใช้งาน
ยางไนไตรล์ (บูนาเอ็น)	N7	70	-40 ถึง 110	ทนต่อน้ำ น้ำมันไฮดรอลิก และ แอลกอฮอล์ได้ดี เกรด V9 เหมาะกับงานที่ความดันสูง
	N9	90		
ยางฟลูออโรคาร์บอน (ไวทั้น)	V7	70	-35 ถึง 205	ทนต่อสารเคมีได้ดีกว่าอีลาสโตเมอร์อื่นๆ เกรด V9 เหมาะกับงานที่ความดันสูง
	V9	90		
ยางคลอโรพรีน (นีโอพรีน)	C7	70	-55 ถึง 140	ทนต่อน้ำมันไฮดรอลิก ทนต่อสารทำความเย็น และกรดอ่อนได้ดี
ยางเอทิลีนโพรพิลีน	E7	70	-55 ถึง 150	ทนต่อน้ำ กรด เบส และคีโตนได้ดี แต่ทนต่อน้ำมันไฮดรอลิกได้ต่ำ
ยางโพลียูรีเทน	S7	30-90	-60 ถึง 130	การใช้งานจำกัดเฉพาะภาวะพลศาสตร์ เหมาะกับงานความดันสูงและมีแก๊สเป็นของไหล

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ทำโอริง [6,8]

2.9.1 การบอกขนาดของโอริง

การบอกขนาดของโอริงอ้างอิงจากมาตรฐานญี่ปุ่น (JIS2401) โดยการบอกขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) และความหนา (H) หรือถูกเรียกว่า โอริงขนาด $d \times H$ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

2.9.2 การหามิติต่างๆของโอริง

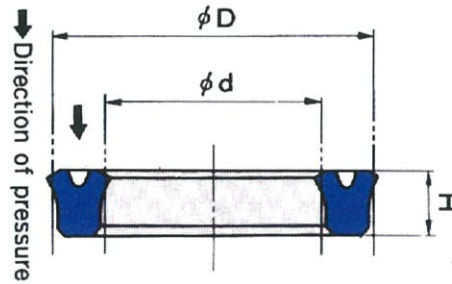
โดยเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโอริงหาได้จาก

$$d = D - 2H \quad (22)$$

ความหนาของโอริง หาได้จาก

$$H = \frac{(D - d)}{2} \quad (23)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (m)



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงตัวแปรที่ใช้หาขนาดของโอริง [2,3]

2.10 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเลือกใช้ตลับลูกปืน

ตลับลูกปืน (Bearing) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับการหมุนของเพลลา โดยตลับลูกปืนมีหน้าที่ส่งผ่านแรงที่เกิดขึ้นจากเพลลาไปสู่ชิ้นส่วนอื่นของเครื่องจักร และลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทำให้ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องจักรกลและยังลดการสึกหรอที่เกิดจากการใช้งาน ตลับลูกปืนนั้นมีหลายชนิดและหลายขนาดดังตารางที่ 2.4 การเลือกตลับลูกปืนให้เหมาะสมกับประเภทของงานนั้นเป็นเรื่องสำคัญ

โดยมีขั้นตอนสำคัญในการเลือกดังนี้

- พื้นที่ติดตั้ง
- ขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำ
- ความแข็งแรงของตลับลูกปืนและความสามารถในการรับแรง

ชนิดตลับลูกปืน	ความสามารถในการรับแรงรัศมี				ความสามารถในการรับแรงตามแนวแกน			
	1	2	3	4	1	2	3	4
ตลับลูกปืนเม็ดกลม ร่องลึกแถวเดียว	██████████				██████████			
ตลับลูกปืนเม็ดกลม สัมผัสเชิงมุมแถวเดียว	██████████				██████████			
ตลับลูกปืนเม็ด ทรงกระบอก	██████████				██████████			
เทเปอร์ตลับลูกปืน	██████████				██████████			
ตลับลูกปืนเม็ด หมอนโค้ง	██████████				██████████			

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของตลับลูกปืนแต่ละชนิด [1,5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 การคำนวณขนาดของโบลต์

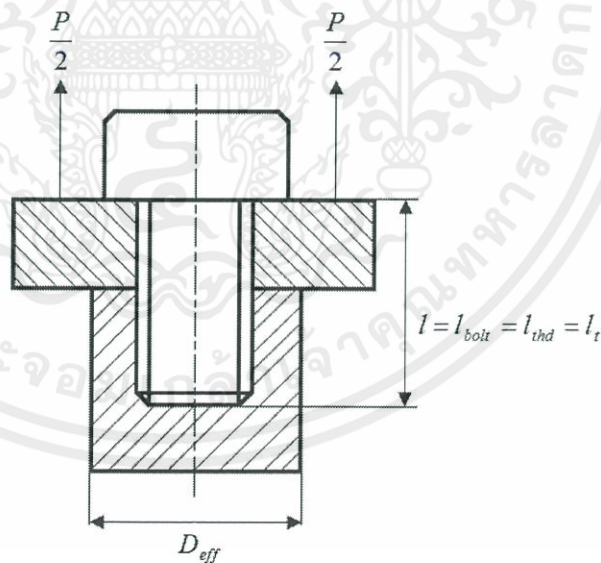
ชิ้นส่วนและโครงสร้างของเครื่องอัดแรงดันสูงนั้นจำเป็นต้องยึดให้อยู่กับที่และสามารถรองรับแรงเนื่องจากความดันได้ ซึ่งโบลต์สามารถยึดชิ้นส่วน รองรับแรง และเหมาะกับการถอดประกอบ โดยขนาดของโบลต์สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีตัวยึดที่รับภาระก่อนในภาระแรงดึงและทฤษฎีตัวยึดที่รับภาระก่อนในภาระสถิต เกลียของโบลต์แบ่งเป็น 2 แบบคือ เกลียวยหยาบ และ เกลียละเอียด ซึ่งการเลือกใช้งานต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่แตกต่างกันโดย

เกลียวยหยาบ: มีจำนวนฟันของเกลียวน้อยกว่าที่ความยาวโบลต์เท่ากัน ขนาดฟันเกลียวยใหญ่กว่า ความแข็งแรงของเกลียวยมากกว่า

เกลียวยละเอียด: มีจำนวนฟันของเกลียวยมากกว่าที่ความยาวโบลต์เท่ากัน ขนาดฟันเกลียวยเล็กกว่า ความแข็งแรงของเกลียวยน้อยกว่า

2.11.1 ทฤษฎีตัวยึดที่รับภาระก่อนในภาระแรงดึง

โบลต์ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน เมื่อมีแรงดึงเนื่องจากความดันของเครื่องอัดแรงดันสูงมากกระทำขนาด P นั่นคือชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะถูกแรงดึงขนาด $P/2$ มากกระทำ



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงโบลต์ที่ถูกใช้ในการยึดชิ้นส่วน 2 ชิ้นให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน เมื่อมีแรงดึงเนื่องมาจากการขันโบลต์และแรงเนื่องจากความดันภายในมากกระทำ

การวิเคราะห์เพื่อหาแรงที่กระทำต่อโบลต์ที่เกิดจากความดันภายในถังดังแสดงในรูปที่ 2.5 มีการวิเคราะห์หาความยาวเกลียวในแผ่นเหล็ก ความยาวของโบลต์ และความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Stiffness of material)

ความต้านทานการเสีรูปของโบลต์ หาได้จาก

$$K_b = \left(\frac{A_t A_b}{A_b l_t + A_t l_s} \right) \cdot E_b \quad (24)$$

- เมื่อ K_b คือ ค่าความยืดหยุ่นของโบลต์ (N/m)
 A_t คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับความเค้นดึงของโบลต์ (m^2)
 A_b คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (m^2)
 l_t คือ ความยาวของส่วนที่เป็นเกลียวที่รับแรงตามแนวแกน (m)
 l_s คือ ความยาวของส่วนที่ไม่เป็นเกลียว (m)
 E_b คือ ค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่นของโบลต์เหล็ก (Pa)

ความต้านทานการเสีรูปของวัสดุ (K_m) ในกรณีชิ้นงานประกอบเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน หาได้จาก

$$K_m = \frac{\pi D_{eff}^2 E_m}{4l} \quad (25)$$

- เมื่อ l คือ ความหนาทั้งหมดของวัสดุที่โบลต์ยึด (m)
 D_{eff} คือ พื้นที่ประสิทธิภาพของวัสดุที่ถูกเชื่อมต่อกัน (m)
 E_m คือ ค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่นของเหล็ก (Pa)

2.11.2 ทฤษฎีตัวยึดที่รับภาระก่อนของโบลต์ในภาระสถิต

กำหนดให้ P เป็นแรงภายนอกที่มากระทำที่ข้อต่อ, P_b เป็นแรงที่กระทำต่อโบลต์ และ P_m เป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน ได้สมการสมดุลของแรง ดังนี้

$$P = P_m + P_b \quad (26)$$

แรงที่กระทำต่อโบลต์ (P_b) หาได้จาก

$$P_b = C \cdot P \quad (27)$$

- เมื่อ P คือ แรงภายนอกที่มากระทำที่ข้อต่อ (N)
 C คือ ค่าคงที่ข้อต่อ (Joint constant) โดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่า 1 หาได้จาก

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m} \tag{28}$$

แรงดึงที่กระทำกับโบลต์ (F_b) หาได้จาก

$$F_b = F_i + P_b \tag{29}$$

โดยที่ F_i คือ ภาระรับก่อน หาได้จาก

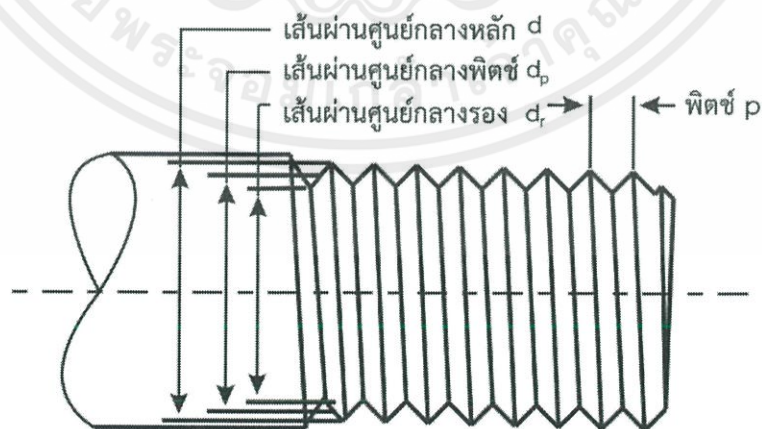
$$F_i = 0.9\sigma_p A_t ; \text{สำหรับแรงสถิต} \tag{30}$$

ความเค้นดึงสูงสุดที่กระทำต่อโบลต์ (σ_{bolt}) หาได้จาก

$$\sigma_{bolt} = \frac{F_b}{A_t} \tag{31}$$

- เมื่อ F_b คือ แรงเริ่มต้นที่มากที่สุดในการขันโบลต์ (N)
 σ_p คือ ความทนพิสูจน์ (Pa)
 A_t คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับความเค้นดึงของโบลต์ (m^2)
 σ_{yield} คือ ความแรงครากของโบลต์ (Pa)

2.11.3 ทฤษฎีการรับภาระในเกลียวของโบลต์



รูปที่ 2.6 แสดงขนาดต่าง ๆ ของเกลียว [4]

จากรูปที่ 2.6 เส้นผ่านศูนย์กลางหลักคือความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางโดนอกของชิ้นงานทั้งของเกลียวนอกและเกลียวในหรือคือขนาดกำหนดนั่นเอง เส้นผ่านศูนย์กลางรองคือความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางวัดที่โคนเกลียวทั้งของเกลียวนอกและเกลียวใน เส้นผ่านศูนย์กลางของพิตช์คือความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางวัดที่วงกลมพิตช์ ระยะพิตช์คือระยะห่างระหว่างตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งเดียวกันของเกลียวถัดไป ขนาดของชิ้นส่วนเกลียวจะถูกระบุด้วยการกำหนดระยะพิตช์

เส้นผ่านศูนย์กลางรอง หาได้จาก

$$d_r = d - 1.23p \quad (32)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ หาได้จาก

$$d_p = d - 0.65p \quad (33)$$

พื้นที่รับความเค้นของเกลียว (A_t) หาได้จากตารางมาตรฐานโบลต์ หรือจากสมการ

$$A_t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_p + d_r}{2} \right)^2 \quad (34)$$

พื้นที่รับแรงเฉือนต่อ 1 รอบเกลียว (A) หาได้จาก

$$A = \pi d_p \frac{p}{2} \quad (35)$$

พื้นที่หน้าตัดเกลียวนอก หาได้จาก

$$\text{พื้นที่หน้าตัดเกลียวนอก} = \text{พื้นที่รับความเค้นเกลียว} - \text{พื้นที่หน้าตัดภายในถึง} \quad (36)$$

ความเค้นดึงของฝาเกลียวหาได้จาก

$$\text{ความเค้นดึงของฝาเกลียว} = \text{พื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก} - \text{พื้นที่รับความเค้นสกรู} \quad (37)$$

เมื่อ	d_r	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรอง (m)
	d_p	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ (m)
	d	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหลัก (m)
	p	คือ ระยะพิตช์ (m)

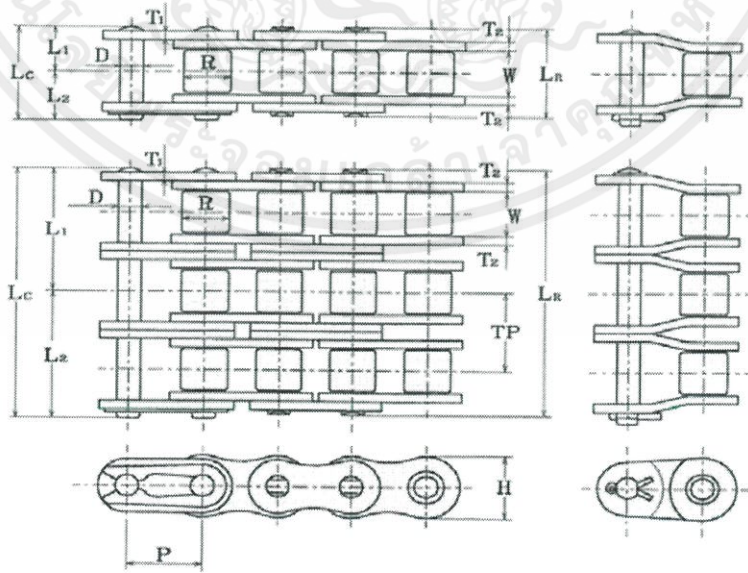
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การเลือกขนาดของโซ่

โซ่เป็นชิ้นส่วนที่เชื่อมระหว่างเฟืองขับและเฟืองตาม การเลือกขนาดโซ่ให้เหมาะกับประเภทของงานจึงเป็นเรื่องสำคัญ สิ่งสำคัญในการเลือกโซ่และเฟืองโซ่คือต้องระมัดระวังในการพิจารณาระบบส่งกำลังที่ต้องการออกแบบ ปัจจัยพื้นฐานที่ควรนำมาพิจารณาคือสภาวะแวดล้อมในการทำงานและอัตราทด ซึ่งควรทำงานภายในอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส ปราศจากฝุ่น ไอสารเคมี และในกรณีที่มีความเร็วรอบต่ำเราควรเลือกโซ่ที่ใช้จากความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุดของโซ่ (Average ultimate strength) เช่น ถ้าเราต้องการใช้ต้นกำลังที่มีแรงดึงเท่ากับ 35 กิโลนิวตัน เราควรที่จะเลือกโซ่โซ่ขนาด 60 เนื่องจากสามารถรับภาระแรงดึงสูงสุดได้ 43.1 กิโลนิวตัน ดังแสดงในตาราง 2.5 และรูปที่ 2.7

Simplex	Dimension - mm.										Ave. Ultimate Strength	Max. Allowable Load
	Chain No.	Bushing			Pin				Plate			
		Width	Dia.	Dia.	Length				Height	Thick		
ANSI	P	W	R	D	LR	LC	L1	L2	H	T	kN	kN
35	9.53	4.78	5.08	3.58	12	12.9	6	6.9	9.0	1.3	10.8	2.16
40	12.70	7.95	7.92	3.96	16.5	17.9	8.3	9.6	117.7	1.5	19.1	3.63
50	15.88	9.53	10.16	5.08	20.4	22	10.2	11.8	14.6	2.0	31.9	6.28
60	19.05	12.70	11.91	5.95	25.5	26.9	12.8	14.1	17.5	2.4	43.1	8.63
80	25.40	15.88	15.88	7.93	32.8	35	16.4	18.6	23.4	3.2	78.5	14.7
100	31.75	19.05	19.05	9.53	39.4	43	19.7	23.3	29.3	4.0	118	22.6
120	38.10	25.40	22.23	11.10	49.5	53.4	24.8	28.6	35.1	4.8	167	30.4
140	44.45	25.40	25.40	12.70	54	58.3	27	31.3	40.9	5.6	216	40.2
160	50.80	31.75	28.58	14.28	64.3	68.7	32.2	36.5	46.7	6.4	275	53
180	57.15	35.70	35.70	17.45	72.5	78.4	36.3	42.1	52.5	7.2	353	57.9
200	63.50	38.10	39.67	19.83	78.5	87	39.3	47.7	59.8	8.0	451	71.6
240	76.20	47.63	47.63	23.78	96.4	104.1	48.2	55.9	70.3	9.5	677	98.1

ตารางที่ 2.5 แสดงขนาดและความแข็งแรงของโซ่ [9]



รูปที่ 2.7 แสดงตัวแปรและลักษณะของโซ่ [9]

2.13 กฎการอนุรักษ์พลังงาน

พลังงานรวมของวัตถุจะไม่สูญหายไป แต่สามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ ซึ่งพลังงานรวมสามารถหาได้จาก

$$E_1 - E_2 = \Delta E_{system} \quad (38)$$

ซึ่งระบบที่เราพิจารณาเป็นกระบวนการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform-flow) ซึ่งหมายถึงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์มีค่าเป็นศูนย์ และระบบไม่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะได้สมการเป็น

$$W + m_1 h_1 - m_2 h_2 = m_2 u_2 - m_1 u_1 \quad (39)$$

พลังงานภายใน สามารถหาได้จาก

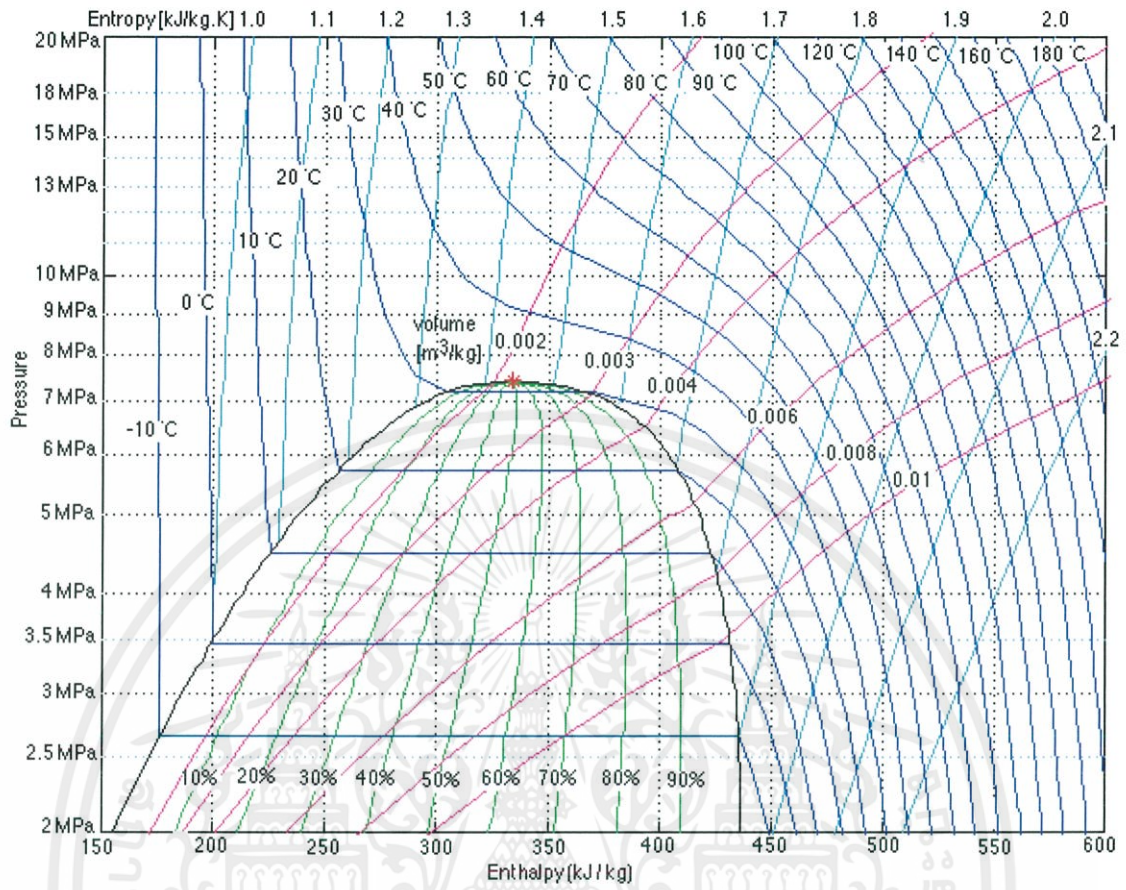
$$u = h - Pv \quad (40)$$

ปริมาตรความจำเพาะ สามารถหาได้จาก

$$v = \frac{V}{m} \quad (41)$$

เอ็นทัลปี สามารถหาได้จากรูปที่ 2.8

เมื่อ	E	พลังงาน (J)
	W	งาน (J)
	m	มวล (kg)
	P	ความดัน (Pa)
	h	เอ็นทัลปี (J/kg)
	v	ปริมาตรความจำเพาะ (m^3/kg)
	u	พลังงานภายใน (J/kg)



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเอนทัลปีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

เครื่องอัดแรงดันสูงเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มความดันให้ไปถึง 150 บาร์ได้โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทท่อ และใช้โอริง ในการป้องกันความดันรั่วออกจากตัวกระบอกสูบ

3.1 การคำนวณเพื่อออกแบบกระบอกสูบของเครื่องอัดแรงดัน

การออกแบบเครื่องอัดแรงดันกำหนดความดันสูงสุดที่ 150 บาร์ และความดันต่ำสุดที่ 20 บาร์

3.1.1 กระบวนการขยายตัวและอัดตัวของก๊าซจริง

ในกระบวนการขยายตัวและอัดตัวของก๊าซจริงเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราส่วนการอัดของปริมาตร แทนค่าลงในสมการที่ (1)

$$200 \times 10^5 = (2 \times 10^6) (r_c)^{1.29}$$

จะได้

$$r_c = 6.00$$

จากสมการจะได้ว่า อัตราส่วนการอัดมีค่าเท่ากับ 6 ซึ่งจะทำให้หาค่าอุณหภูมิที่สถานะที่สองของการอัดได้ โดยค่าอุณหภูมิ $T_1 = 25$ องศาเซลเซียส หรือ 298 เคลวิน แทนค่าลงในสมการที่ (2)

$$T_2 = (298)(6)^{1.29-1}$$

จะได้

$$T_2 = 500 \text{ K}$$

ดังนั้น อุณหภูมิที่สถานะที่สอง 500 เคลวิน

โดยในสถานะที่ 1 ลูกสูบจะอยู่ในตำแหน่งศูนย์ตายล่างของกระบอกสูบ ส่วนในสถานะที่ 2 ลูกสูบจะอยู่ในตำแหน่งศูนย์ตายบนของกระบอกสูบ

3.1.2 การคำนวณอัตราส่วนการอัดของกระบอกสูบ

หาปริมาตรที่เหมาะสมในการออกแบบปริมาตรของกระบอกสูบ แทนค่าลงในสมการที่ (3)

$$6 = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

จะได้

$$V_d = 5V_c$$

ดังนั้น ปริมาตรการอัดเป็น 5 เท่าของปริมาตรความจุ

3.1.3 การคำนวณขนาดให้เหมาะสมกับอัตราส่วนการอัดของกระบอกสูบ

กำหนดให้ปริมาตรของกระบอกสูบ 120 ลูกบาศก์เซนติเมตร

กำหนดให้ปริมาตรช่องว่าง (Clearance volume) เป็นทรงกระบอก มีขนาด 2×10^{-5} ลูกบาศก์เมตร และมีรัศมี 1.5 เซนติเมตร แทนค่าลงในสมการ (4)

$$2 \times 10^{-5} = \pi (1.50 \times 10^{-2})^2 h$$

จะได้

$$h = 2.80 \text{ cm}$$

ดังนั้น ความสูงของปริมาตรช่องว่างที่เป็นทรงกระบอก 2.80 เซนติเมตร

กำหนดให้ปริมาตรการกระจัด (Displacement volume) เป็นทรงกระบอก มีขนาด 1×10^{-4} ลูกบาศก์เมตร และมีรัศมี 2 เซนติเมตร แทนค่าลงในสมการ (4)

$$1 \times 10^{-4} = \pi (2.00 \times 10^{-2})^2 h$$

จะได้

$$h = 8.00 \text{ cm}$$

ดังนั้น ความสูงของปริมาตรการกระจัดที่เป็นทรงกระบอก 8.00 เซนติเมตร

3.2 การคำนวณความเค้นของกระบอกสูบและถึงเก็บความดัน

3.2.1 การคำนวณความเค้นแบบผนังหนาในแนวต่างๆของกระบอกสูบ

กำหนดให้	ความดันภายในกระบอกสูบ	$P_i = 20 \text{ MPa}$
	ความดันภายนอกกระบอกสูบ	$P_o = 0.1 \text{ MPa}$
	รัศมีภายในกระบอกสูบ	$r_i = 0.02 \text{ m}$
	รัศมีภายนอกกระบอกสูบ	$r_o = 0.03 \text{ m}$
		$r = r_i = 0.02 \text{ m}$

คำนวณความเค้นตามแนวยาว แทนค่าลงในสมการ (7)

$$\sigma_t = \frac{(200 \times 10^5)(0.02)^2 - (1.00 \times 10^5)(0.03)^2}{(0.03)^2 - (0.02)^2}$$

จะได้ $\sigma_t = 15.8 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นตามแนวยาว 15.8 เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นตามแนวรัศมี แทนค่าลงในสมการ (6)

$$\sigma_r = \frac{(200 \times 10^5)(0.02)^2 - (1 \times 10^5)(0.03)^2}{(0.03)^2 - (0.02)^2} + \frac{(0.02)^2 (0.03)^2 (1.00 - 200)(10^5)}{(0.02)^2 (0.03^2 - 0.02^2)}$$

จะได้ $\sigma_r = -20 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นตามแนวรัศมี 20.0 เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นแนวสัมผัส แทนค่าลงในสมการ (5)

$$\sigma_t = \frac{(200 \times 10^5)(0.02)^2 - (1 \times 10^5)(0.03)^2}{(0.03)^2 - (0.02)^2} - \frac{(0.02)^2 (0.03)^2 (1.00 - 200)(10^5)}{(0.02)^2 (0.03^2 - 0.02^2)}$$

จะได้ $\sigma_t = 51.6 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นตามแนวสัมผัส 51.6 เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นเฉือนในระนาบ xy แทนค่าลงในสมการที่ (9)

$$\tau_{xy} = \left| \frac{-20 - 51.6}{2} \right|$$

จะได้ $\tau_{xy} = 35.8 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนในระนาบ xy 35.8 เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นเฉือนในระนาบ yz แทนค่าลงในสมการที่ (10)

$$\tau_{yz} = \left| \frac{51.6 - 15.8}{2} \right|$$

จะได้ $\tau_{yz} = 17.9 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนในระนาบ yz 17.9 เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นเฉือนในระนาบ zx แทนค่าลงในสมการที่ (11)

$$\tau_{zx} = \left| \frac{15.8 - (-20)}{2} \right|$$

จะได้ $\tau_{zx} = 17.9 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนในระนาบ zx 17.9 เมกะปาสกาล

ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเท่ากับค่าความเค้นเฉือนในแกนที่มีความเค้นเฉือนเกิดขึ้นมากที่สุด ดังนั้น $\tau_{\max} = \tau_{xy} = 35.8 \text{ เมกะปาสกาล}$

คำนวณความเค้นรวมสูงสุดที่เกิดขึ้น แทนค่าลงในสมการที่ (8)

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} [(-20 - 51.6)^2 + (51.6 - 15.8)^2 + (15.8 + 20)^2 + 6(35.8^2 + 17.9^2 + 17.9^2)]^{\frac{1}{2}}$$

จะได้ $\sigma_{\max} = \sigma' = 98.0 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นรวมสูงสุดที่เกิดขึ้น 98.0 เมกะปาสกาล

3.2.2 การคำนวณหาค่าตัวประกอบการปลอดภัยของกระบอกสูบ

การออกแบบและสร้างเครื่องอัดแรงดันสูงต้องคำนึงถึงตัวประกอบความปลอดภัย (Safety factor) โดยใช้วัสดุในการสร้างเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (SS304)

โดยมีความแรงคราก $\sigma_{yield} = 215 \text{ MPa}$ และ มีความแรงครากเฉือน $\tau_{yield} = 186 \text{ MPa}$

แทนค่าลงในสมการ (12) จะได้

$$S.F. = \frac{215}{98} = 2.19$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงดึง 2.19

แทนค่าลงในสมการ (12) จะได้

$$S.F. = \frac{186}{35.8} = 5.19$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงเฉือน 5.19

3.2.3 การคำนวณความเค้นแบบผนังหนาในแนวต่างๆของถังเก็บความดัน

กำหนดให้	ความดันภายในกระบอกสูบ	$P_i = 20 \text{ MPa}$
	ความดันภายนอกกระบอกสูบ	$P_o = 0.1 \text{ MPa}$
	รัศมีภายในกระบอกสูบ	$r_i = 0.04 \text{ m}$
	รัศมีภายนอกกระบอกสูบ	$r_o = 0.05 \text{ m}$
		$r = r_i = 0.04 \text{ m}$

คำนวณความเค้นตามแนวยาว แทนค่าลงในสมการ (7)

$$\sigma_l = \frac{(200 \times 10^5)(0.04)^2 - (1.00 \times 10^5)(0.05)^2}{(0.05)^2 - (0.04)^2}$$

จะได้ $\sigma_l = 35.5 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นตามแนวยาว 35.5 เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นตามแนวรัศมี แทนค่าลงในสมการ (6)

$$\sigma_r = \frac{(200 \times 10^5)(0.04)^2 - (1 \times 10^5)(0.05)^2}{(0.05)^2 - (0.04)^2} + \frac{(0.04)^2 (0.05)^2 (1.00 - 200)(10^5)}{(0.04)^2 (0.05^2 - 0.04^2)}$$

จะได้ $\sigma_r = -20.0 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นตามแนวรัศมี 20.0 เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นแนวสัมผัส แทนค่าลงในสมการ (5)

$$\sigma_t = \frac{(200 \times 10^5)(0.04)^2 - (1 \times 10^5)(0.05)^2}{(0.05)^2 - (0.04)^2} - \frac{(0.04)^2 (0.05)^2 (1.00 - 200)(10^5)}{(0.04)^2 (0.05^2 - 0.04^2)}$$

จะได้ $\sigma_t = 90.6 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นตามแนวสัมผัส 90.6 เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นเฉือนในระนาบ xy แทนค่าลงในสมการที่ (9)

$$\tau_{xy} = \left| \frac{-20 - 90.6}{2} \right|$$

จะได้

$$\tau_{xy} = 55.3 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนในระนาบ xy 55.3 เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นเฉือนในระนาบ yz แทนค่าลงในสมการที่ (10)

$$\tau_{yz} = \left| \frac{90.6 - 35.5}{2} \right|$$

จะได้

$$\tau_{yz} = 27.6 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนในระนาบ yz 27.6 เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นเฉือนในระนาบ zx แทนค่าลงในสมการที่ (11)

$$\tau_{zx} = \left| \frac{35.5 - (-20)}{2} \right|$$

จะได้

$$\tau_{zx} = 27.8 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนในระนาบ zx 27.8 เมกะปาสกาล

ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเท่ากับค่าความเค้นเฉือนในแกนที่มีความเค้นเฉือนเกิดขึ้นมากที่สุด ดังนั้น $\tau_{\max} = \tau_{xy} = 55.3$ เมกะปาสกาล

คำนวณความเค้นรวมสูงสุดที่เกิดขึ้น แทนค่าลงในสมการที่ (8)

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(-20 - 90.6)^2 + (90.6 - 35.5)^2 + (35.5 + 20)^2 + 6(55.3^2 + 27.6^2 + 27.8^2) \right]^{1/2}$$

จะได้

$$\sigma_{\max} = \sigma' = 151 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นรวมสูงสุดที่เกิดขึ้น 151 เมกะปาสกาล

3.2.4 การคำนวณหาค่าตัวประกอบการปลอดภัยของถังเก็บความดัน

การออกแบบและสร้างถังเก็บความดันต้องคำนึงถึงตัวประกอบความปลอดภัย (Safety factor) โดยใช้วัสดุในการสร้างเป็นหลัก

โดยมีความแรงคราก $\sigma_{yield} = 375 \text{ MPa}$ และ มีความแรงครากเฉือน $\tau_{yield} = 215 \text{ MPa}$

แทนค่าลงในสมการ (12) จะได้

$$S.F. = \frac{375}{151} = 2.48$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงดึง 2.48

แทนค่าลงในสมการ (12) จะได้

$$S.F. = \frac{215}{55.3} = 3.89$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงเฉือน 3.89

3.3 การคำนวณอัตราทดรอบของตัวส่งกำลัง

3.3.1 การคำนวณหาแรงบิดสูงสุด

ในการอัดความดันโดยคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่บริเวณข้อเหวี่ยงของลูกสูบซึ่งค่าแรงบิดที่มากที่สุดสามารถนำไปคำนวณหาอัตราทดรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมได้ โดยพิจารณาตำแหน่งของ ข้อเหวี่ยง 3 ตำแหน่งที่คาดว่าจะทำให้เกิดค่าแรงบิดมากที่สุด โดยตำแหน่งของข้อเหวี่ยงที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดในระบบคือตำแหน่งที่ปริมาตรภายในกระบอกสูบเป็น 1 ใน 4 ส่วนของปริมาตรกระบอกสูบ $(V = \frac{1}{4})$ แทนค่าลงในสมการที่ (1)

$$P_2 = (200 \times 10^4) \left(\frac{(1.01 \times 10^{-4}) + (4.52 \times 10^{-5})}{(4.52 \times 10^{-5})} \right)^{1.29}$$

จะได้

$$P_2 = 90.4 \text{ bar}$$

ดังนั้น ความดันเมื่อเกิดแรงบิดสูงสุด 90.4 บาร์

แทนค่าลงในสมการที่ (13)

$$90.4 \times 10^5 = \frac{F}{12.6 \times 10^{-4}}$$

จะได้

$$F = 11.4 \text{ kN}$$

ดังนั้น แรงที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดแรงบิดสูงสุด 11.4 กิโลนิวตัน

แทนค่าลงในสมการที่ (17)

$$T = [(11.4 \times 10^3) \cos 6.7^\circ] (4.00 \times 10^{-2}) (\sin 38.3^\circ)$$

จะได้

$$T = 354 \text{ N} \cdot \text{m}$$

แทนค่าลงในสมการที่ (18)

$$M = (11.4 \times 10^3) (24.1 \times 10^{-2}) (\cos 83.3^\circ)$$

จะได้

$$M = 320 \text{ N} \cdot \text{m}$$

ดังนั้น แรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้น $354 + 320 = 674$ นิวตัน·เมตร

3.3.2 การคำนวณอัตราทดรอบ

โดยการทดรอบใช้ใช้ในการส่งกำลังระหว่างเฟืองขับกับเฟืองตาม โดยอาศัยหลักการทดรอบมาใช้ในการทดสอบเพื่อเพิ่มและลดความเร็วของเฟืองตัวที่ใช้ขับได้

แทนค่าลงในสมการที่ (19) และ (20)

$$400 = 674(2\pi N)$$

จะได้

$$N = 5.70 \text{ rpm}$$

ดังนั้น ความเร็วรอบ 5.70 รอบต่อนาที ซึ่งเราเลือกใช้ความเร็วรอบ 3.00 รอบต่อนาที

เมื่อทราบความเร็วรอบในการอัดทำให้สามารถหาอัตราทดที่เหมาะสมกับมอเตอร์ได้ โดยที่ความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับ 1450 รอบต่อนาที โดยเราต้องการทดรอบให้เหลือเพียง 3 รอบต่อนาที ในระบบที่สร้างนี้ใช้ชุดเกียร์ทดรอบที่มีอัตราทด 60 เท่า ทำให้ความเร็วรอบจาก 1450 รอบต่อนาที เหลือเพียง 24 รอบต่อนาที

แทนค่าลงในสมการที่ (21)

$$\frac{24}{3} = \frac{n_2}{n_1}$$

จะได้

$$n_2 = 8n_1$$

ดังนั้น เฟืองโซ่ตัวตามต้องมีจำนวนฟันเป็น 8 เท่าของเฟืองโซ่ตัวขับ

3.4 การคำนวณค่าตัวประกอบความปลอดภัยของชิ้นส่วน

3.4.1 การคำนวณแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น

คำนวณแรงสูงสุดที่เกิดจากความดันในกระบอกสูบขณะอัด แทนค่าลงในสมการที่ (13)

$$150 \times 10^5 = \frac{F}{\pi(2.00 \times 10^{-2})^2}$$

จะได้

$$F = 19.0 \text{ kN}$$

ดังนั้น แรงสูงสุดที่เกิดขึ้น 19.0 กิโลนิวตัน

3.4.2 การคำนวณความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นเฉือนสูงสุด

โดยที่วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (SS304) มีความแรงดึงคราก 215 เมกะปาสกาล และมีความแรงเฉือนคราก 186 เมกะปาสกาล ต้องการตัวประกอบความปลอดภัย 1.5

แทนค่าลงในสมการ (12)

$$1.50 = \frac{215}{\sigma_{\max}} = \frac{186}{\tau_{\max}}$$

จะได้

$$\sigma_{\max} = 143 \text{ MPa} \text{ และ } \tau_{\max} = 124 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นดึงสูงสุด 143 เมกะปาสกาล และ ความเค้นเฉือนสูงสุด 124 เมกะปาสกาล

3.4.3 การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน

คำนวณพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนที่ควรจะเป็น จากความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นเฉือนสูงสุด ที่ตัวประกอบความปลอดภัย 1.5

แทนค่าลงในสมการที่ (15)

$$143 \times 10^6 = \frac{19 \times 10^3}{A}$$

จะได้

$$A = 1.76 \text{ cm}^2$$

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดที่เกิดจากความเค้นดึงสูงสุด 1.76 ตารางเซนติเมตร

แทนค่าลงในสมการที่ (14)

$$124 \times 10^6 = \frac{19 \times 10^3}{A}$$

จะได้

$$A = 2.02 \text{ cm}^2$$

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดที่เกิดจากความเค้นเฉือนสูงสุด 2.02 ตารางเซนติเมตร

พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนต้องมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับพื้นที่หน้าตัดที่เกิดจากความเค้นดึงสูงสุดและความเค้นเฉือนสูงสุดเพื่อให้ตัวประกอบความปลอดภัยเป็น 1.5

3.4.4 ตัวประกอบความปลอดภัยที่แผ่นยึดกระบอกสูบ

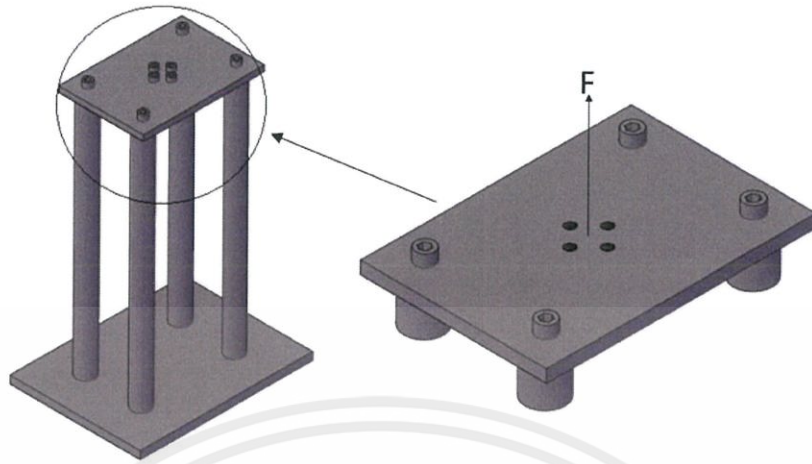
แรงที่เกิดขึ้นที่กระบอกสูบทำให้เกิดความเค้นดัดขึ้น ณ จุดศูนย์กลางของแผ่นยึด โดยกำหนดขนาดของแผ่นยึดให้มีความกว้าง 120 มิลลิเมตร หนา 16 มิลลิเมตร และมีความยาวระหว่างจุดรองรับสองจุด 200 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แทนค่าลงในสมการที่ (16)

$$\sigma_b = \frac{3(19 \times 10^3)(200 \times 10^{-3})}{2(120 \times 10^{-3})(16 \times 10^{-3})^2}$$

จะได้

$$\sigma_b = 185 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นที่แผ่นยึดกระบอกสูบ 185 เมกะปาสกาล



รูปที่ 3.1 แสดงแรงที่กระทำกับแผ่นยึดกระบอกสูบ

ตัวประกอบความปลอดภัย แทนค่าในสมการที่ (12)

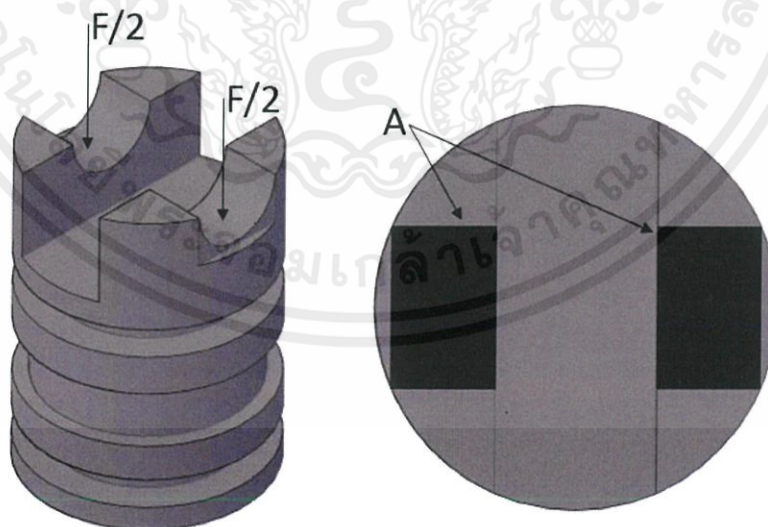
$$S.F. = \frac{375}{185}$$

จะได้

$$S.F. = 2.02$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยที่แผ่นยึดกระบอกสูบ 2.02

3.4.5 ตัวประกอบความปลอดภัยที่ลูกสูบ



รูปที่ 3.2 แสดงแรงที่กระทำกับลูกสูบ

ความเค้นที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงที่มากกระทำดังแสดงในรูปที่ 3.2 แทนค่าในสมการที่ (15)

$$\sigma = \frac{19 \times 10^3}{(22 \times 10^{-3})(16 \times 10^{-3})}$$

จะได้

$$\sigma = 54.0 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นที่ลูกสูบ 54.0 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัย แทนค่าในสมการที่ (12)

$$S.F. = \frac{215}{54}$$

จะได้

$$S.F. = 4.00$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยที่ลูกสูบ 4.00

3.4.6 ตัวประกอบความปลอดภัยที่สลักลูกสูบ

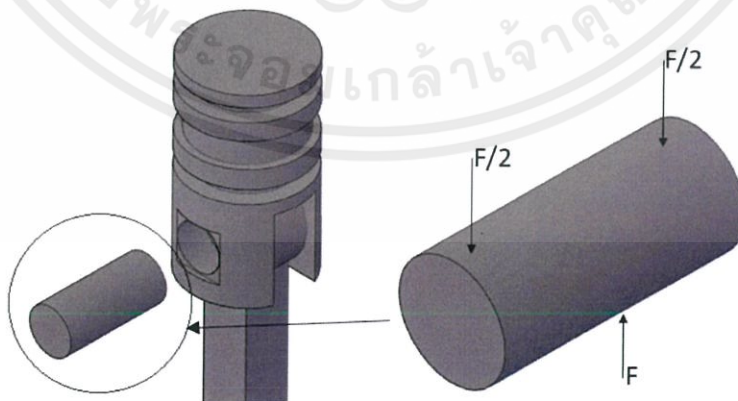
ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงที่มากกระทำดังแสดงในรูปที่ 3.3 แทนค่าในสมการที่ (14)

$$\tau = \frac{19 \times 10^3}{2\pi(8 \times 10^{-3})^2}$$

จะได้

$$\tau = 47.2 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนที่สลักลูกสูบ 47.2 เมกะปาสกาล



รูปที่ 3.3 แสดงแรงที่กระทำกับสลักลูกสูบ

ตัวประกอบความปลอดภัย แทนค่าในสมการที่ (12)

$$S.F. = \frac{186}{47.2}$$

จะได้

$$S.F. = 3.94$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยที่สลักลูกสูบ 3.94

3.4.7 ตัวประกอบความปลอดภัยที่ก้านสูบ

ความเค้นที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงที่มากระทำดังแสดงในรูปที่ 3.4 แทนค่าในสมการที่ (15)

$$\sigma = \frac{19 \times 10^3}{(16 \times 10^{-3})^2}$$

จะได้

$$\sigma = 74.2 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นที่ก้านสูบ 74.2 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัย แทนค่าในสมการที่ (12)

$$S.F. = \frac{375}{74.2}$$

จะได้

$$S.F. = 5.05$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยที่ก้านสูบ 5.05



รูปที่ 3.4 แสดงแรงที่กระทำกับก้านสูบ

3.4.8 ตัวประกอบความปลอดภัยที่สลักยึดก้านสูบ

ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงที่มากระทำดังแสดงในรูปที่ 3.5 แทนค่าในสมการที่ (14)

$$\tau = \frac{19 \times 10^3}{\pi(10 \times 10^{-3})^2}$$

จะได้ $\tau = 60.5 \text{ MPa}$

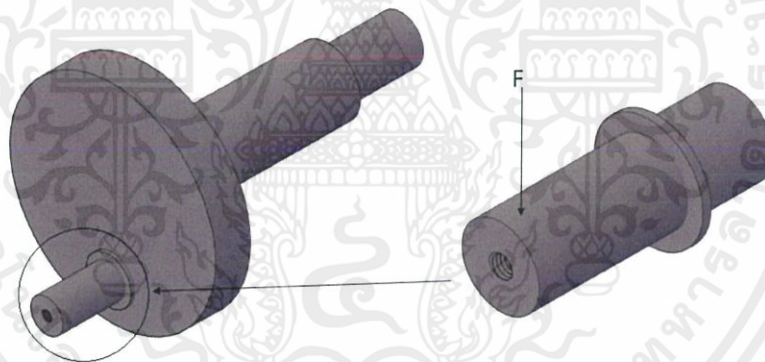
ดังนั้น ความเค้นเฉือนที่สลักยึดก้านสูบ 60.5 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัย แทนค่าในสมการที่ (12)

$$S.F. = \frac{186}{60.5}$$

จะได้ $S.F. = 3.07$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยที่สลักยึดก้านสูบ 3.07



รูปที่ 3.5 แสดงแรงที่กระทำกับสลักยึดก้านสูบ

3.4.9 ตัวประกอบความปลอดภัยที่เพลาค้อเหวี่ยง

ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงที่มากระทำดังแสดงในรูปที่ 3.5 แทนค่าในสมการที่ (14)

$$\tau = \frac{19 \times 10^3}{\pi(20 \times 10^{-3})^2}$$

จะได้ $\tau = 15.1 \text{ MPa}$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนที่เพลาค้อเหวี่ยง 15.1 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัย แทนค่าในสมการที่ (12)

$$S.F. = \frac{215}{15.1}$$

จะได้

$$S.F. = 14.2$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยที่เพลาช้อเหวี่ยง 14.2

3.4.10 ตัวประกอบความปลอดภัยที่เสาและฐาน

ความเค้นที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงที่มากระทำดังแสดงในรูปที่ 3.6 แทนค่าในสมการที่ (15)

$$\sigma = \frac{19 \times 10^3}{4\pi(19 \times 10^{-3})^2}$$

จะได้

$$\sigma = 4.2 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนที่เสา 4.2 เมกะปาสกาล

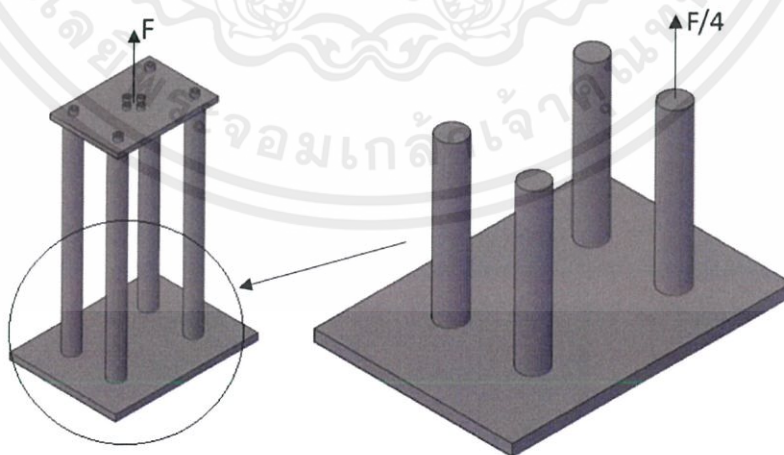
ตัวประกอบความปลอดภัย แทนค่าในสมการที่ (12)

$$S.F. = \frac{375}{4.2}$$

จะได้

$$S.F. = 89$$

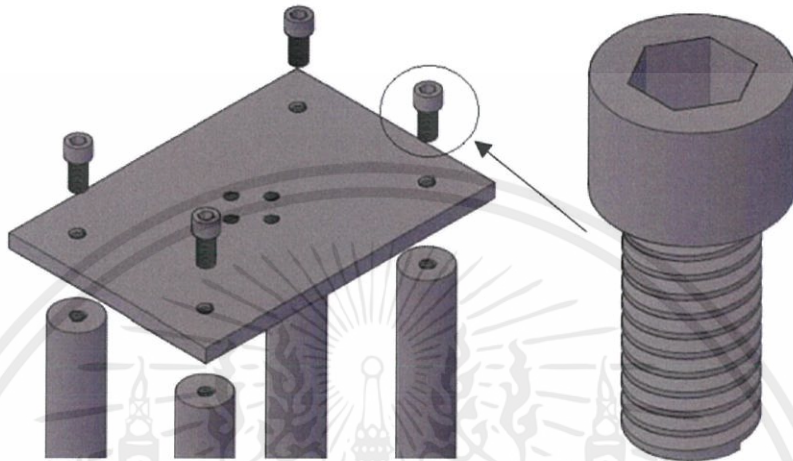
ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยที่เสาและฐาน 89



รูปที่ 3.6 แสดงแรงที่กระทำกับเสาและฐาน

3.5 การคำนวณโบลต์

คำนวณโบลต์ที่เชื่อมต่อเสากับแผ่นยึดกระบอกสูบ จากตารางมาตรฐาน เราเลือกโบลต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัวในการรับแรง และโบลต์เป็นเหล็กคลาส 12.9 ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งของโบลต์ระหว่างเสากับแผ่นยึดกระบอกสูบ

P	คือ แรงที่กระทำต่อโบลต์ 1 ตัว	$P = 4.75 \text{ kN}$
σ_y	คือ ความแรงคราก	$\sigma_y = 1100 \text{ MPa}$
σ_p	คือ ความทนพิสุจน์	$\sigma_p = 880 \text{ MPa}$
A_t	คือ พื้นที่หน้าตัดของโบลต์ส่วนที่เป็นเกลียว	$A_t = 85 \text{ mm}^2$
A_b	คือ พื้นที่หน้าตัดสูงสุดของโบลต์	$A_b = 113 \text{ mm}^2$
l_{thd}	คือ ความยาวของโบลต์ส่วนที่เป็นเกลียว	$l_{thd} = 24 \text{ mm}$
l_{bolt}	คือ ความยาวของโบลต์	$l_{bolt} = 24 \text{ mm}$
l_s	คือ ความยาวของโบลต์ส่วนที่ไม่เป็นเกลียว	$l_s = 0 \text{ mm}$
l_t	คือ ความยาวของโบลต์ส่วนที่เป็นเกลียวในแผ่นวัสดุ	$l_t = 24 \text{ mm}$
E_b	คือ ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของโบลต์เหล็ก	$E_b = 210 \text{ GPa}$
E_m	คือ ค่ามอดุลัสสภาพยืดหยุ่นของเหล็ก	$E_m = 210 \text{ GPa}$
D_{eff}	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลของวัสดุที่ถูกเชื่อมต่อกัน	$D_{eff} = 38 \text{ mm}$

แรงเริ่มต้นที่มากที่สุดในการขันโบลต์ แทนค่าลงในสมการ (30)

$$F_i = 0.9(880 \times 10^6)(85 \times 10^{-6})$$

จะได้ $F_i = 67.0 \text{ kN}$

ดังนั้น แรงเริ่มต้นที่มากที่สุดในการขันโบลต์ 67.0 กิโลนิวตัน

ค่าคงที่ความแข็งแรงของแผ่นเหล็ก แทนค่าลงในสมการ (25)

$$K_m = \frac{\pi(38 \times 10^{-3})^2(210 \times 10^9)}{4(24 \times 10^{-3})^2}$$

จะได้ $K_m = 413 \text{ GN/m}$

ดังนั้น ค่าคงที่ความแข็งแรงของแผ่นเหล็ก 413 กิกะนิวตันต่อเมตร

ค่าคงที่ความแข็งแรงของโบลต์ แทนค่าลงในสมการ (24)

$$K_b = \left[\frac{(85 \times 10^{-6})(113 \times 10^{-6})}{(113 \times 10^{-6})(24 \times 10^{-3}) + (85 \times 10^6)(0)} \right] (210 \times 10^6)$$

จะได้ $K_b = 744 \text{ MN/m}$

ดังนั้น ค่าคงที่ความแข็งแรงของโบลต์เหล็ก 744 เมกะนิวตันต่อเมตร

ค่าคงที่จุดเชื่อมต่อ แทนค่าลงในสมการ (28)

$$C = \frac{744 \times 10^6}{(744 \times 10^6) + (413 \times 10^9)}$$

จะได้ $C = 0.002$

ดังนั้น ค่าคงที่จุดเชื่อมต่อ 0.002

แรงที่กระทำกับโบลต์ แทนค่าลงในสมการ (27)

$$P_b = (0.002)(4.75 \times 10^3)$$

จะได้ $P_b = 9.50 \text{ N}$

ดังนั้น แรงที่กระทำกับโบลต์ 9.50 นิวตัน

แรงทั้งหมดที่กระทำโบลต์ แทนค่าลงในสมการ (29)

$$F_b = (67 \times 10^3) + (9.5)$$

จะได้

$$F_b = 67.0 \text{ kN}$$

ดังนั้น แรงทั้งหมดที่กระทำโบลต์ 67.0 กิโลนิวตัน

ความเค้นดึงสูงสุดที่กระทำต่อโบลต์ แทนค่าลงในสมการ (31)

$$\sigma_{bolt} = \frac{67 \times 10^3}{85 \times 10^{-6}}$$

จะได้

$$\sigma_{bolt} = 788 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นดึงสูงสุดที่กระทำต่อโบลต์ 788 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์ แทนค่าลงในสมการ (12)

$$S.F. \cdot bolt = \frac{1100 \times 10^6}{788 \times 10^6}$$

จะได้

$$S.F. \cdot bolt = 1.40$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยของโบลต์ 1.40

3.6 ความแข็งแรงของเกลียวโบลต์และถังเก็บความดัน

3.6.1 ตัวประกอบความปลอดภัยของซีเกลียวโบลต์ที่เสาและแผ่นยึดกระบอกลูกสูบ

พื้นที่หน้าตัดที่เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์จะเป็นตัวรับความเค้นเฉือนทั้งหมด จะได้พื้นที่รับแรงเฉือนต่อหนึ่งรอบเกลียวเมื่อ โบลต์มีขนาด 12 มิลลิเมตร และระยะพิตช์ 1.75 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ แทนค่าในสมการที่ (33)

$$d_p = 12 - 0.65(1.75)$$

จะได้

$$d_p = 10.9 \text{ mm}$$

ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ 10.9 มิลลิเมตร

พื้นที่รับแรงเฉือนต่อหนึ่งรอบเกลียว แทนค่าในสมการที่ (35)

$$A = \pi \times 10.9 \times 10^{-3} \times \frac{1.75 \times 10^{-3}}{2}$$

จะได้

$$A = 3.00 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

ดังนั้น พื้นที่รับแรงเฉือนต่อหนึ่งรอบเกลียว 30.0 ตารางมิลลิเมตร

ความเค้นเฉือนต่อหนึ่งรอบเกลียว แทนค่าในสมการที่ (14)

$$\tau = \frac{(19 \times 10^3) / 15}{4 \times 3 \times 10^{-5}}$$

จะได้

$$\tau = 10.5 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนต่อหนึ่งรอบเกลียว 10.5 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัยต่อหนึ่งซีเกลียวโบลต์ แทนค่าลงในสมการที่ (12)

$$S.F. = \frac{215}{10.5}$$

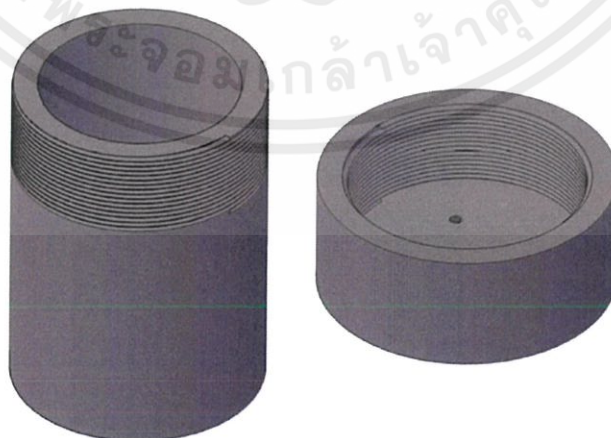
จะได้

$$S.F. = 20.0$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยต่อหนึ่งซีเกลียวโบลต์ 20.0

3.6.2 ตัวประกอบความปลอดภัยเนื่องจากแรงดึงเกลียวของถังเก็บความดันและฝาเกลียว

เกลียวที่ใช้เป็นเกลียวละเอียดมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางหลัก 99 มิลลิเมตรและระยะพิทช์ 2 มิลลิเมตร ซึ่งลักษณะของถังเก็บความดันและฝาดังแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะถังเก็บความดันและฝาดังเก็บความดัน

เส้นผ่านศูนย์กลางร่อง แทนค่าในสมการที่ (32)

$$d_r = 99 - 1.23(2)$$

จะได้

$$d_r = 97.5 \text{ mm}$$

ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางร่อง 97.5 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ แทนค่าในสมการที่ (33)

$$d_p = 99 - 0.65(2)$$

จะได้

$$d_p = 98.7 \text{ mm}$$

ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ 98.7 มิลลิเมตร

กำหนดให้ที่ถัง มีความดัน 20 เมกะปาสกาล และรับแรง 252 กิโลนิวตัน

พื้นที่รับแรงสกรู แทนค่าในสมการที่ (34)

$$A_t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{0.098 + 0.097}{2} \right)^2$$

จะได้

$$A_t = 7.56 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

ดังนั้น พื้นที่รับแรงสกรู 75.6 ตารางเซนติเมตร

พื้นที่หน้าตัดที่เป็นเกลียวนอก แทนค่าในสมการที่ (36)

$$\text{พื้นที่หน้าตัดที่เป็นเกลียวนอก} = (7.56 \times 10^{-3}) - (5.03 \times 10^{-3})$$

จะได้

$$\text{พื้นที่หน้าตัดที่เป็นเกลียวนอก} = 2.53 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดที่เป็นเกลียวนอก 25.3 ตารางเซนติเมตร

ความเค้นดึงที่เกลียวนอก แทนค่าในสมการที่ (15)

$$\sigma_t = \frac{252}{2.53 \times 10^{-3}}$$

จะได้

$$\sigma_t = 99.6 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นดึงที่เกลียวนอก 99.6 เมกะปาสกาล

พื้นที่รับความเค้นดึงของฝาเกลียว แทนค่าในสมการที่ (37)

$$\text{พื้นที่รับความเค้นดึงของฝาเกลียว} = (1.13 \times 10^{-2}) - (7.56 \times 10^{-3})$$

จะได้ $\text{พื้นที่รับความเค้นดึงของฝาเกลียว} = 3.74 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

ดังนั้น พื้นที่รับความเค้นดึงของฝาเกลียว 37.4 ตารางเซนติเมตร

ความเค้นดึงของฝาเกลียว แทนค่าในสมการที่ (15)

$$\sigma_t = \frac{252}{3.74 \times 10^{-3}}$$

จะได้

$$\sigma_t = 67.4 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นดึงของฝาเกลียว 67.4 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัยที่เกลียวนอกของถังเก็บความดัน แทนค่าในสมการที่ (12)

$$S.F. = \frac{215}{99.6}$$

จะได้

$$S.F. = 2.16$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยที่เกลียวนอกของถังเก็บความดัน 2.16

ตัวประกอบความปลอดภัยที่ฝาเกลียว แทนค่าในสมการที่ (12)

$$S.F. = \frac{215}{67.4}$$

จะได้

$$S.F. = 3.19$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยที่ฝาเกลียว 3.19

3.6.3 ตัวประกอบความปลอดภัยต่อหนึ่งซี่เกลียวของถังเก็บความดันและฝาเกลียว

พื้นที่หน้าตัดที่เส้นผ่านศูนย์กลางพิทช์จะเป็นตัวรับความเค้นเฉือนทั้งหมด จะได้พื้นที่รับแรงเฉือนต่อหนึ่งรอบเกลียวเมื่อ ระยะพิทช์ 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางพิทช์ 98.7 มิลลิเมตร

พื้นที่รับแรงเฉือนต่อหนึ่งรอบเกลียว แทนค่าในสมการที่ (35)

$$A = \pi \times 0.0987 \times \frac{0.002}{2}$$

จะได้

$$A = 3.10 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

ดังนั้น พื้นที่รับแรงเฉือนต่อหนึ่งรอบเกลียว 3.10 ตารางเซนติเมตร

ความเค้นเฉือนต่อหนึ่งรอบเกลียว แทนค่าในสมการที่ (14)

$$\tau = \frac{(252 \times 10^3) / 16}{3.10 \times 10^{-5}}$$

จะได้

$$\tau = 51 \text{ MPa}$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนต่อหนึ่งรอบเกลียว 51 เมกะปาสกาล

ตัวประกอบความปลอดภัยต่อหนึ่งซี่เกลียวของถังเก็บความดันและฝาเกลียว แทนค่าในสมการ (12)

$$S.F. = \frac{186}{51}$$

จะได้

$$S.F. = 3.65$$

ดังนั้น ตัวประกอบความปลอดภัยต่อหนึ่งซี่เกลียวของถังเก็บความดันและฝาเกลียว 3.65

3.7 การคำนวณหางานที่ใช้ในการอัดความดัน

คำนวณหางานที่ใช้ในการอัดความดัน 150 บาร์ ที่ความดันเริ่มต้น 40, 50 และ 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเราจะพิจารณาที่ถังเก็บความดันที่มีปริมาตร 754 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 40 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.054 และ 1.95 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 455 และ 240 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.014 และ 0.0001 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 400 และ 238 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.054(455) - 1.95(240) = 1.95(238) - 0.054(400)$$

จะได้

$$W = 886 \text{ kJ}$$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 886 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 40 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.053 และ 1.80 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 470 และ 270 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.014 และ 0.0001 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 413 และ 268 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.053(470) - 1.8(270) = 1.8(268) - 0.053(413)$$

จะได้

$$W = 922 \text{ kJ}$$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 922 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 40 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.051 และ 1.70 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 480 และ 280 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.015 และ 0.00012 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 421 และ 278 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.051(480) - 1.7(280) = 1.7(278) - 0.051(480)$$

จะได้

$$W = 903 \text{ kJ}$$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 903 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 40 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.049 และ 1.55 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 490 และ 320 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.015 และ 0.00013 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 429 และ 318 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.049(490) - 1.55(320) = 1.55(318) - 0.049(429)$$

จะได้ $W = 944 \text{ kJ}$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 944 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 50 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.068 และ 1.27 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 430 และ 240 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.011 และ 0.00063 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 375 และ 231 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.068(430) - 1.27(240) = 1.27(231) - 0.068(375)$$

จะได้ $W = 543 \text{ kJ}$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 543 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 50 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.066 และ 1.20 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 450 และ 270 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.0115 และ 0.00063 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 393 และ 261 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.066(450) - 1.2(270) = 1.2(261) - 0.066(393)$$

จะได้ $W = 582 \text{ kJ}$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 582 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 50 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.064 และ 1.16 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 460 และ 280 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.012 และ 0.00065 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 401 และ 270 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.064(460) - 1.16(280) = 1.16(270) - 0.064(401)$$

จะได้ $W = 583 \text{ kJ}$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 583 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 50 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.062 และ 0.962 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 480 และ 320 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.0122 และ 0.0008 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 419 และ 308 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.062(480) - 0.962(320) = 0.962(308) - 0.062(419)$$

จะได้ $W = 549 \text{ kJ}$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 549 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 60 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.082 และ 1.33 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 260 และ 240 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.01 และ 0.00056 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 205 และ 232 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.082(260) - 1.33(240) = 1.33(232) - 0.082(205)$$

จะได้ $W = 590 \text{ kJ}$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 590 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 60 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.08 และ 1.18 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 430 และ 270 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.01 และ 0.00064 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 372 และ 260 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.08(430) - 1.18(270) = 1.18(260) - 0.08(372)$$

จะได้

$$W = 562 \text{ kJ}$$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 562 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 60 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.077 และ 1.03 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 450 และ 280 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.01 และ 0.0007 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 391 และ 269 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.077(450) - 1.03(280) = 1.03(269) - 0.077(391)$$

จะได้

$$W = 501 \text{ kJ}$$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 501 กิโลจูล

ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 60 และ 150 บาร์ มีมวล (m) 0.074 และ 0.874 กิโลกรัมตามลำดับ เอนทัลปี (h) 475 และ 320 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากรูปที่ 2.8 ปริมาตรความจุจำเพาะ (v) 0.01 และ 0.00086 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (41) พลังงานภายใน (u) 414 และ 307 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หาได้จากสมการที่ (40) งานที่ใช้ในการอัดความดัน แทนค่าในสมการที่ (39)

$$W + 0.074(475) - 0.874(320) = 0.874(307) - 0.074(414)$$

จะได้

$$W = 482 \text{ kJ}$$

ดังนั้น งานที่ใช้ในการอัดความดัน 482 กิโลจูล

3.8 สรุปการคำนวณชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่เลือกใช้

จากการคำนวณและออกแบบทั้งหมดเราสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

รายการ	จำนวน (ชิ้น)	σ (MPa)	τ (MPa)	Safety factor	
				$S.F._{tensile}$	$S.F._{shear}$
1 กระบอกสูบ	1	98.0	35.8	2.19	5.19
2 ลูกสูบ	1	54	-	4.00	-
3 สลักลูกสูบ	1	-	47.2	-	3.94
4 ก้านสูบ	1	74.2	-	5.05	-
5 สลักก้านสูบ	1	-	60.5	-	3.07
6 เพลาข้อเหวี่ยง	1	-	15.1	-	14.2
7 แผ่นยึดกระบอกสูบ	1	185	-	2.02	-
8 เสาค้ำและฐาน	4	4.20	-	89.0	-
9 โบลต์ ที่ยึดเสากับแผ่นยึดกระบอกสูบ	4	ต่อ 1 ตัว 788	ต่อ 1 ซีเกลียว 10.5	1.40	20.0
10 ถังเก็บความดัน	1	151	55.3	2.48	3.89
11 ถังเก็บความดัน(เกลียว)	1	99.6	51.0	2.16	3.65
12 ฝาถังเก็บความดัน(เกลียว)	1	67.4	51.0	3.19	3.65

ตารางที่ 3.1 ตารางสรุปการคำนวณและตัวประกอบความปลอดภัยของชิ้นส่วนต่างๆ

รายการ	จำนวน (ชิ้น)	เหตุผล
1 โอริง U-cup ยางโพลียูรีเทนขนาด 40 mm	2	เหมาะกับก๊าซและใช้กับงานที่มีความดันสูง
2 ตลับลูกปืน		
2.1 เม็ดทรงกระบอกขนาด 20 mm	1	สามารถรับโหลดได้ 40.5 kN (ต่อ 1 ชิ้น)
2.2 เม็ดกลมร่องลึกแฉวเตียขนาด 40 mm	4	สามารถรับโหลดได้ 10.3 kN (ต่อ 1 ชิ้น)
3 เกียร์ทดขนาด 70	1	อัตราทดสูงถึง 1:60
4 โซ่เบอร์ 50	2	ความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 31.9 kN
5 มอเตอร์	1	กำลัง 400W ความเร็ว 1450 รอบต่อนาที
6 วาล์วกันกลับ	2	ทนแรงดันได้ 294 บาร์
7 บอลวาล์ว	1	ทนแรงดันได้ 175 บาร์
8 เครื่องวัดความดัน	1	วัดความดันสูงสุดได้ 250 บาร์

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงอุปกรณ์ที่เลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองอัดความดันของเครื่องอัดแรงดันสูง โดยทดลองอัดที่ความดันเริ่มต้นที่ 40 50 และ 60 บาร์ ที่อุณหภูมิคงที่ 20 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส โดยมีความดันสิ้นสุดการอัดที่ 150 บาร์

4.1 ผลการทดลองอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์

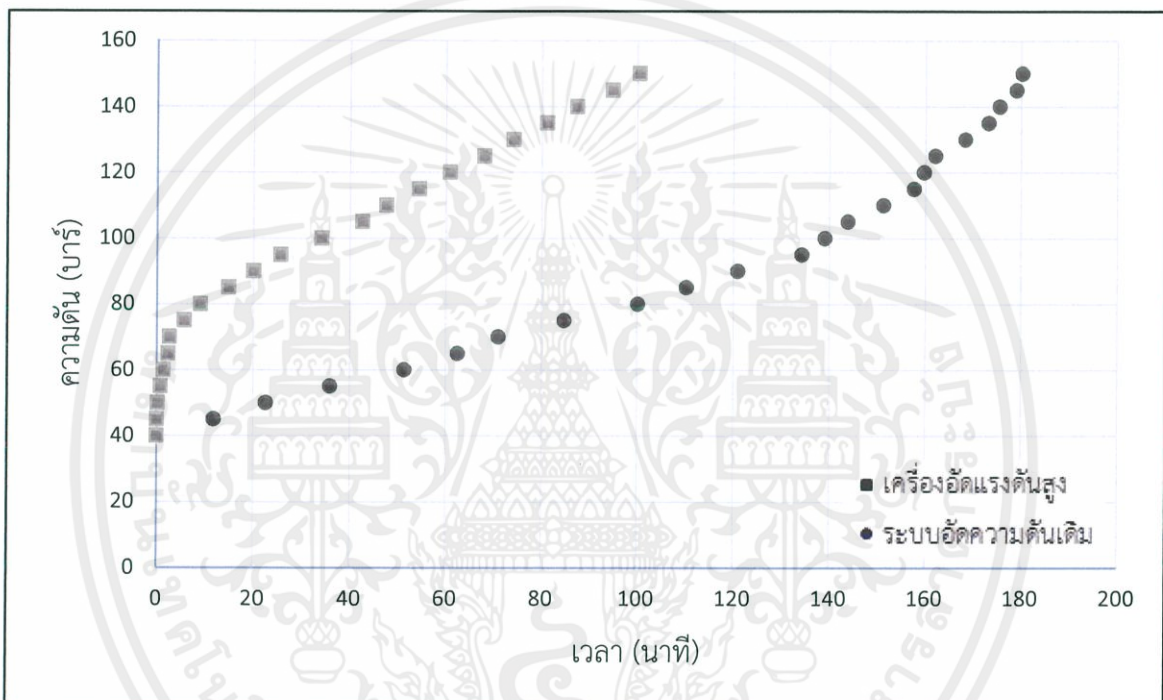
4.1.1 ที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.1 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 40 ถึง 80 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ความดัน 80 ถึง 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ 40 ถึง 120 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มเร็วขึ้นจนถึงความดัน 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		40	45	50	55	60	65
เวลา (นาที่)	ระบบใหม่	0	0.06	0.21	0.76	1.4	2.4
	ระบบเดิม	0	11	22	35	51	62
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			183	104	46	36	26
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		70	75	80	85	90	95
เวลา (นาที่)	ระบบใหม่	2.6	5.8	9.1	14.8	20.1	25.6
	ระบบเดิม	71	84.7	100	110	121	134
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		27.3	14.6	11	7.4	6	5.2
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		100	105	110	115	120	125
เวลา (นาที่)	ระบบใหม่	34	42.6	47.6	54.4	60.8	68
	ระบบเดิม	139	144	151	157	160	163
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		4	3.4	3.2	3	2.6	2.4

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)				
		130	135	140	145	150
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	74	81	87	94.8	100
	ระบบเดิม	168	173	175	179	181
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		2.3	2	2	2	1.8

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส



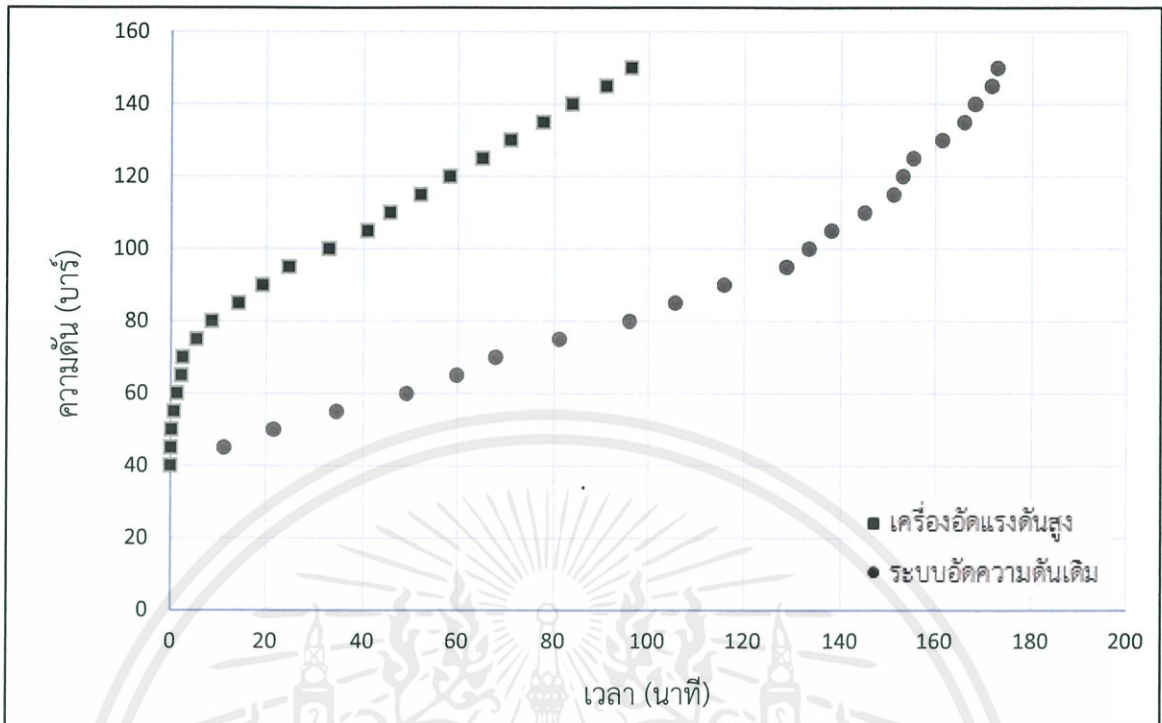
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส

4.1.2 ที่อุณหภูมิกองที่ 30 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.2 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 30 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 40 ถึง 80 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ความดัน 80 ถึง 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ 40 ถึง 120 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มเร็วขึ้นจนถึงความดัน 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		40	45	50	55	60	65
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	0	0.06	0.2	0.7	1.3	2.28
	ระบบเดิม	0	11.4	21.6	34.4	49.3	60
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			190	108	49	38	26.3
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		70	75	80	85	90	95
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	2.5	5.5	8.7	14.2	19.2	24.6
	ระบบเดิม	68	81.2	96	106	116	129
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		27.2	14.7	11	7.5	6	5.2
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		100	105	110	115	120	125
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	32.7	40.8	45.7	52.2	58.3	65.2
	ระบบเดิม	133	138	145	151	153	155
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		4.08	3.8	3.2	2.9	2.6	3.4
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		130	135	140	145	150	
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	71	78	83.7	91	96	
	ระบบเดิม	161	166	168	171	173	

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส

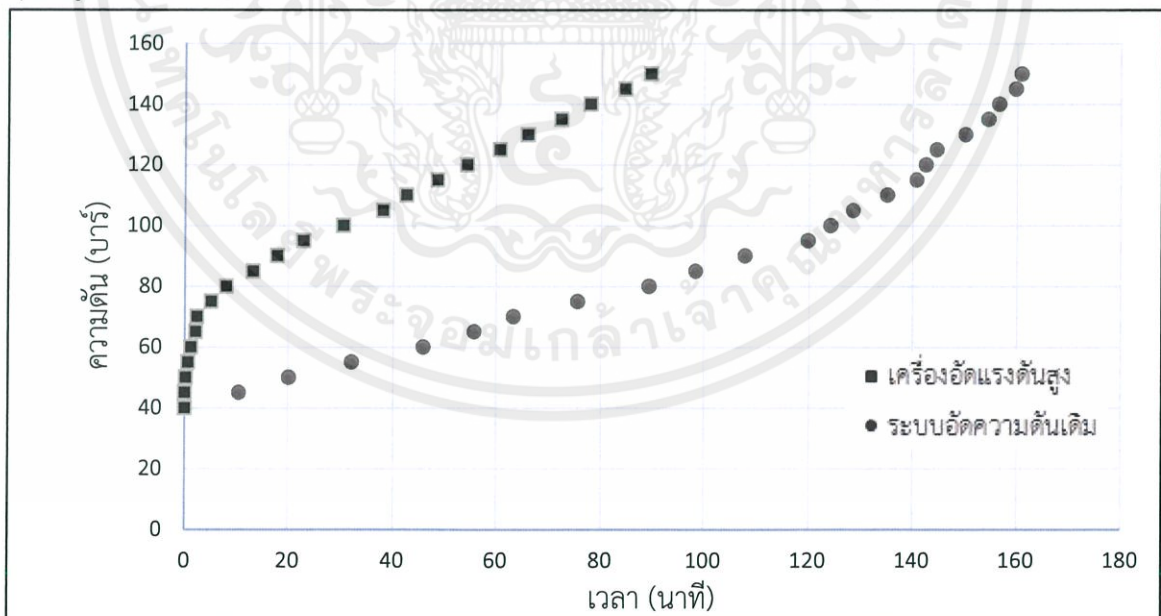
4.1.3 ที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.3 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 40 ถึง 80 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ความดัน 80 ถึง 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ 40 ถึง 120 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มเร็วขึ้นจนถึงความดัน 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		40	45	50	55	60	65
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	0	0.05	0.18	0.68	1.24	2.13
	ระบบเดิม	0	10.6	20.2	32	46	55.8
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			212	112	47	37	26

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		70	75	80	85	90	95
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	2.37	5.15	8.13	13.3	18	23
	ระบบเดิม	63.3	75.6	89.4	98.5	108	119
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		26	14.5	11	7.4	6	5.2
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		100	105	110	115	120	125
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	30.4	38	42.5	48.6	54.3	60.7
	ระบบเดิม	124	128	135	140	142	144
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		4	3.3	3	2.9	2.6	2.4
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		130	135	140	145	150	
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	66	72.4	78	84	89	
	ระบบเดิม	150	154	156	159	161	
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		2.3	2.1	2	1.9	1.8	

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส



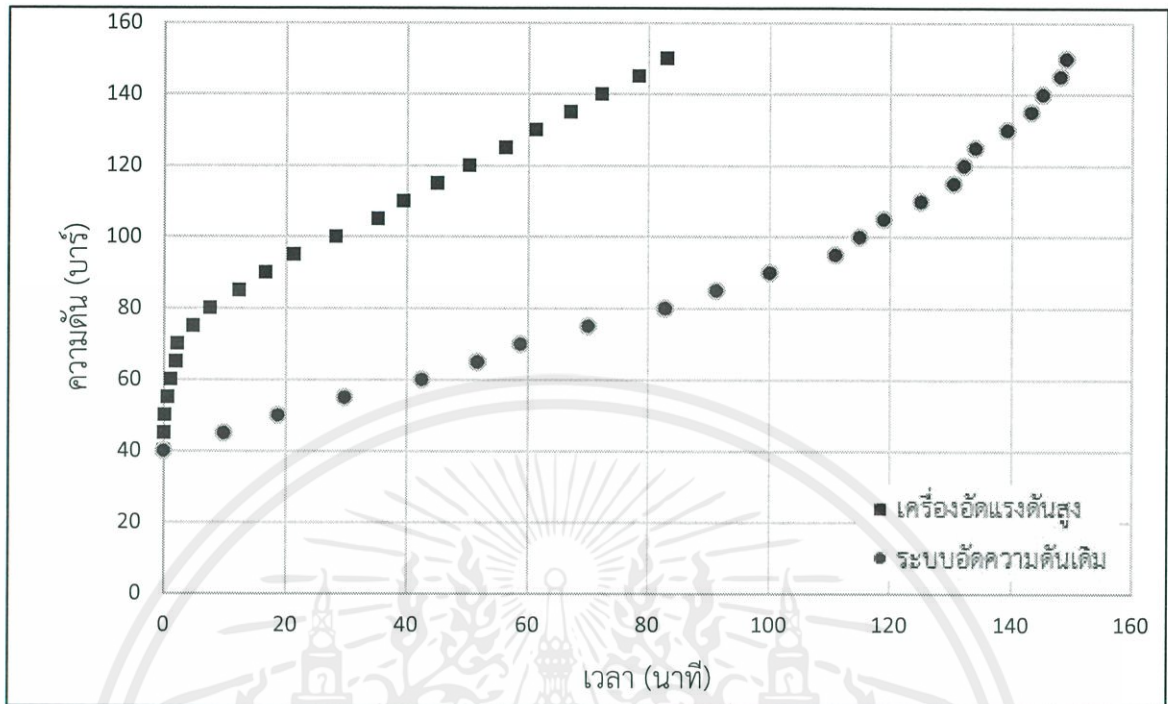
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส

4.1.4 ที่อุณหภูมิกองที่ 50 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.4 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 40 ถึง 80 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ความดัน 80 ถึง 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ 40 ถึง 120 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มเร็วขึ้นจนถึงความดัน 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		40	45	50	55	60	65
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	0	0.05	0.17	0.63	1.15	1.97
	ระบบเดิม	0	9.8	18.7	29.7	42.5	51.7
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			196	110	47	37	26.2
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		70	75	80	85	90	95
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	2.2	4.77	7.5	12.3	16.6	21.2
	ระบบเดิม	58.7	70	82.8	91.2	100	111
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		26.7	14.7	11	7.4	6	5.2
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		100	105	110	115	120	125
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	28.2	35.2	39.4	45	50.3	56.2
	ระบบเดิม	115	119	125.1	130	132	134
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		4	3.4	3.2	2.9	2.6	2.4
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		130	135	140	145	150	
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	61.2	67	72.2	78.4	83	
	ระบบเดิม	139	143.2	145.1	148	149	
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		2.3	2.1	2	1.9	1.8	

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส

4.2 ผลการทดลองอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์

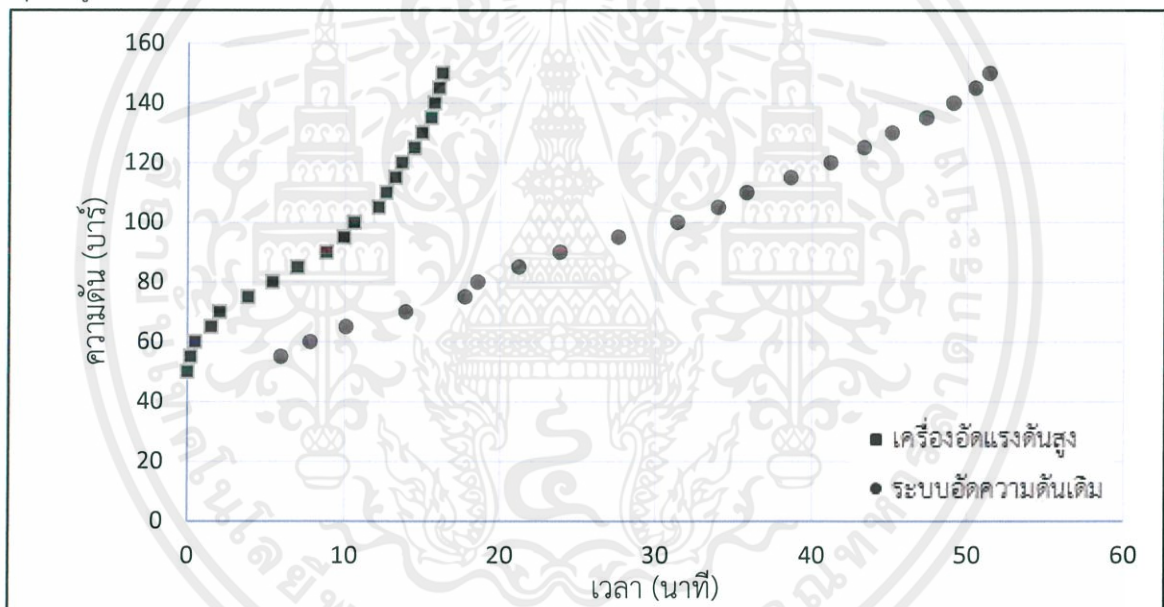
4.2.1 ที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.5 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 50 ถึง 70 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ 70 ถึง 100 บาร์ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงความดัน 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่จากความดันเริ่มต้นไปจนถึง 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		50	55	60	65	70	75	80
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	0	0.2	0.5	1.5	2	3.8	5.4
	ระบบเดิม	0	6	7.8	10	14	17.8	18.6
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			29.8	16.3	6.69	6.8	4.61	3.44

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		85	90	95	100	105	110	115
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	7	8.8	9.7	10.6	12.2	12.7	13.3
	ระบบเดิม	21	24	27.6	31.4	34	35.8	38.6
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3	2.7	2.8	3	2.8	2.8	2.9
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		120	125	130	135	140	145	150
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	13.7	14.5	15	15.6	15.8	16.1	16.3
	ระบบเดิม	41.2	43.4	45.2	47.4	49	50.5	51.4
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3	3	3	3	3.11	3.14	3.15

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส



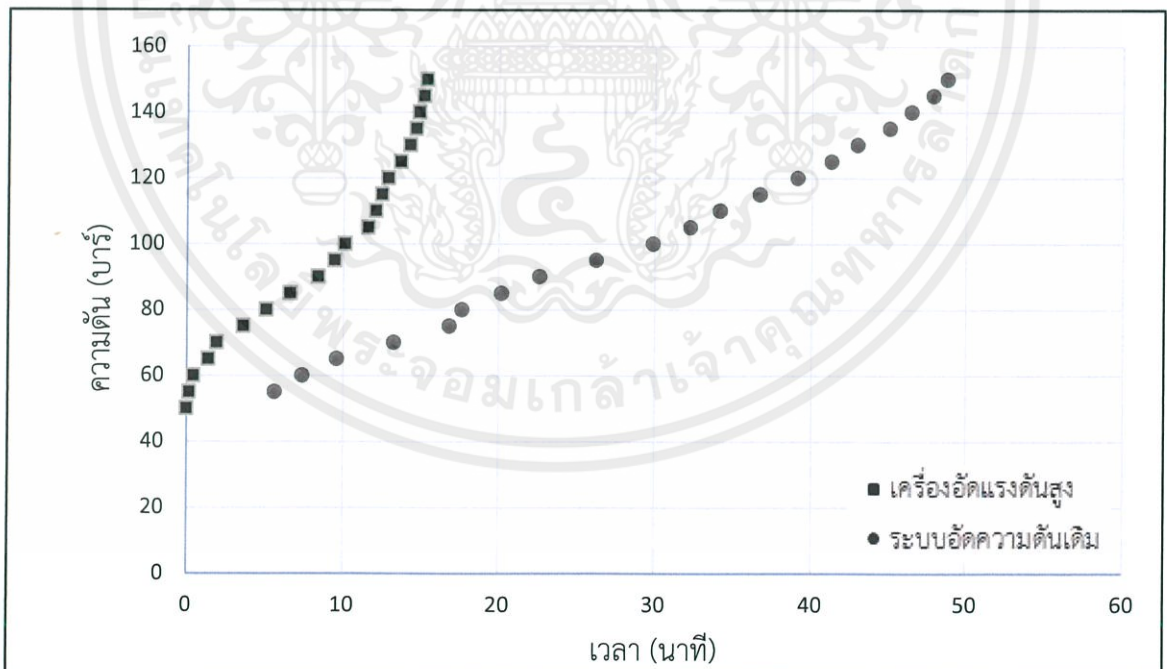
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส

4.2.2 ที่อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.6 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 50 ถึง 70 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ 70 ถึง 100 บาร์ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงความดัน 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่จากความดันเริ่มต้นไปจนถึง 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		50	55	60	65	70	75	80
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	0	0.18	0.5	1.4	1.95	3.7	5.13
	ระบบเดิม	0	5.67	7.41	9.61	13.3	16.9	17.7
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			31.5	16.3	6.7	6.8	4.6	3.45
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		85	90	95	100	105	110	115
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	6.6	8.4	9.4	10.1	11.6	12.1	12.5
	ระบบเดิม	20.2	22.6	26.2	30	32.3	34.2	36.7
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3.05	2.7	2.8	3	2.8	2.8	2.9
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		120	125	130	135	140	145	150
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	12.9	13.7	14.3	14.7	14.9	15.2	15.4
	ระบบเดิม	39.1	41.3	43	45.1	46.5	48	48.8
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3	3	3	3	3.1	3.1	3.2

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส



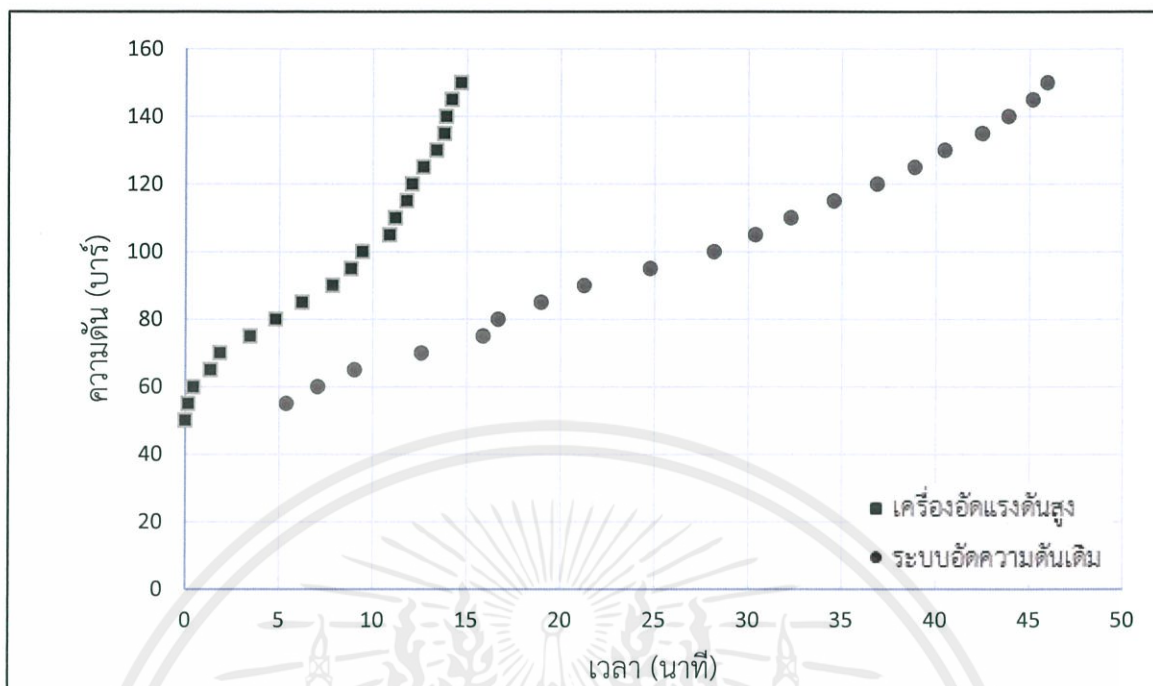
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส

4.2.3 ที่อุณหภูมิกองที่ 40 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.7 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 40 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 50 ถึง 70 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ 70 ถึง 100 บาร์ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงความดัน 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่จากความดันเริ่มต้นไปจนถึง 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		50	55	60	65	70	75	80
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	0	0.16	0.43	1.34	1.84	3.45	4.82
	ระบบเดิม	0	5.41	7.09	9.06	12.6	15.9	16.7
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			33.8	16.5	6.76	6.85	4.61	3.46
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		85	90	95	100	105	110	115
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	6.23	7.86	8.86	9.45	10.9	11.2	11.8
	ระบบเดิม	19	21.3	24.8	28.2	30.4	32.3	34.6
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3.05	2.7	2.8	3	2.8	2.88	2.93
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		120	125	130	135	140	145	150
เวลา (นาทีก)	ระบบใหม่	12.1	12.7	13.4	13.8	13.9	14.2	14.7
	ระบบเดิม	36.9	38.9	40.5	42.5	43.9	45.2	46
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3	3.06	3.02	3.08	3.16	3.18	3.13

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส

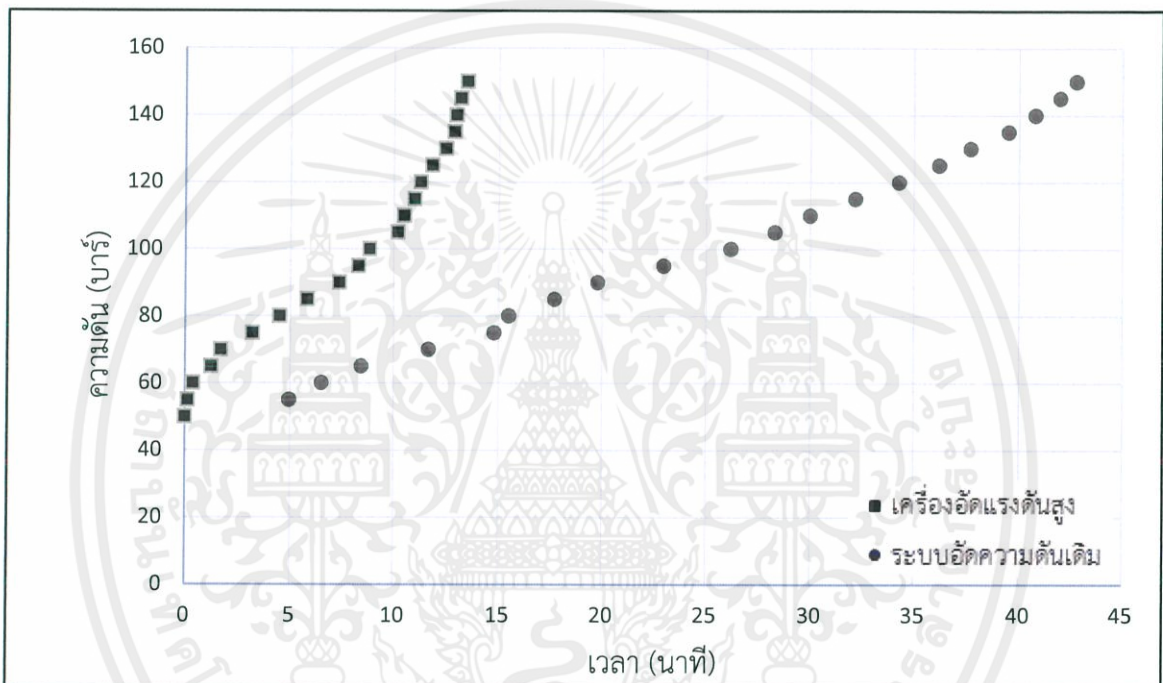
4.2.4 ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.8 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 50 ถึง 70 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ 70 ถึง 100 บาร์ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงความดัน 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่จากความดันเริ่มต้นไปจนถึง 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		50	55	60	65	70	75	80
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	0	0.15	0.4	1.25	1.7	3.2	4.5
	ระบบเดิม	0	5	6.5	8.4	11.7	14.8	15.5
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			33.1	16.3	6.7	6.8	4.6	3.4
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		85	90	95	100	105	110	115
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	5.8	7.35	8.3	8.83	10.2	10.5	11
	ระบบเดิม	17.7	19.8	23	26.2	28.3	30	32.2
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3	2.7	2.8	3	2.8	2.8	2.9

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		120	125	130	135	140	145	150
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	11.3	11.8	12.5	12.9	13	13.2	13.2
	ระบบเดิม	34.3	36.2	37.7	39.5	41	42	42.8
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3	3	3	3	3.14	3.18	3.2

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส

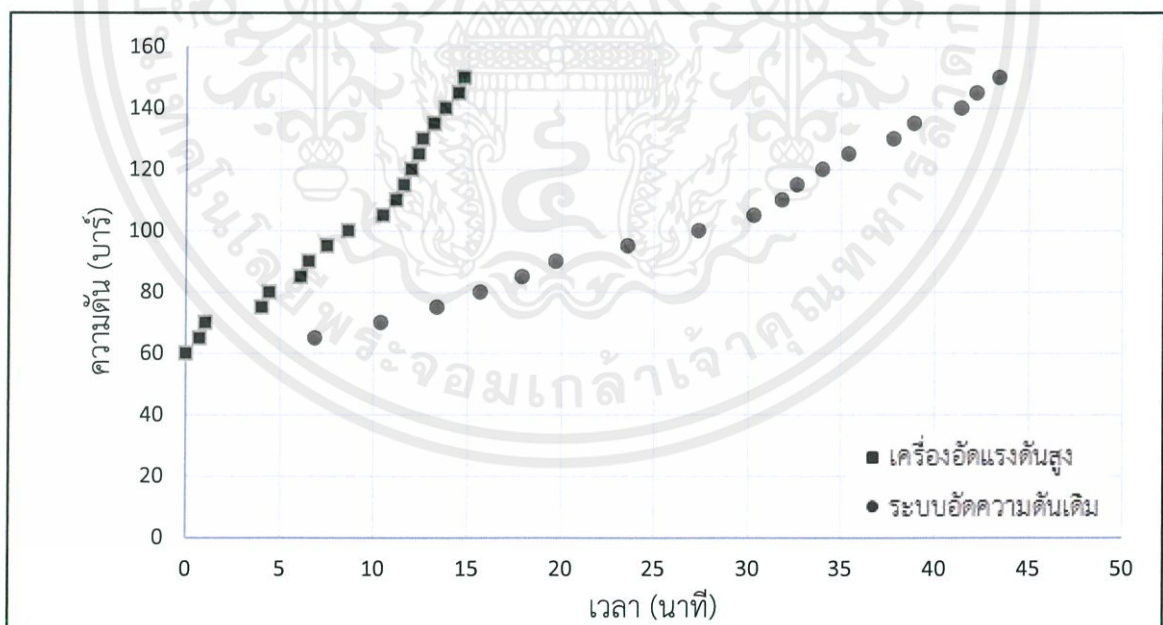
4.3 ผลการทดลองอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์

4.3.1 ที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.9 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 60 ถึง 70 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ 70 ถึง 100 บาร์ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงความดัน 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ 60 ถึง 100 บาร์ และความดันจะเพิ่มเร็วขึ้นอย่างคงที่ไปจนถึง 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		60	65	70	75	80	85	90
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	0	0.72	1.02	4	4.4	6.07	6.5
	ระบบเดิม	0	6.84	10.4	13.4	15.7	17.9	19.7
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			9.5	10.2	3.35	3.57	2.95	3.03
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		95	100	105	110	115	120	125
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	7.48	8.6	10.5	11.2	11.6	12	12.4
	ระบบเดิม	23.6	27.4	30.3	31.8	32.6	34	35.4
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3.16	3.19	2.89	2.84	2.81	2.83	2.86
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		130	135	140	145	150		
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	12.6	13.2	13.8	14.5	14.8		
	ระบบเดิม	37.8	38.9	41.4	42.2	43.4		
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3	2.95	3	2.91	2.93		

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส



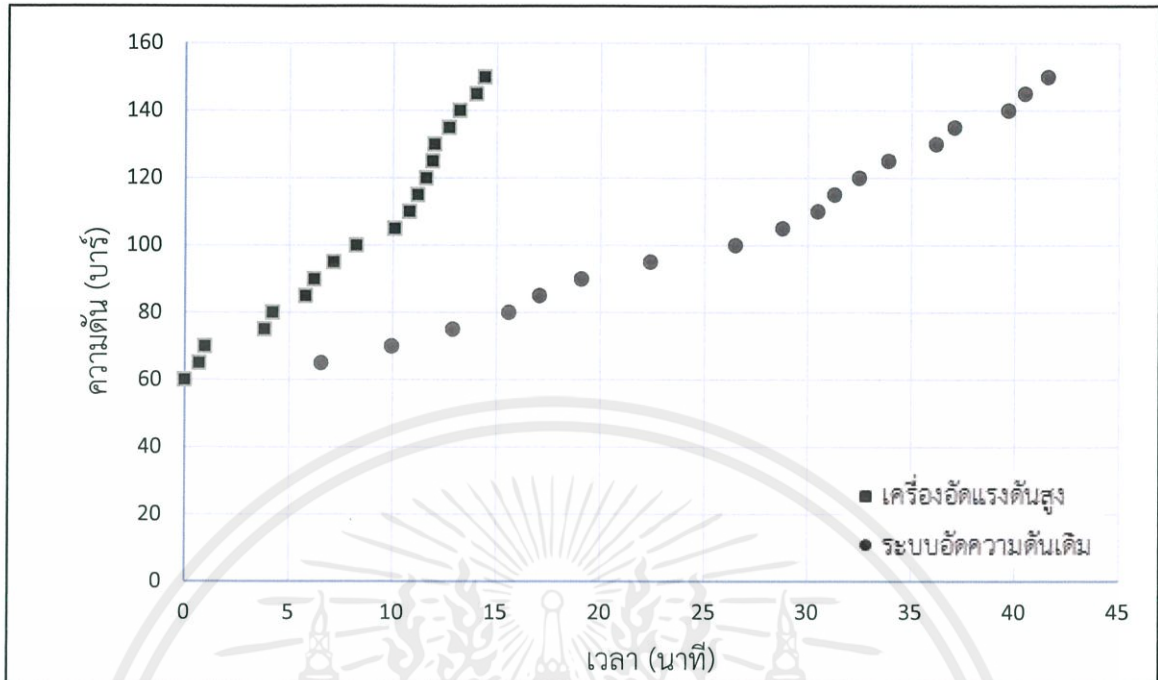
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส

4.3.2 ที่อุณหภูมิกองที่ 30 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.10 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 30 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 60 ถึง 70 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ 70 ถึง 100 บาร์ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงความดัน 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ 60 ถึง 100 บาร์ และความดันจะเพิ่มเร็วขึ้นอย่างคงที่ไปจนถึง 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		60	65	70	75	80	85	90
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	0	0.7	1	3.83	4.2	5.8	6.23
	ระบบเดิม	0	6.58	9.97	12.9	15.6	17.1	19.1
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			9.5	10.2	3.4	3.7	2.9	3
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		95	100	105	110	115	120	125
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	7.16	8.25	10.1	10.8	11.2	11.6	11.9
	ระบบเดิม	22.4	26.5	28.8	30.5	31.3	32.5	33.9
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3.1	3.2	2.85	2.8	2.8	2.8	2.85
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		130	135	140	145	150		
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	12	12.7	13.2	14	14.4		
	ระบบเดิม	36.2	37.1	39.7	40.5	41.6		
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3	2.9	3	2.9	2.9		

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิกองที่ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส

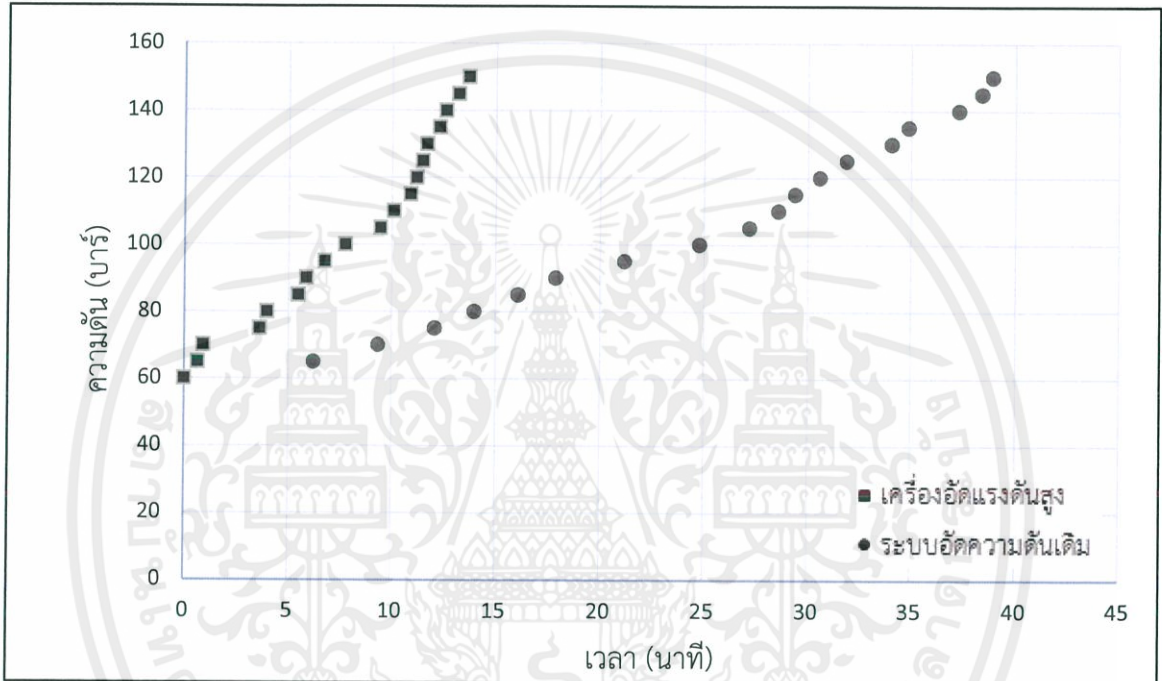
4.3.3 ที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.11 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 60 ถึง 70 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ 70 ถึง 100 บาร์ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงความดัน 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ 60 ถึง 100 บาร์ และความดันจะเพิ่มเร็วขึ้นอย่างคงที่ไปจนถึง 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		60	65	70	75	80	85	90
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	0	0.65	0.92	3.6	3.9	5.45	5.8
	ระบบเดิม	0	6.2	9.4	12.1	14	16.1	18
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			9.5	10.2	3.4	3.5	3	3.1
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		95	100	105	110	115	120	125
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	6.7	7.7	9.45	10.1	10.9	11.2	11.5
	ระบบเดิม	21.2	24.8	27.2	28.6	29.4	30.6	32
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3	2.7	2.8	3	2.8	2.8	2.9

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)					
		130	135	140	145	150	
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	11.7	12.3	12.6	13.2	13.7	
	ระบบเดิม	34.1	34.9	37.3	38.4	38.9	
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		2.91	2.84	3	2.91	2.84	

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส



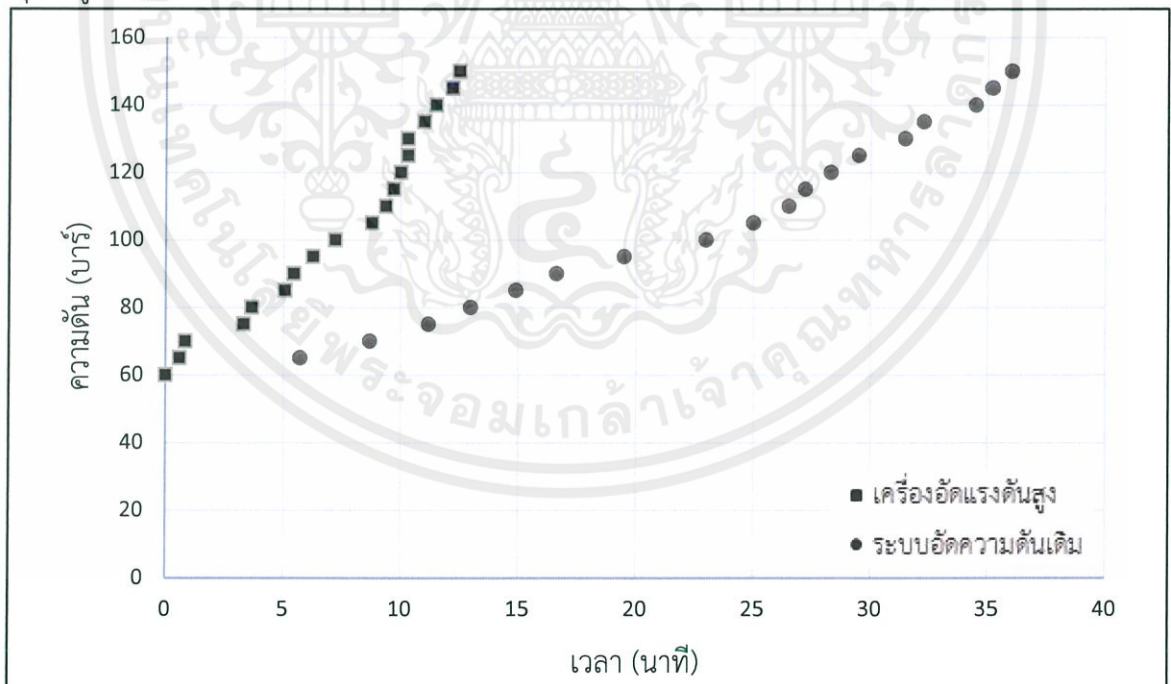
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส

4.3.4 ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส

จากตารางและรูปที่ 4.12 แสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเครื่องอัดแรงดันในระบบใหม่ ความดันในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 60 ถึง 70 บาร์ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นช้าลงที่ 70 ถึง 100 บาร์ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงความดัน 150 บาร์ ส่วนเครื่องอัดแรงดันในระบบเดิมนั้น ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ 60 ถึง 100 บาร์ และความดันจะเพิ่มเร็วขึ้นอย่างคงที่ไปจนถึง 150 บาร์

ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		60	65	70	75	80	85	90
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	0	0.6	0.85	3.33	3.67	5.05	5.42
	ระบบเดิม	0	5.7	8.67	11.2	13	14.9	16.6
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง			9.5	10.2	3.36	3.54	2.95	3.06
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		95	100	105	110	115	120	125
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	6.23	7.17	8.75	9.35	9.7	10	10.3
	ระบบเดิม	19.5	23	25	26.5	27.2	28.3	29.5
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3.13	3.2	2.86	2.83	2.8	2.83	2.86
ความดัน / เวลา		ความดัน (บาร์)						
		130	135	140	145	150		
เวลา (นาที)	ระบบใหม่	10.3	11	11.5	12.2	12.5		
	ระบบเดิม	31.5	32.3	34.5	35.2	36		
อัตราส่วนเวลาที่ลดลง		3.06	2.94	3	2.89	2.88		

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลของความดันที่มีต่อเวลาในการอัดความดัน ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองอัดความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องอัดแรงดันสูงโดยการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้ความดันสูงสุดที่ 150 บาร์ โดยความดันเริ่มต้นในการอัดอยู่ที่ 40, 50 และ 60 บาร์ และอุณหภูมิคงที่ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

ที่ความดันเริ่มต้น 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส เครื่องอัดแรงดันสูงใช้ระยะเวลาในการอัดทั้งหมด 100 นาที, 96 นาที, 89 นาที และ 83 นาที ตามลำดับ โดยเครื่องอัดแรงดันสูงในระบบเก่าใช้ระยะเวลาในการอัดทั้งหมด 181 นาที, 173 นาที, 161 นาที และ 149 นาที ตามลำดับ ดังนั้นการใช้เครื่องอัดแรงดันสูงในระบบใหม่เร็วกว่าเครื่องอัดแรงดันสูงในระบบเก่า 1.81, 1.8, 1.81 และ 1.79 เท่า ตามลำดับ

ที่ความดันเริ่มต้น 50 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส เครื่องอัดแรงดันสูงใช้ระยะเวลาในการอัดทั้งหมด 16 นาที 20 วินาที, 15 นาที 25 วินาที, 14 นาที 42 วินาที และ 13 นาที 13 วินาที ตามลำดับ โดยเครื่องอัดแรงดันสูงในระบบเก่าใช้ระยะเวลาในการอัดทั้งหมด 51 นาที 24 วินาที, 48 นาที 49 วินาที, 46 นาที และ 42 นาที 48 วินาที ตามลำดับ ดังนั้นการใช้เครื่องอัดแรงดันสูงในระบบใหม่เร็วกว่าเครื่องอัดแรงดันสูงในระบบเก่า 3.15, 3.17, 3.13 และ 3.24 เท่า ตามลำดับ

ที่ความดันเริ่มต้น 60 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส เครื่องอัดแรงดันสูงใช้ระยะเวลาในการอัดทั้งหมด 14 นาที 48 วินาที, 14 นาที 22 วินาที, 13 นาที 40 วินาที และ 12 นาที 32 วินาที ตามลำดับ โดยเครื่องอัดแรงดันสูงในระบบเก่าใช้ระยะเวลาในการอัดทั้งหมด 43 นาที 26 วินาที, 41 นาที 35 วินาที, 38 นาที 55 วินาที และ 36 นาที ตามลำดับ ดังนั้นการใช้เครื่องอัดแรงดันสูงในระบบใหม่เร็วกว่าเครื่องอัดแรงดันสูงในระบบเก่า 2.93, 2.89, 2.84 และ 2.88 เท่า ตามลำดับ

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

5.2.1 การใช้เครื่องอัดแรงดันสูงยังจำเป็นต้องมีคนควบคุมขณะเครื่องทำงาน เพราะความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อาจทำให้เครื่องเสียหายได้เมื่อความดันเกินค่าที่คำนวณ

5.2.2 การอัดความดันโดยเครื่องอัดแรงดันสูง กระบอกสูบและวาล์วจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความดัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรติดตั้งระบบควบคุมความดันเพื่อให้เครื่องหยุดทำงานเมื่อความดันถึงค่าที่ต้องการ

5.3.2 ควรมีการควบคุมอัตราการไหลอย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น

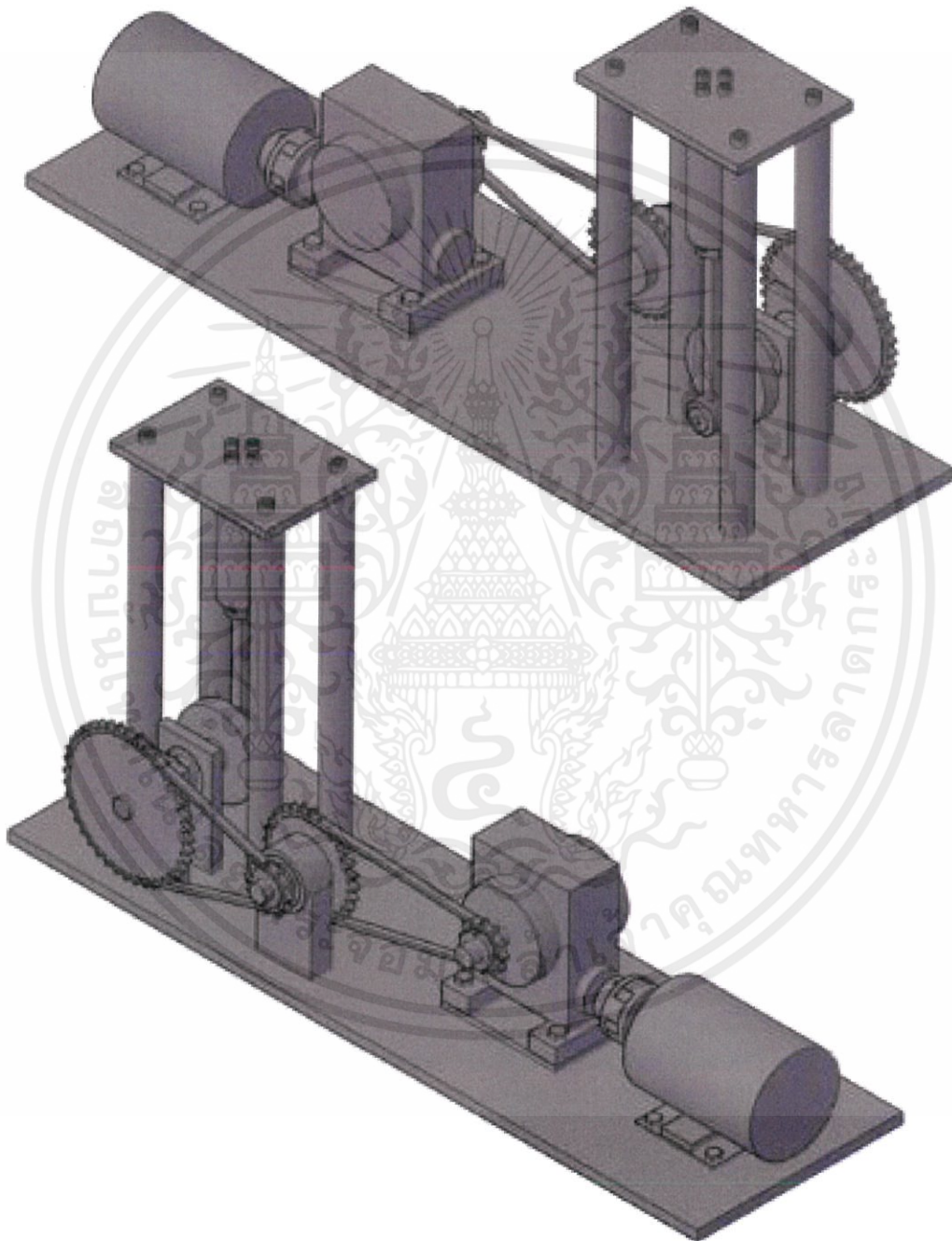
บรรณานุกรม

- [1] วรฉัตร ดวงสุวรรณ, วิฤทธิ์ คุปตสันติ, อธิศ อิศรางกูร ณ อยุธยา พ.ศ.2553:
 ปรินญาณิพนธ์ การออกแบบเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.
- [2] วชิรกริช อินทร์हांหว่า, ศุภชัย เมตตาทพล, สกล กฤตงานราภรณ์ พ.ศ.2556:
 ปรินญาณิพนธ์ การสกัดน้ำมันหอมระเหยแบบสองขั้นตอนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดสำหรับเปลือกส้มสายน้ำผึ้ง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.
- [3] นเรชัช ธรรมลังกา, นัฐพร สนวนยะเสรี, ยรรยงค์ ยิ้มแย้ม พ.ศ.2557:
 ปรินญาณิพนธ์ การออกแบบและสร้างหม้อความดันสำหรับดักจับน้ำมันผิวมะกรูดที่ถูกสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.
- [4] คีต สร้อยทอง, ธนพล สุกใส, ปิยะพงษ์ พงษ์ภัทระวิทย์ พ.ศ.2559:
 ปรินญาณิพนธ์ การออกแบบและสร้างเครื่องสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดแบบวงจรปิด. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.
- [5] รังสินันท์ ณ รังษี, ศรัณย์ โคตรมะณี, อัครวินท์ บุญเลื่อนส่ง พ.ศ.2559:
 ปรินญาณิพนธ์ การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แยกน้ำมันผิวมะกรูดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง: คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.
- [6] Richard G. Budynas, J.Keith Nisbett. *Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition*. United states of America, McGraw-Hill Education, 2006.
- [7] B.Lalbai & Co. *Stainless Pipes & Tubes*. [Online]. Available: <http://blalbai.com/pipes-tubes/stainless-steel-erw-seamless-pipes/>. 2017.
- [8] ดารณี เจริญสุข : ยางโอริง. ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย.
- [9] Palawatr. *Roller Chain Selection*. [Online]. Available: <http://www.palawatr.co.th/uploads/product/file/20150910/cat-akvxy146-2.pdf>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.



รูปที่ ก.1 ภาพแสดงลักษณะของเครื่องอัดแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 ภาพแสดงลักษณะของกระบอกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

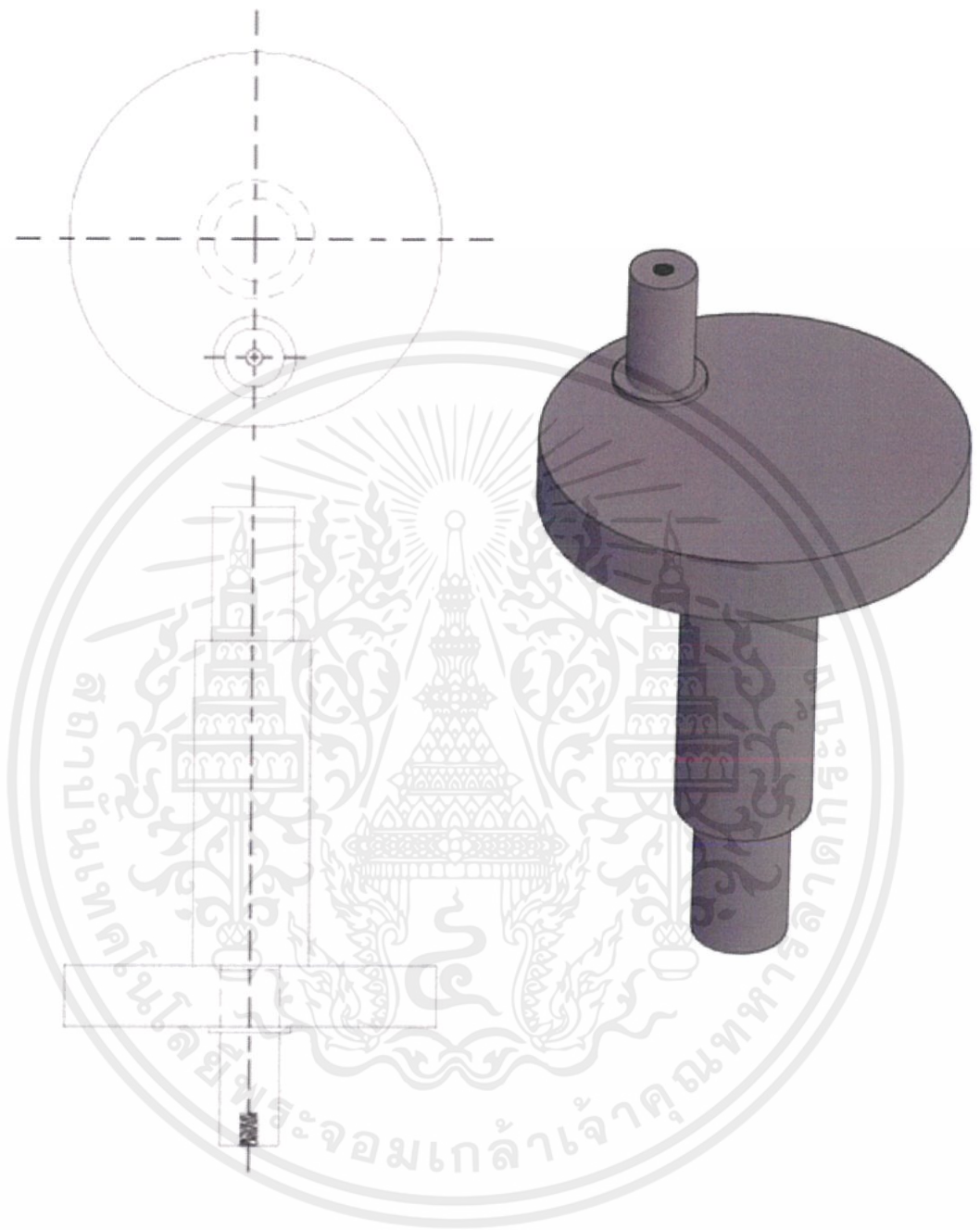


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



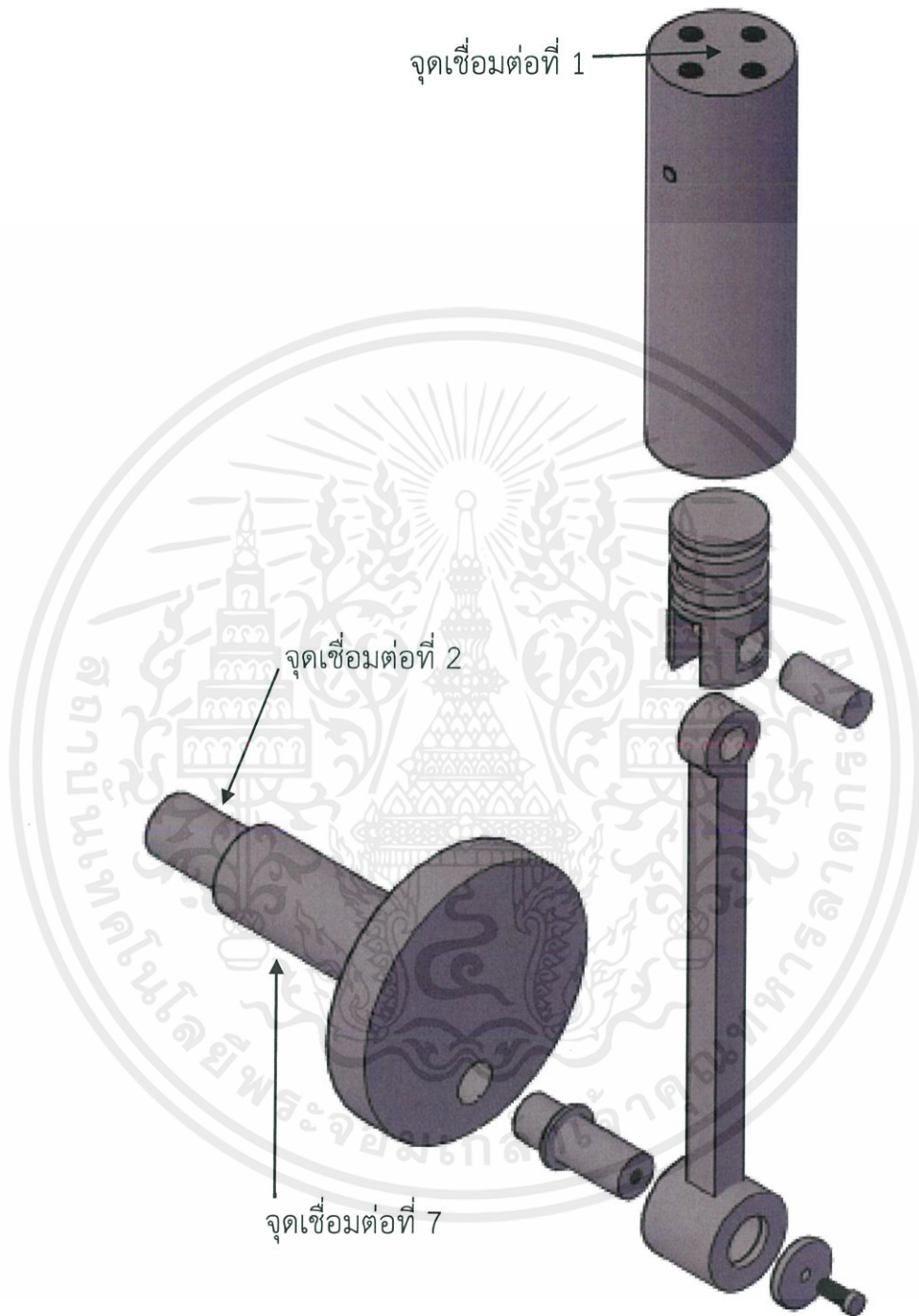
รูปที่ ก.4 ภาพแสดงลักษณะของก้านสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



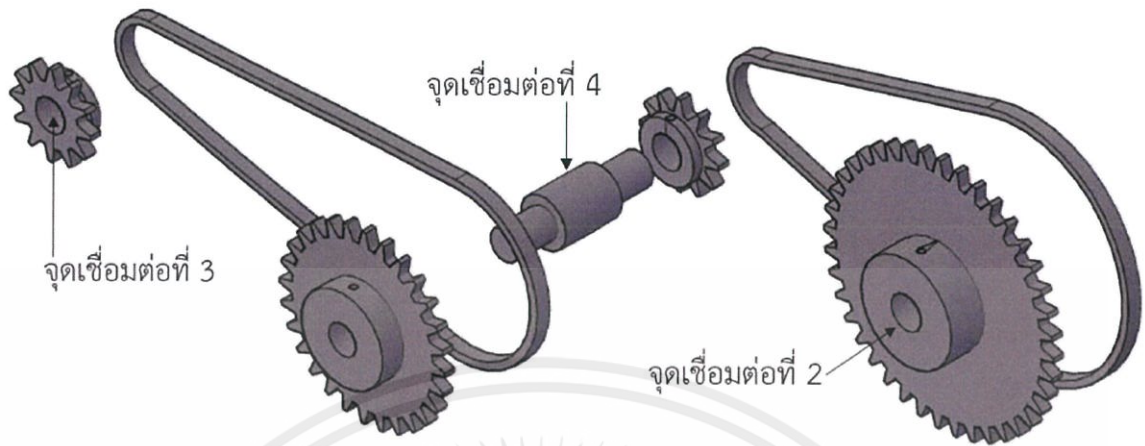
รูปที่ ก.5 ภาพแสดงลักษณะของเพลาข้อเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

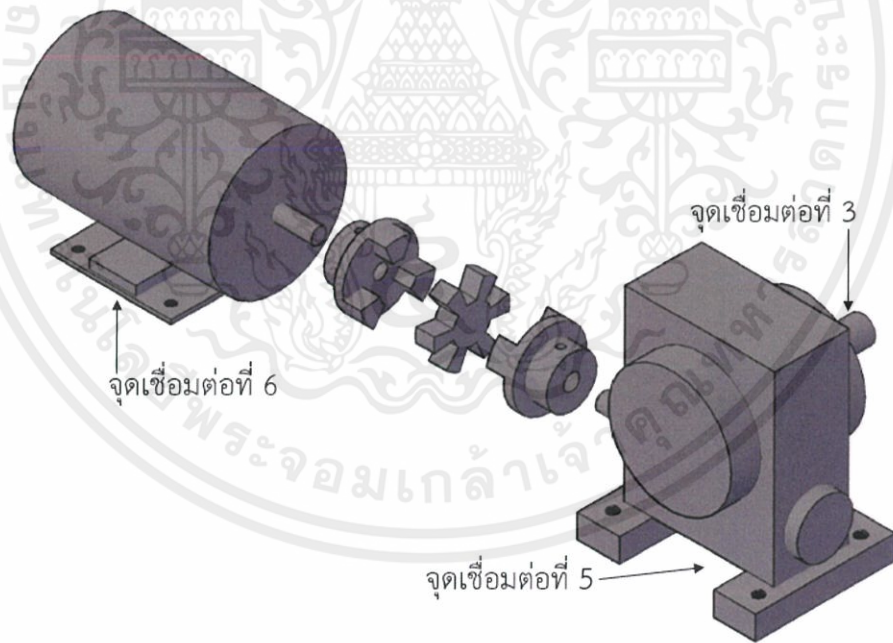


รูปที่ ก.6 ภาพแสดงการถอดประกอบของชิ้นส่วน (ก)

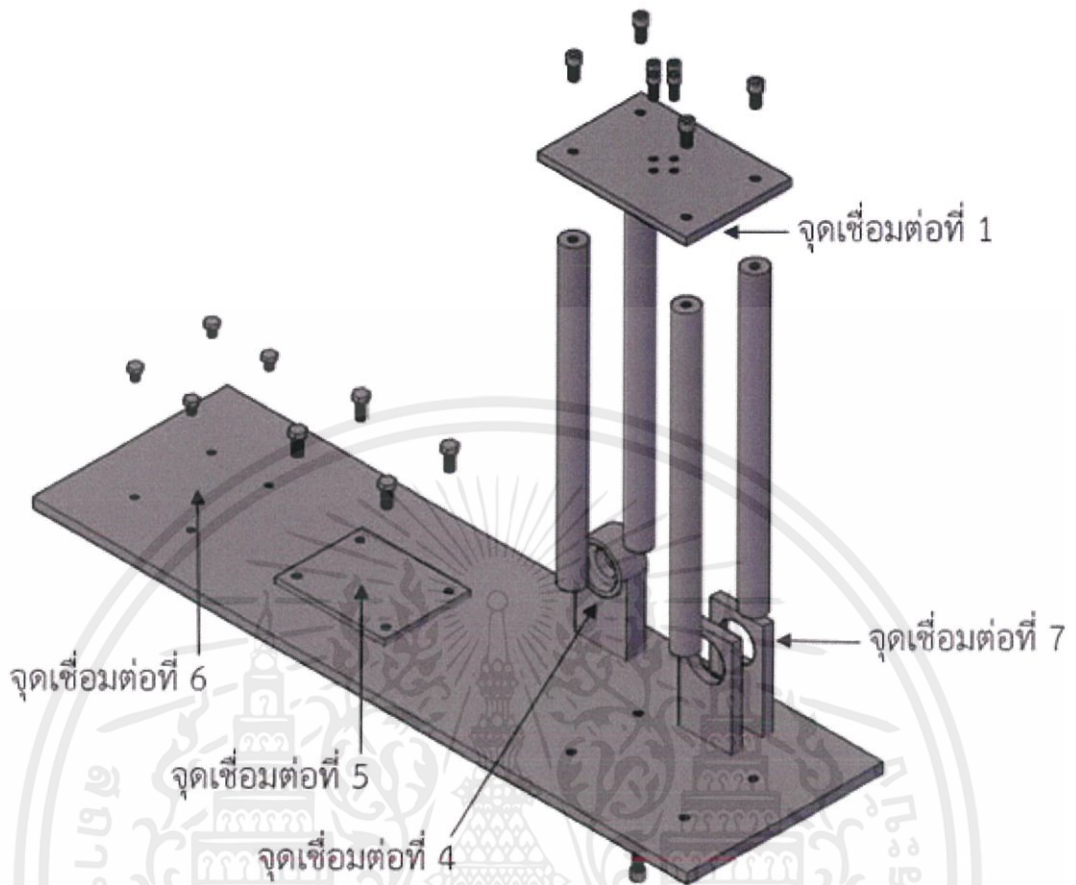
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 ภาพแสดงการถอดประกอบของชิ้นส่วน (ข)



รูปที่ ก.8 ภาพแสดงการถอดประกอบของชิ้นส่วน (ค)



รูปที่ ก.9 ภาพแสดงการถอดประกอบของชิ้นส่วน (ง)

ภาคผนวก ข.

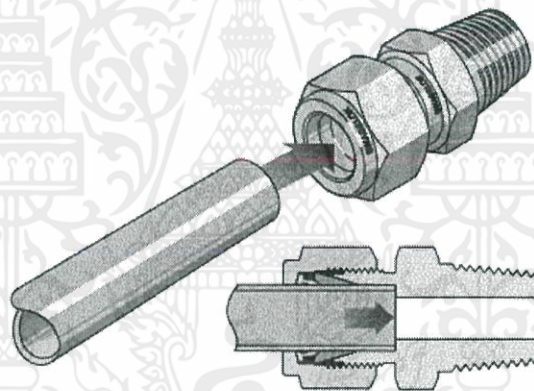
คู่มือการต่อวาล์ว ท่อ และการตัดท่อ

Swagelok Tube Fittings

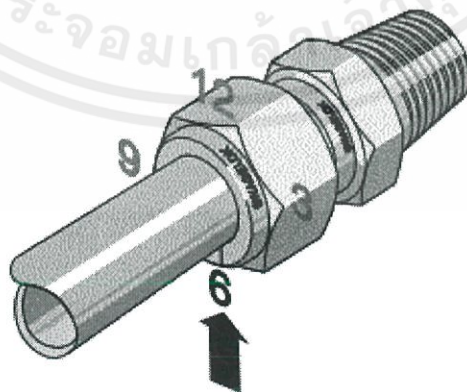
Up to 1 in.

These instructions apply both to traditional fittings and to fittings with the advanced back-ferrule geometry.

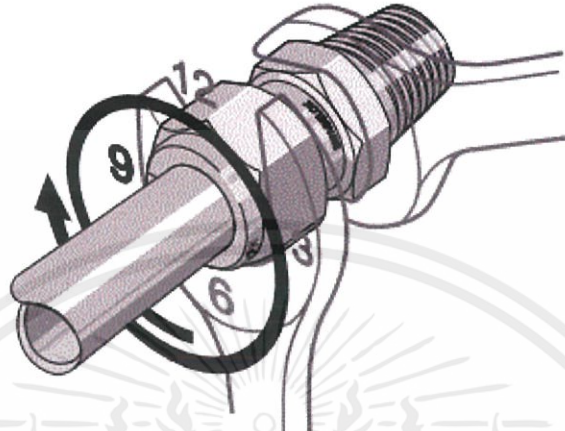
Fully insert the tube into the fitting and against the shoulder; rotate the nut finger-tight. High-pressure applications and high safety-factor systems: Further tighten the nut until the tube will not turn by hand or move axially in the fitting.



Mark the nut at the 6 o'clock position.

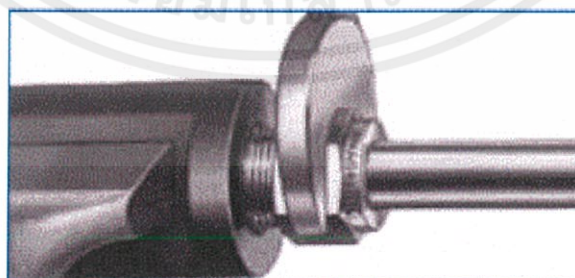


While holding the fitting body steady, tighten the nut one and one-quarter turns to the 9 o'clock position. For 1/16, 1/8, and 3/16 in.; 2, 3, and 4 mm tube fittings, tighten the nut three-quarters turn to the 3 o'clock position.



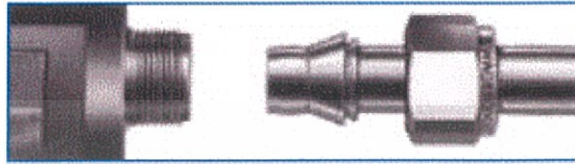
Preswaging Tool

1. Install the Swagelok nut and ferrules onto the preswaging tool.
2. Insert the tube into the preswaging tool.
3. Make sure that the tube rests firmly on the shoulder of the preswaging tool body and that the nut is finger-tight.
4. Mark the nut at the 6 o'clock position.
5. While holding the preswaging tool steady, tighten the nut one and one-quarter turns to the 9 o'clock position. For 1/16, 1/8 and 3/16 in. 2, 3, and 4 mm tube fittings, tighten the nut only three-quarters turn to the 3 o'clock position.



6. Loosen the nut.

7. Remove the tube with preswaged ferrules from the preswaging tool. If the tube sticks in the preswaging tool, remove the tube by gently rocking it back and forth. Do not turn the tube.



8. Insert the tube with preswaged ferrules into the fitting body until the front ferrule seats against the fitting body.

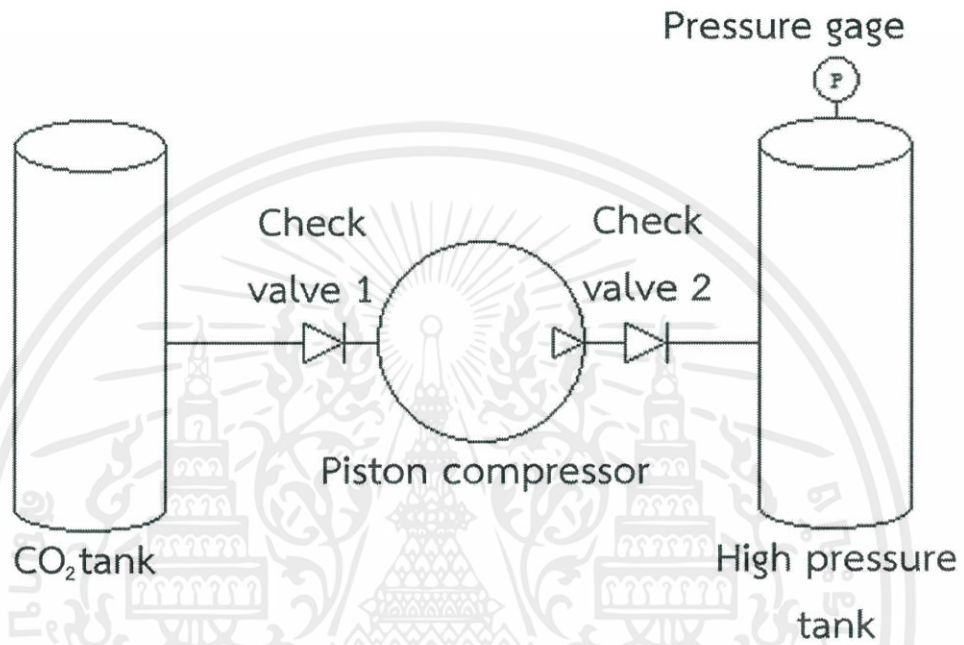
9. While holding the fitting body steady, rotate the nut with a wrench to the previously pulled-up position; at this point, you will feel a significant increase in resistance.

10. Tighten the nut slightly.



ภาคผนวก ค.

ชุดอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ ค.1 แผนผังแสดงชุดอุปกรณ์ในการทดลอง

ภาคผนวก ง.

สถานที่ติดต่อ และจัดซื้ออุปกรณ์

1. บริษัท วายทีพี เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ เมดิคอล ซัพพลาย จำกัด
 จำหน่ายท่อ วาล์ว ท่อ และฟิตติ้งสแตนเลส
 ที่อยู่: 44/314 ซอยเฉลิมพระเกียรติ ร.๙ 87 แขวงประเวศ กรุงเทพมหานคร 10250
 โทรศัพท์: 02-136-1725
2. บริษัท นานาสตีล จำกัด
 จำหน่ายชิ้นส่วนเพลสแตนเลสและเหล็ก
 ที่อยู่: 4/1 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทรศัพท์: 0-2737-2717-9
3. ร้านชัยถาวรรุ่งเรือง
 จำหน่ายซิลยาง พูเลย์ และก๊าศคาร์บอนไดออกไซด์
 ที่อยู่: 6/35 หมู่ 10 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทรศัพท์: 0-2360-5741
4. ห้างหุ้นส่วนจำกัด บี.ไอ.จี.เอ็นจิเนียริ่ง
 ผลิตชิ้นงานสแตนเลส
 ที่อยู่: 332/36 หมู่ 10 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทรศัพท์: 08-7936-3509
5. ห้างหุ้นส่วนจำกัด สห เจนเนอรอล แอนด์ ซัพพลาย
 จำหน่ายอะไหล่อุตสาหกรรม ยาง-พลาสติก แบร์ริง ลูกปืน
 ที่อยู่: 330 หมู่ 10 ถนนเจ้าคุณทหาร แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
 โทรศัพท์: 02-737-2266
6. บริษัท ย่งฮง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
 จำหน่ายมอเตอร์ไฟฟ้า
 ที่อยู่: 255/1 ถนนเจริญกรุง แขวงบ้านบาตร เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย กรุงเทพมหานคร 10100
 โทรศัพท์: 0-2221-3440