

# การออกแบบและวิเคราะห์เครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ

## DESIGN AND ANALYSIS OF FREE PISTON STIRLING COOLER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2563  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การออกแบบและวิเคราะห์เครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ

DESIGN AND ANALYSIS OF FREE PISTON STIRLING COOLER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

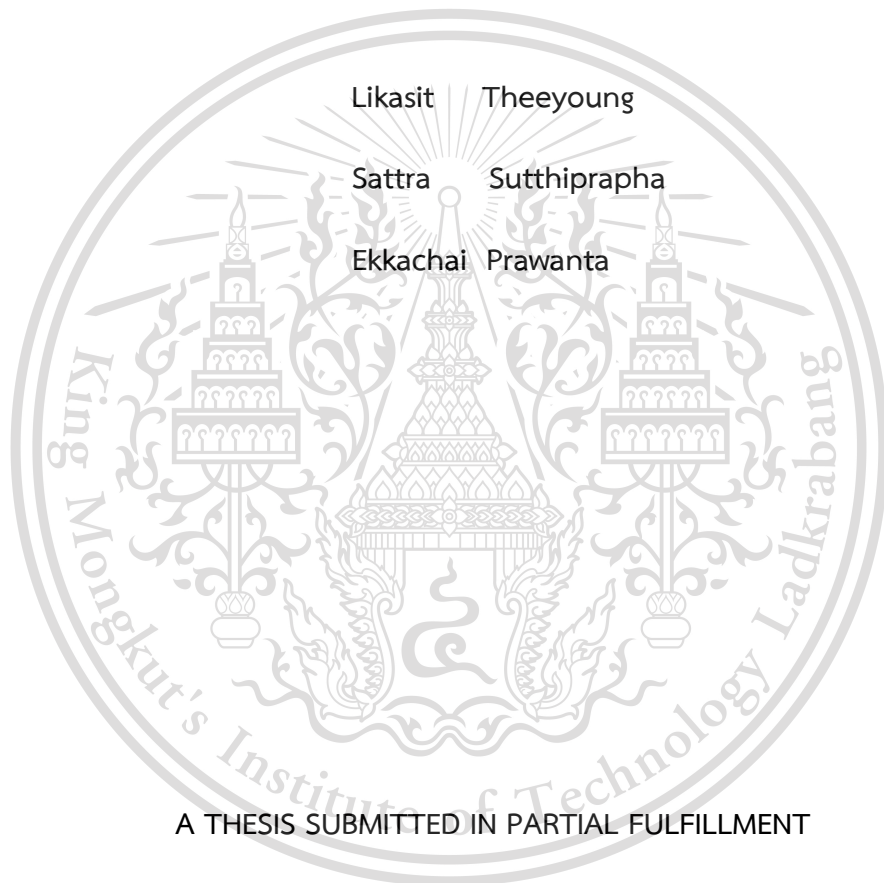
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **ปีการศึกษา 2563** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# DESIGN AND ANALYSIS OF FREE PISTON STIRLING COOLER



Likasit Theeyoung

Sattra Sutthiprapha

Ekkachai Prawanta

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึ2020เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและวิเคราะห์เครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ  
DESIGN AND ANALYSIS OF FREE PISTON STIRLING COOLER

ผู้จัดทำ

- |                |            |          |
|----------------|------------|----------|
| 1. นายลิขสิทธิ | ถียัง      | 60010880 |
| 2. นายศรัตรา   | สุทธิประภา | 60010957 |
| 3. นายเอกชัย   | ประวันตา   | 60011200 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## การออกแบบและวิเคราะห์เครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ

นายลิขสิทธิ์	ถิยัง	60010880
นายศรัตรา	สุทธิประภา	60010957
นายเอกชัย	ประวันตา	60011200
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2563		

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และออกแบบเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ โดยใช้อากาศเป็นสารทำงาน ขั้นตอนการปฏิบัติงานแบ่งเป็นสามขั้นตอนดังนี้ การคำนวณค่าคงที่ของสปริงโดยใช้ความรู้เรื่องการสั่นสะเทือนแบบบังคับระดับความเสรีสองชั้นในระบบที่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือนจากวิชาการสั่นสะเทือนเชิงกล เพื่อให้ทราบความถี่รอบต่ออนาที จากนั้นวิเคราะห์วัฏจักรการทำงานของเครื่องทำความเย็นโดยอ้างอิงสมมติฐานของชมิตต์ (Schmidt-Assumptions) โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Analysis) ด้วยโปรแกรม MATLAB ในการคำนวณเพื่อให้ทราบงานและพลังงานในกระบวนการทำความเย็น ผลของการคำนวณจากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นนำไปสู่การออกแบบส่วนประกอบของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง โดยใช้โปรแกรม Solid Work หลังจากนั้นนำแบบและคุณสมบัติต่าง ๆ มาใช้ในการจำลองระบบของเครื่องทำความเย็น โดยใช้โปรแกรม Ansys เพื่อวิเคราะห์การทำงานของสารทำงานในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## DESIGN AND ANALYSIS OF FREE PISTON STIRLING COOLER

Likasit                      Theeyoung                      60010880

Sattra                      Sutthiprapha                      60010957

Ekkachai                      Prawanta                      60011200

Asst.Prof.Dr.Sutapat      Kwankaomeng                      Advisor

Year 2020

### ABSTRACT

This thesis aims to analyze and design free piston Stirling cooler, air is used for working gas. The operating process is divided into three processes. Calculation of the spring constant using the principle of forced vibration with two degrees of freedom in damped system based on mechanical vibration. To get the frequency (revolutions per minute). Then analyze for Stirling cooler cycle calculation based on Schmidt-Assumptions by isothermal analysis using MATLAB to calculate the work and energy in the cooling process at constant temperature. The results of these calculations have led to the design of the Stirling cooler components using the Solid Work program. Finally, take all part to Ansys for velocity, temperature and pressure of working gas simulate analysis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ก็เพราะคำแนะนำในการช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง ที่คอยชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาและความรู้ให้แก่พวกข้าพเจ้า

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม-  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยให้ความรู้และคำแนะนำที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณพี่ปริญญเอกพีอุ้ม (พงษ์นรินทร์ สว่างวงศ์) ที่ให้ความช่วยเหลือให้ดำเนินงานได้อย่าง  
ราบรื่นและขอบคุณสมาชิกในห้องทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (GEER LAB) ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและ  
แลกเปลี่ยนความคิดเห็นในการทำงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ช่วยสนับสนุนให้กำลังใจและคำแนะนำทุก ๆ เรื่อง สุดท้าย  
นี้ขอมอบคุณงามความดีให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวถึงและไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ด้วย

ลิขสิทธิ์ ถียง  
ศรัตรา สุทธิประภา  
เอกชัย ประวันตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>III</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	1
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน.....	4
2.1 ประวัติความเป็นมาของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	4
2.1.1 การพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	5
2.2 การจัดรูปแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	5
2.2.1 ชนิดการออกแบบต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสองทาง.....	6
2.2.2 ชนิดและการออกแบบต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานทางเดียว.....	6
2.2.2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบกระบอกสูบเดี่ยวชนิดลูกสูบกับดิสเพลสเซอร์หรือแบบเบต้า.....	7
2.2.2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบกระบอกสูบสองชุดต่อหนึ่งวัฏจักรทำงานชนิดลูกสูบดิสเพลสเซอร์หรือแบบแกมมา.....	8
2.2.2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบทำงานทางเดียวชนิดลูกสูบหลายตัวหรือแบบ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **แอลฟา** เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use **IV** only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบอิสระ.....	10
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.3.1 กฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์.....	11
2.3.2 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์.....	11
2.3.3 เครื่องยนต์ความร้อน.....	11
2.3.4 เครื่องทำความเย็นและปั๊มความร้อน.....	11
2.3.5 ระบบ.....	12
2.3.6 วัฏจักร.....	13
2.3.7 วัฏจักรความร้อนในอุดมคติ.....	13
2.3.8 วัฏจักรสเตอร์ลิง.....	14
2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อใช้เป็นเครื่องทำความเย็น.....	17
2.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องยนต์และปั๊มความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	17
2.5 ข้อแตกต่างของวัฏจักรสเตอร์ลิงใช้งานจริงกับในอุดมคติ.....	18
2.6 หลักในการคำนวณและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	20
2.6.1 ประสิทธิภาพทางความร้อน.....	21
2.6.2 ตัวแปรสำคัญในการออกแบบ.....	21
2.7 ทฤษฎีการสั่นสะเทือน.....	24
2.8 แก๊สสปริง.....	27
2.9 ตัวหน่วงเนื่องจากแรงเสียดทาน.....	27
2.10 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	28
2.10.1 การนำความร้อน.....	28
2.10.2 การนำความร้อน.....	29
2.10.3 ความต้านทานการถ่ายเทความร้อน.....	29
2.10.4 การนำความร้อนผ่านผิวทรงกลม.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.9.6 การถ่ายเทความร้อนผ่านครีบนวนรอบทรงกระบอก.....	31
2.9.7 การถ่ายเทความร้อนผ่านท่อเมื่อฟลักซ์ความร้อนคงที่.....	32
2.9.8 การถ่ายเทความร้อนผ่านท่อเมื่ออุณหภูมิผิวท่อคงที่.....	32
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง.....	33
3.1 การออกแบบเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง.....	33
3.1.1 สมมติฐานสำหรับการคำนวณในการออกแบบ.....	33
3.1.2 การออกแบบฝาสูบ.....	34
3.1.3 ลูกสูบกำลัง.....	35
3.1.4 ลูกสูบดีสเพลสเซอร์.....	35
3.1.5 กระจบอกสูบ.....	36
3.1.6 ก้านลูกสูบดีสเพลสเซอร์.....	36
3.1.7 สปริงระนาบ.....	37
3.1.8 ครีประบายความร้อน.....	37
3.1.9 ตัวขับเคลื่อน.....	38
3.1.10 ส่วนโครงสร้าง.....	38
3.2 การวิเคราะห์ความถี่ของเครื่องยนต์.....	40
บทที่ 4 การวิเคราะห์เครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง.....	44
4.1 การวิเคราะห์วัฏจักรการเคลื่อนที่ของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง.....	44
4.2 การวิเคราะห์สารทำงานโดยวิธีสร้างแบบจำลองจากโปรแกรม Ansys.....	50
4.2.1 การวิเคราะห์ทิศทางการไหลและความเร็วของสารทำงาน.....	50
4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน.....	50
4.2.3 การวิเคราะห์ความดันภายในกระบอกสูบ.....	50
4.3 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนเครื่องยนต์.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	51
4.3.2 ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย.....	57
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>vii</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในทฤษฎีของซมิดท์.....	20
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของส่วนประกอบชิ้นส่วนเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง.....	33
ตารางที่ 4.1 ตารางค่าตัวแปรต่างๆของเครื่องยนต์.....	44
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมMATLAB.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนผังแสดงแผนการดำเนินงาน.....	2
2.1 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสองทาง.....	6
2.2 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 3 แบบพื้นฐาน.....	7
2.3 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า.....	8
2.4 กลไกเครื่องยนต์แบบรอมบิค.....	8
2.5 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา.....	9
2.6 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟา.....	10
2.7 กลไกเครื่องยนต์แบบลูกสูบอิสระ.....	10
2.8 การเปลี่ยนแปลงพลังงาน.....	12
2.9 วัฏจักรคาร์โน.....	13
2.10 วัฏจักรสเตอร์ลิง.....	15
2.11 P-V ไดอแกรมเมื่อเป็นเครื่องทำความเย็น.....	17
2.12 P-V ไดอแกรมของเครื่องยนต์และปั๊มความร้อน.....	17
2.13 วัฏจักรสเตอร์ลิงในทางปฏิบัติ.....	19
2.14 รูปแสดงระบบมวล-สปริง ของเครื่องยนต์.....	24
2.15 ระบบมวล สปริง และแดมป์.....	25
2.16 รูปแสดงค่าคงที่ของแก๊สสปริง.....	27
2.17 รูปแสดงแรงเสียดทาน.....	28
2.18 รูปแสดงการนำความร้อน.....	28
2.19 รูปแสดงการพาความร้อน.....	29
2.20 รูปแสดงความต้านทานการถ่ายเทความร้อน.....	29
2.21 รูปแสดงการนำความร้อนผ่านผิวทรงกลม.....	30
2.22 รูปแสดงการนำความร้อนผ่านผิวทรงกระบอก.....	30
2.23 รูปแสดงการนำความร้อนผ่านครีบนวนรอบทรงกระบอก.....	31

เอกสารนี้เป็น 2.24 รูปแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแก๊สในถังรับแรงดัน..... 34

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ฝาสูบ.....	34
3.2 ลูกสูบกำลัง.....	35
3.3 ลูกสูบดีสเพลสเซอร์.....	35
3.4 กระบอกสูบ.....	36
3.5 ก้านลูกสูบดีสเพลสเซอร์.....	36
3.6 สปริงระนาบ.....	37
3.7 ครีบริบายความร้อน.....	37
3.8 ตัวขับแรง.....	38
3.9 ส่วนรองรับกระบอกสูบ.....	38
3.10 ส่วนรองรับตัวขับแรง.....	39
3.11 ส่วนรองรับสปริงระนาบ.....	39
3.12 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง.....	39
3.13 รูปแสดงระบบของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง.....	40
3.14 แผนภาพอิสระของลูกสูบดีสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง.....	41
3.15 แผนผังการวิเคราะห์ความถี่ของเครื่องยนต์.....	43
4.1 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลังและลูกสูบดีสเพลสเซอร์.....	47
4.2 กราฟแสดงปริมาตรส่วนขยายและปริมาตรส่วนอัด.....	47
4.3 กราฟแสดงปริมาตรรวม.....	48
4.4 กราฟแสดงค่าความดัน.....	48
4.5 กราฟ P-V diagram.....	49
4.6 แบบจำลองทิศทางการไหลของสารทำงาน.....	50
4.7 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน.....	50
4.8 แบบจำลองความดันในกระบอกสูบ.....	51
4.9 รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นขึ้นส่วนฝาสูบภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์.....	52
4.10 รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นขึ้นส่วนฝาสูบภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.11	รูปแสดงผลการวิเคราะห์Displacementขึ้นส่วนฝาสูบภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์.....	53
4.12	รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นขึ้นส่วนฝาสูบภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์.....	53
4.13	รูปแสดงผลการวิเคราะห์Displacementขึ้นส่วนฝาสูบภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์.....	54
4.14	รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นขึ้นส่วนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์....	54
4.15	รูปแสดงผลการวิเคราะห์Displacementขึ้นส่วนลูกสูบดิสเพลสเซอร์ภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์.....	55
4.16	รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นขึ้นส่วนโครงสร้างภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์.....	55
4.17	รูปแสดงผลการวิเคราะห์Displacementขึ้นส่วนโครงสร้างภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์.....	56
4.18	รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นขึ้นส่วนโครงสร้างภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์.....	56
4.19	รูปแสดงผลการวิเคราะห์Displacementขึ้นส่วนโครงสร้างภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์.....	57
ก.1	ฝาสูบ .....	61
ก.2	ส่วนรองรับกระบอกสูบ .....	62
ก.3	ส่วนรองรับตัวขับเคลื่อน .....	63
ก.4	ส่วนรองรับสปริงระนาบ .....	64
ก.5	ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ .....	65
ก.6	ฐานลูกสูบดิสเพลสเซอร์ .....	66
ก.7	กระบอกสูบ .....	67
ก.8	ลูกสูบกำลัง .....	68
ก.9	การประกอบขึ้นส่วนของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง .....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>XI</sup> only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาการวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศเขตร้อน มีสภาพอากาศร้อนอบอ้าวเกือบทั้งปี และประกอบด้วยปัญหาสถานะโลกร้อนจึงทำให้ความต้องการระบบทำความเย็นมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการดำรงชีวิต ทั้งเครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น ตู้แช่ แข็ง ในเชิงการค้าเครื่องทำไอศกรีม เครื่องทำ빙ซู และระบบทำความเย็นในภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งใช้ในทางการแพทย์และการถนอมอาหาร แต่ในปัจจุบันระบบทำความเย็นทุกระบบอาศัยสารทำความเย็นซึ่งเป็นสารเคมีและมี ราคาสูง ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศโลกส่งผลให้รังสีที่เป็นอันตรายต่อ สิ่งมีชีวิตสามารถทะลุผ่านชั้นบรรยากาศตกกระทบลงบนโลกได้มากขึ้น ซึ่งแตกต่างกับการใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ สามารถประยุกต์เป็นระบบผลิตกำลังหรือระบบปั๊มความร้อนได้เป็นอย่างดีและประสบผลสำเร็จในการทำความเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำได้ถึง -200 องศาเซลเซียส จึงทำให้การใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในระบบทำความเย็นได้หลากหลาย ทั้งสามารถประยุกต์ใช้ในระบบแช่แข็ง ระบบปรับอากาศเย็นซึ่งสามารถใช้ได้ดีทั้งระบบปรับอากาศและระบบพัดลมเย็น ที่ไม่จำเป็นต้องใช้ไอน้ำ สามารถออกแบบระบบให้มีความกะทัดรัดด้วยกลไกขับเคลื่อนลูกสูบอิสระ โครงสร้างเบต้า ดังนั้นระบบทำความเย็นวัฏจักรสเตอร์ลิงจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะระบบนี้ใช้อากาศหรือแก๊สเป็นสารทำงาน ระบบปิดซึ่งปลอดภัยต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ออกแบบเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงลูกสูบอิสระ
2. เพื่อวิเคราะห์ระบบเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงโดยกลไกลูกสูบอิสระ
3. เพื่อจำลองการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคโดยกลไกลูกสูบอิสระ

### 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1. เครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเครื่องยนต์ที่ออกแบบมีขนาด, รูปร่าง และค่าคงที่สปริงที่เหมาะสม

2. กำลังของเครื่องยนต์ขึ้นกับความดันของสารทำงานและความถี่ของเครื่องยนต์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบและวิเคราะห์เครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงลูกสูบอิสระต้นแบบให้สามารถทำงานได้ที่ความดันเริ่มต้นสูงสุดไม่เกิน 5 บาร์
2. จำลองการทำงานของระบบเครื่องยนต์ที่ความดันเริ่มต้น 5 บาร์
3. ใช้อากาศเป็นสารทำงาน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้ความรู้และประสบการณ์ที่ได้เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต่อไป
2. ได้แบบในการสร้างเครื่องทำความเย็นที่สามารถทดแทนเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอปราศจากสารเคมีที่ใช้เป็นสารทำความเย็น
3. เป็นต้นแบบในการศึกษาเพื่อพัฒนาระบบทำความเย็นรูปแบบใหม่ในประเทศที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



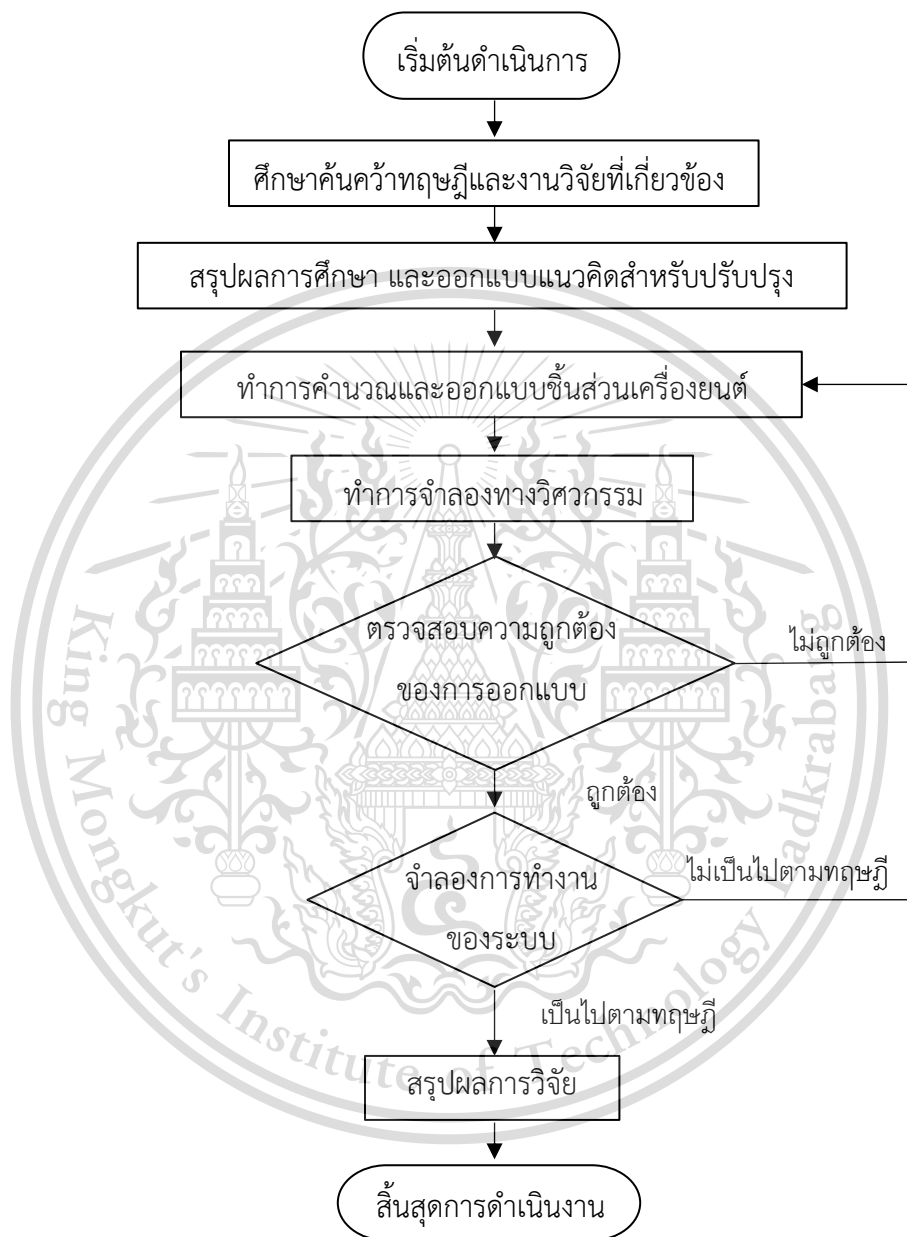
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานเป็นไปตามรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงแผนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

### 2.1 ประวัติความเป็นมาของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

คำจำกัดความสั้นๆ สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือเครื่องยนต์ที่มีวัฏจักรการทำงานแบบระบบปิด รีเจนเนอร์เรทีฟ วัฏจักรประกอบไปด้วยกระบวนการอัดตัว และขยายตัวของของไหลที่อุณหภูมิต่างกัน การเปลี่ยนแปลงขนาดปริมาตรของระบบจะเป็นตัวควบคุมของไหลและจะมีการแปรสภาพจากพลังงานความร้อนเป็นกำลังงานหรือในทางกลับกัน

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีชื่อเรียกหลายแบบด้วยกัน เช่นเครื่องยนต์อากาศร้อน, เครื่องยนต์แก๊สร้อน หรืออาจจะตั้งตามชื่อบุคคลที่คิดค้นแบบต่างๆ แต่ชื่อเครื่องยนต์แก๊สร้อนของฟิลลิปส์นั้นจะใช้ในการสื่อความหมายแบบเดียวกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมากกว่าชื่อในแบบอื่นๆ เพราะห้องปฏิบัติการของฟิลลิปส์มีความสำคัญมากในการปรับปรุงเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้สามารถนำมาแข่งขันกับเครื่องยนต์ความร้อนชนิดอื่นๆ เช่น ดีเซล, เบนซิน

ในปี ค.ศ.1816 โรเบิร์ตสเตอร์ลิงเป็นบุคคลแรกที่ได้ประดิษฐ์เครื่องยนต์แบบระบบปิด รีเจนเนอร์เรทีฟขึ้นแต่ในการคิดค้นของเขาไม่ประสบผลสำเร็จมากนักในด้านกำลังงานที่ผลิตออกมา เขายังได้กล่าวไว้ว่า "ในอนาคตข้างหน้า เมื่อมีความรู้ทางด้านโลหะพัฒนามากขึ้นเครื่องยนต์ความร้อนชนิดนี้จะประสบผลสำเร็จอย่างมากเลยทีเดียว"

ช่วงประมาณกลางคริสต์ศักราช 19 เครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น ดีเซล และแก๊สโซลีน พร้อมทั้งมอเตอร์ไฟฟ้าได้ก้าวหน้ามาแทนที่เครื่องจักรไอน้ำจึงทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีความสนใจ น้อยลงไป ไม่มีการพัฒนามากนัก แต่ในประมาณ ค.ศ. 1930 ทางห้องปฏิบัติการคันทัวของฟิลลิปส์ ประเทศเนเธอร์แลนด์ ได้เริ่มทำงานทางด้านเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอย่างจริงจัง และได้พัฒนารูปแบบ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอย่างมากมาย เช่น สามารถให้กำลังงานที่ได้ออกมากมายถึงขนาด หลายร้อยแรมป์มีการคิดค้นกลไกแบบรอมบิก การพัฒนาด้านซีลกันรั่ว ฯลฯ จากความสำเร็จของ ฟิลลิปส์นั้นทำให้มีประเทศต่างๆ มีความสนใจในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมากขึ้นมีการร่วมมือในการค้นคว้าเกิดขึ้น เช่น เยอรมัน และอเมริกา

ในปี ค.ศ. 1960 วิลเลียม บิล ศาสตราจารย์ของมหาวิทยาลัยโอไฮโออเมริกา ได้คิดค้น

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระขึ้น ซึ่งเป็นอีกแบบหนึ่งของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่น่าสนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในปัจจุบัน ปัญหาด้านเสียง, อากาศ, และการสั่นพ้องเป็นที่น่าสนใจมากทำให้ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้รับการพัฒนาและคิดค้นมากยิ่งขึ้น เพราะสามารถควบคุมและลดปัญหาต่างๆ จากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ง่ายกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในชนิดอื่นๆ

### 2.1.1 การพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ปัจจุบันถึงแม้จะยังไม่มีการผลิตเครื่องยนต์สเตอร์ลิงออกสู่ตลาดเพราะยังติดขัดปัญหาทางเทคนิคหลายประการ โดยเฉพาะด้านประสิทธิภาพที่ทำให้ยังมีผู้สนใจพัฒนาอยู่คือ

1. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสร้างได้ง่ายกว่าเครื่องยนต์ดีเซล หรือแก๊สโซลีน เพราะไม่ต้องมีวาล์ว ง่าย หัวฉีด และระบบเวลา เนื่องจากเป็นวัฏจักรปิด
2. มีระดับเสียงต่ำมาก เพราะไม่มีการจุดระเบิดในเครื่อง
3. การสันดาปอยู่ภายนอกเครื่อง ทำให้สามารถใช้เชื้อเพลิงใดๆ ก็ได้แม้กระทั่งแสงอาทิตย์ ไม่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาสูง เช่น แก๊สโซลีน หรือดีเซล
4. การสันดาปอยู่ภายนอกเครื่อง ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ได้ง่าย การควบคุมมลพิษจากการเผาไหม้ก็ทำได้สะดวกขึ้น
5. การทำงานของเครื่องยนต์ตามวัฏจักรปิดทำให้สามารถเลือกแก๊สทำงานได้หลายชนิดนอกจากอากาศปกติ เช่น ไฮโดรเจน ฮีเลียม อลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นต้น แก๊สที่กล่าวมา ข้างต้นนี้มีค่าคงที่ของแก๊สสูงกว่าอากาศมาก จึงทำให้กำลังเครื่องผลิตออกมาได้สูงกว่ากำลังที่อากาศผลิตออกมาได้เมื่อใช้มวลเท่ากัน
6. ถ้าเพิ่มมวลของแก๊สในระบบกำลังจะเพิ่มตาม เนื่องจากเครื่องยนต์ทำวัฏจักรปิด การเพิ่มมวลในระบบจึงทำได้โดยง่าย โดยเพิ่มความดันต่ำสุดในระบบให้สูงกว่าบรรยากาศ

### 2.2 การจัดรูปแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

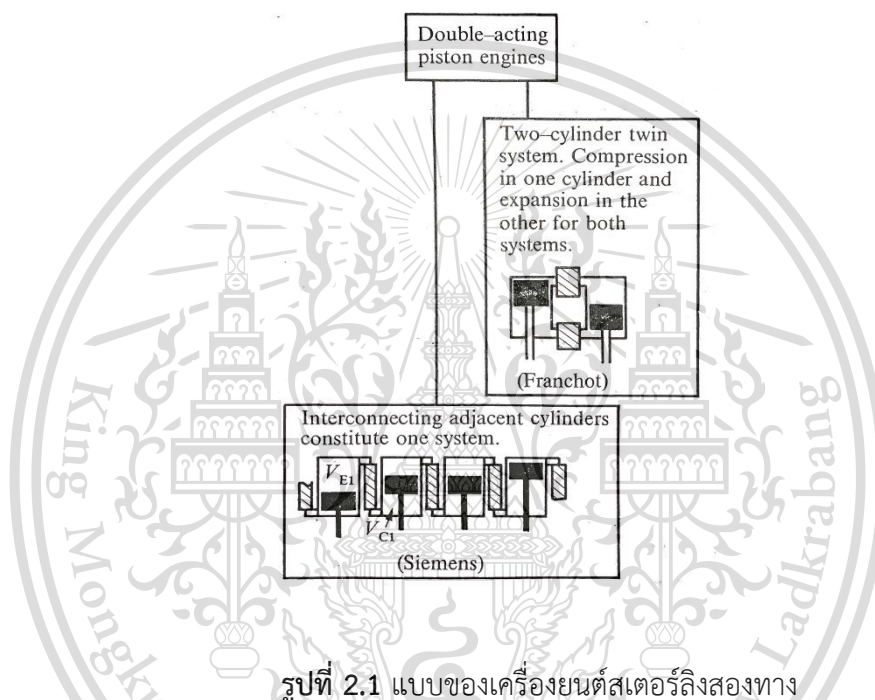
รูปแบบของการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถแบ่งเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้สองประเภทด้วยกัน คือ ประเภททำงานทางเดียว (Single Acting) และประเภททำงานสองทาง (Double Acting) ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 2.2.1 ชนิดการออกแบบต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสองทาง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มีรูปแบบในการเลือกออกแบบดังแสดงในรูป 2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานสองทางจะประกอบด้วยกระบอกสูบหลายชุดต่อกัน โดยที่บริเวณขยายตัวของกระบอกสูบหนึ่งจะต่อกับ ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและผ่านไปยังบริเวณอัดตัวของกระบอกสูบที่อยู่ใกล้กันจะมีจุดเคลื่อนที่ เพียงชุดเดียวต่อกระบอกสูบหนึ่งตัว ซึ่งอาจจะเป็นลูกสูบหรือดิสเพลสเซอร์ จำนวนวัฏจักรทำงาน ของสเตอร์ลิงจะ เท่ากับจำนวนกระบอกสูบ



รูปที่ 2.1 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสองทาง

จุดเด่นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานสองทางคือ ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่มีจำนวนเพียงครั้งเดียว ของจำนวนที่ต้องใช้ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานทางเดียว ดังนั้นกลไกในการขับเคลื่อนจึงสามารถจัดให้ง่าย และเป็น การลดต้นทุนการผลิตด้วย อีกทั้งเหมาะสมที่จะใช้กับเครื่องขนาดใหญ่ที่มีกำลังเกิน 20 แรงม้าขึ้นไป

ข้อเสียของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานสองทางคือ เป็นการจำกัดขอบเขตการยืดหยุ่น ในการออกแบบ และขยายช่วงบริเวณภาวะทำงานของเครื่องได้น้อยกว่า

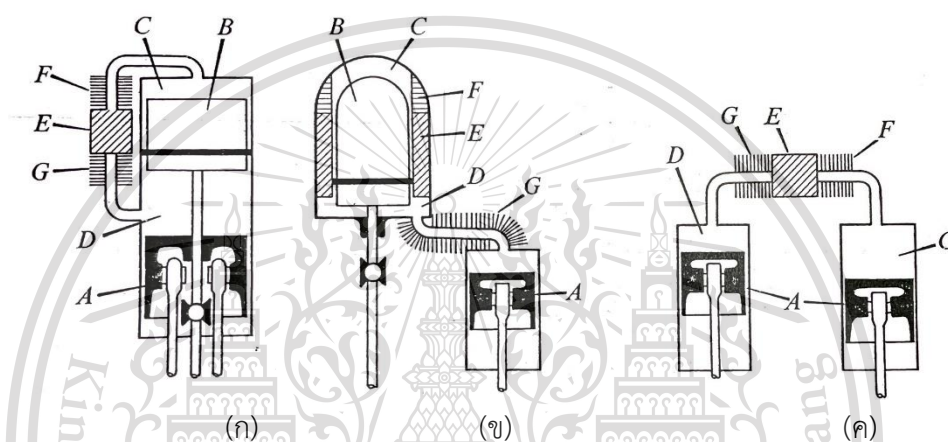
### 2.2.2 ชนิดและการออกแบบต่างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานทางเดียว

สามารถแบ่งแยกประเภทกว้างๆ ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานทางเดียวออกเป็น 2 ประเภทคือ ชนิดลูกสูบสองตัว (แบบแอลฟ่า) และชนิดลูกสูบกับดิสเพลสเซอร์ (แบบเบต้า แกมมา และลูกสูบฮิสเซ) ดัง

สามารถแสดงรูปแบบในรูปที่ 2.2 ข้อแตกต่างระหว่างลูกสูบและดิสเพลสเซอร์คือ ความดันที่ตอนบน และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ตอนล่างของตัวดิสเพลสเซอร์จะมีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน (ซึ่งเกิดการสูญเสียเนื่องจากการไหล ของ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศน้อย) ดังนั้นการซีลของแก๊สไม่มีปัญหามากนักในตัวดิสเพลสเซอร์เมื่อเครื่องยนต์ทำงาน ตัวดิสเพลสเซอร์จะไม่มีการออกมาแต่จะทำหน้าที่คล้ายตัวกวาดแก๊สจากตำแหน่งหนึ่งสู่อีกตำแหน่งหนึ่ง

ตัวลูกสูบจะมีความดันแตกต่างกันมากระหว่างตอนบนและตอนล่างของลูกสูบดังนั้นจึงมีปัญหาด้านซีลแก๊สและกำลังที่ได้ของเครื่องก็มาจากลูกสูบในเครื่องยนต์เครื่องยนต์สตอร์ลิงบางชนิด ตัวดิสเพลสเซอร์จะทำด้วยแผ่นโลหะที่มีรูปแบบเหมือนตัวรีเจนเนอเรเตอร์เพื่อใช้ในการรับแลกเปลี่ยน ความร้อนด้วยลักษณะเช่นนี้จะเรียกว่า "รีเจนเนอเรทิฟ ดิสเพลสเซอร์"



รูปที่ 2.2 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 3 แบบพื้นฐาน

- (ก) ลูกสูบกำลัง-ดิสเพลสเซอร์ในกระบอกสูบเดียวกัน
- (ข) ลูกสูบกำลัง-ดิสเพลสเซอร์ในกระบอกสูบแยกกัน
- (ค) ลูกสูบกำลังสองตัว

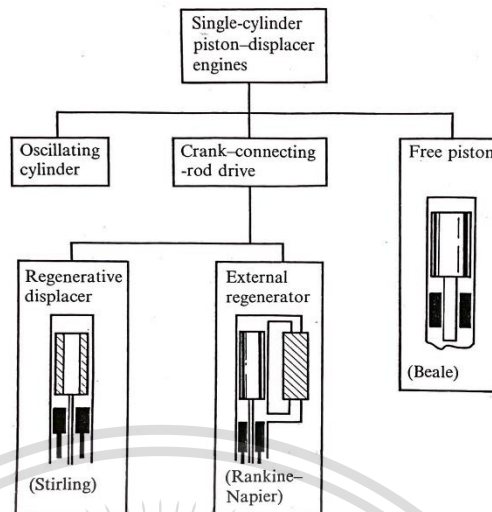
### 2.2.2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบกระบอกสูบเดียวชนิดลูกสูบกับดิสเพลสเซอร์หรือแบบเบต้า

แบบต่างๆ ของเครื่องยนต์ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 เป็นแบบที่ได้รับความนิยมสูง แบบโครงสร้างชนิดนี้ถูกสร้างโดย โรเบิร์ต สเตอร์ลิง ในปี ค.ศ. 1816 มีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.3 โครงสร้างชนิดนี้ได้รับความสนใจในการพัฒนาโดยบริษัทฟิลลิปส์ เครื่องยนต์จะขับเคลื่อนโดยข้อเหวี่ยง หรือกลไกชนิดรอมบิกดังรูปที่ 2.4 จะมีรูปลักษณะแบบรีเจนเนอเรทิฟดิสเพลสเซอร์หรืออาจจะแยก ชุดรีเจนเนอเรเตอร์ไว้ข้างนอกก็ได้

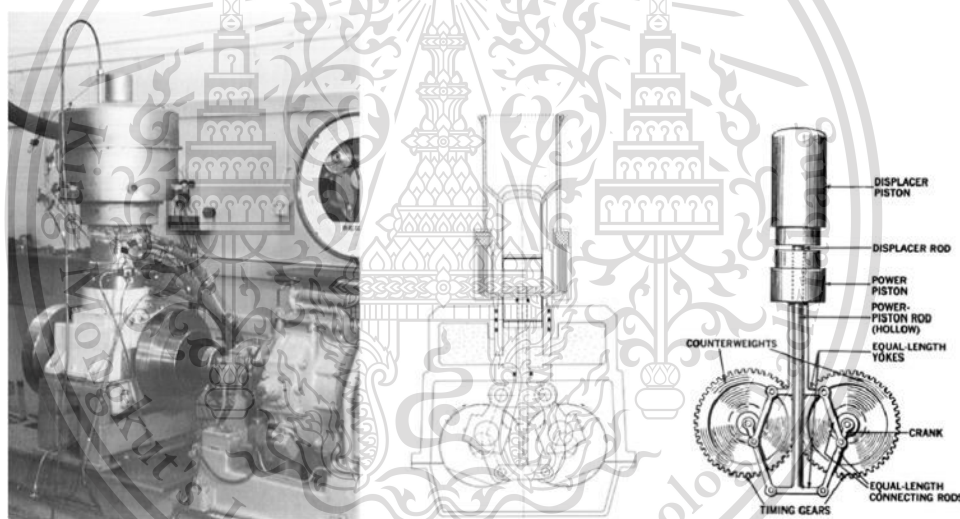
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า



รูปที่ 2.4 กลไกเครื่องยนต์แบบรอมบิก

### 2.2.2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบกระบอกสูบสองชุดต่อหนึ่งวัฏจักรทำงานชนิด

#### ลูกสูบดิสเพลสเซอร์หรือแบบแกมมา

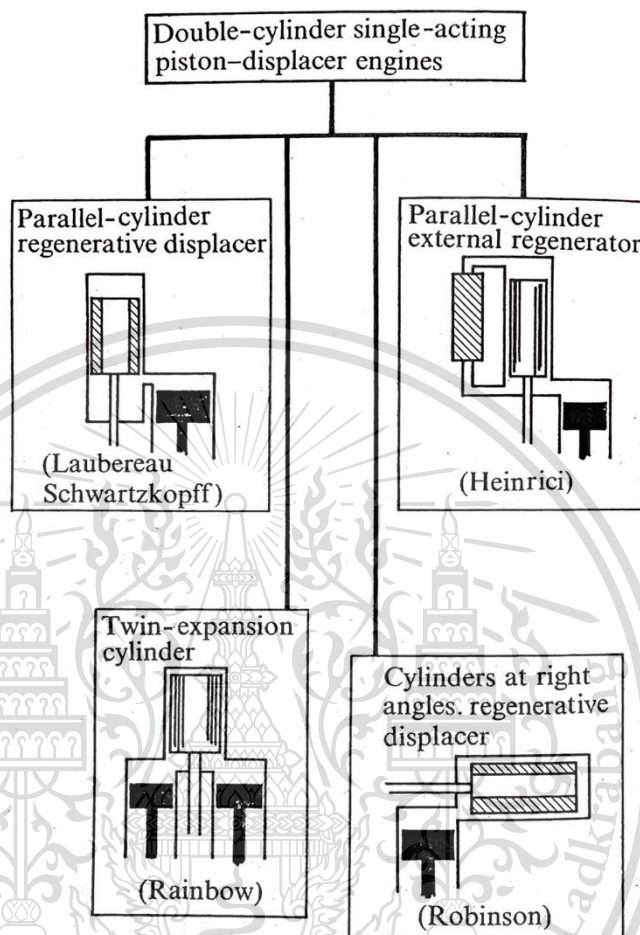
รูปแบบเครื่องชนิดนี้ถูกสร้างในปี ค.ศ. 1827 โดย โรเบิร์ต และเจมส์ สเตอร์ลิงและใช้งานหลายปี แต่ในเวลาต่อมาก็ถูกยกเลิกเพราะเกิดความเสียหายที่กระบอกสูบของตัวดิสเพลสเซอร์ เนื่องจาก เนื้อโลหะในสมัยนั้นคุณภาพไม่ดี จึงเกิดความร้อนที่กระบอกสูบมากเกินไป ต่อมาได้มีผู้คิดค้นแบบ เครื่องยนต์

ชนิดนี้ไว้มากมายดังรูปที่ 2.5 แต่แบบที่สนใจมากที่สุดคือแบบของ RANBOW ซึ่งสร้างใน ปี ค.ศ. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1971 เครื่องยนต์ชนิดนี้ประกอบด้วยลูกสูบสองตัว และตัวดีสเพลสเซอร์หนึ่งชุด ข้อดีคือมีความยืดหยุ่นของกลไกขับเคลื่อน และทำให้ปัญหาด้านซีลและการหล่อเย็น สามารถแก้ไขได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 2.5 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมา

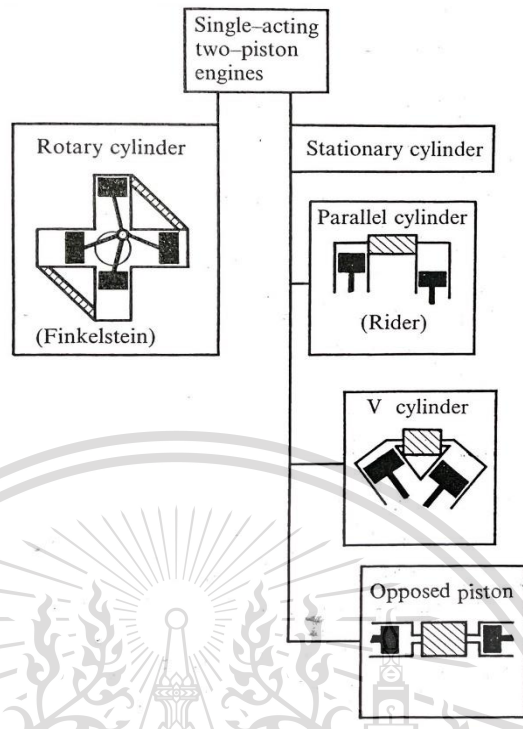
### 2.2.2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบทำงานทางเดียวชนิดลูกสูบหลายตัวหรือแบบแอลฟา

ประเภทของลูกสูบ-กระบอกสูบ เป็นชนิดที่รู้จักมากที่สุด ในรูปที่ 2.6 แสดงชนิดประเภทต่างๆ ของเครื่องยนต์ทำงานทางเดียวแบบหลายสูบหรือแบบแอลฟา เครื่องยนต์ประเภทนี้จะประกอบด้วยกระบอกสูบสองกระบอกและลูกสูบกำลังสองกระบอก กระบอกหนึ่งจะเป็นฝั่งร้อนอีกกระบอก หนึ่งจะเป็นฝั่งเย็น เครื่องยนต์ประเภทนี้จึงมีกำลังมากกว่าเครื่องยนต์แบบทำงานทางเดียวชนิดอื่นๆ เพราะได้กำลังจากลูกสูบทั้งสองตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

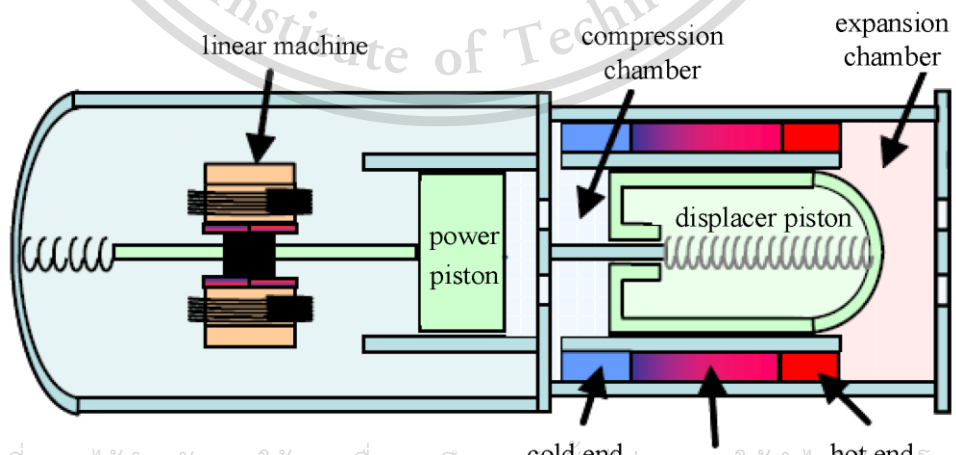
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.6 แบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟา

### 2.2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดลูกสูบอิสระ (Free Piston Stirling Engines)

เครื่องยนต์ชนิดนี้จะคล้ายกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้าแต่จะขับเคลื่อนด้วยสปริงแทนข้อเหวี่ยง เครื่องยนต์ชนิดนี้จึงเป็นต้นกำลังในแบบเชิงเส้นแทนที่จะเป็นแบบหมุนการทำงานของเครื่องยนต์ชนิดนี้จึงเป็นการเคลื่อนที่แบบขึ้นลงโดยการสั่นของสปริงนั้นจะต้องไม่ตรงกับ ค่าความถี่ธรรมชาติของสปริงที่ใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.7 กลไกเครื่องยนต์แบบลูกสูบอิสระ

## 2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 กฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อแรกจะเกี่ยวกับพลังงานทุกชนิด พลังงานเป็นสิ่งที่ไม่สูญสลาย สามารถเปลี่ยนรูปได้ ไม่สามารถสร้างหรือผลิตออกมาได้ ตัวอย่างเช่น เมื่อให้พลังงานความร้อนกับเครื่องยนต์ เครื่องยนต์จะมีพลังงานจลน์ และพลังงานความร้อนออกมา ซึ่งผลรวมของพลังงานจลน์และ พลังงานความร้อนจะมีค่าเท่ากับค่าพลังงานความร้อนที่ให้กับเครื่องยนต์

### 2.3.2 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่สองจะเกี่ยวข้องกับระบบวัฏจักรความร้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์โดยตรงคำจำกัดความของกฎข้อที่สองมีผู้ให้คำจำกัดความไว้สองคนคือ เคลวิน แพลงค์ และ คอลเซียส โดยเคลวิน-แพลงค์ กล่าวว่า "ไม่มีวัฏจักรหรืออุปกรณ์ใดที่ให้พลังงานความร้อนเข้าไปและได้งานออกมาเท่ากับ พลังงานความร้อนที่ให้เข้าไป" กล่าวคือ เครื่องยนต์ไม่มีทางที่จะมีประสิทธิภาพความร้อนเท่ากับ 100% และอีกหนึ่งคำจำกัดความโดยคอลเซียสซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับระบบเครื่องทำความเย็นและ ป้อนความร้อนคือ "เป็นไปได้ที่จะสร้างอุปกรณ์ที่จะทำให้วัฏจักรความร้อนทำงานได้โดยไม่ต้อง ให้งานกับระบบเพื่อที่จะให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากที่อุณหภูมิต่ำกว่าไปที่อุณหภูมิสูงกว่า" ซึ่งคือหลักการของปั๊มความร้อนคือ เมื่อให้งานเข้าไปในวัฏจักรความร้อนแล้วจะมีพลังงานความร้อน ที่ถูกดูดเข้าไปและให้พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าออกมา

### 2.3.3 เครื่องยนต์ความร้อน

เครื่องยนต์ความร้อนคือ อุปกรณ์ที่ทำงานเป็นวัฏจักรโดยเมื่อให้ความร้อนกับเครื่องยนต์ เครื่องยนต์ก็จะผลิตกำลังงานออกมา ซึ่งกำลังงานมาจากการให้ความร้อนกับแก๊สเมื่อแก๊สอุณหภูมิสูง จะเกิดการขยายตัวและมีแรงดันลูกสูบให้ขับเคลื่อนไปได้และจะต้องมีความร้อนออกมาด้วยซึ่ง ความร้อนตรงนี้จะถูกนำไปทิ้งด้วยระบบหล่อเย็น

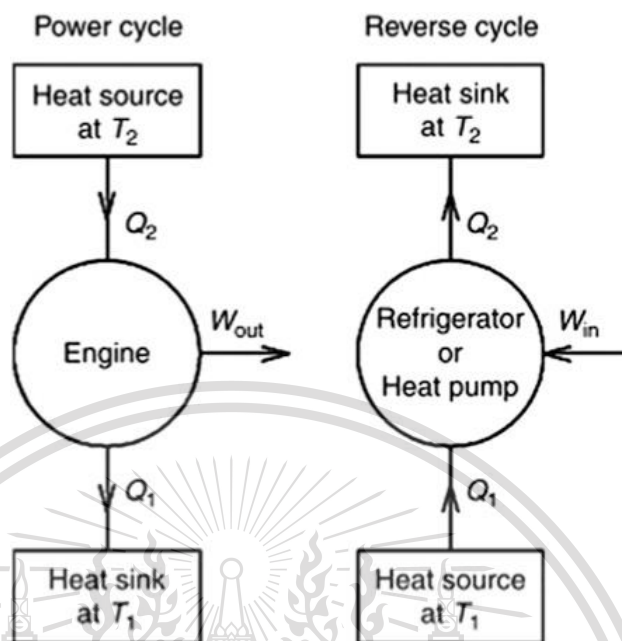
### 2.3.4 เครื่องทำความเย็นและปั๊มความร้อน

เครื่องทำความเย็นและปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างและหลักการทำงานที่เหมือนกัน แต่การใช้งานนั้นต่างกัน โดยหลักการของเครื่องทำความเย็น คือ วัฏจักรความร้อนเมื่อทำงานจะดูดเอาความร้อนจากภายในไปสู่ภายนอกส่วนปั๊มความร้อนก็ใช้หลักการดูดความร้อนจากภายนอกเข้ามาสู่ภายใน ซึ่งการที่ระบบจะทำงานได้คือ จะต้องให้งานกับระบบหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็น ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.8 (ก) การเปลี่ยนแปลงพลังงานของเครื่องยนต์ความร้อน  
(ข) การเปลี่ยนแปลงพลังงานของเครื่องทำความเย็นและปั๊มความร้อน

### 2.3.5 ระบบ

ระบบในวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ หมายถึง สิ่งที่มีขอบเขต อาจจะเป็นขอบเขตในจินตนาการ เช่น ในมอเตอร์ไฟฟ้า, แบตเตอรี่ หรือเพลาและก้านของเครื่องบินการกำหนดขอบเขตของระบบ อาจจะเป็นที่ไหนก็ได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ว่าจะศึกษาคุณสมบัติใดที่จุดไหน เช่น ในเครื่องยนต์ แบบสูบชัก ระบบอาจจะคิดเฉพาะของไหลภายในกระบอกสูบ หรืออาจจะรวมทั้งการไหล ลูกสูบหรือก้านสูบ หรือ อาจจะคิดรวมทั้งหมดของตัวเครื่องก็ได้ แบ่งออกเป็น

1. ระบบปิด มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ระบบไม่มีการไหล หมายถึง ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงาน สนใจเฉพาะตัวกลางที่อยู่ในขอบเขตที่อยู่ในระบบเท่านั้น เช่น การเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงานในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ เป็นต้น แต่ถึงอย่างไรก็ดีพลังงานอาจเคลื่อนที่ออก หรือเข้าระบบได้ ส่วนมวลของสารตัวกลางของระบบปิดไม่ได้ไหลออกนอกขอบเขต

2. ระบบเปิด หมายถึงระบบที่มีการเปลี่ยนรูปของพลังงานและมวลของสารตัวกลาง จะมีการเคลื่อนที่ผ่านขอบเขตของระบบด้วยอัตราที่คงที่หรือไม่ก็ได้ และพลังงานจะมีการเคลื่อนที่ผ่านขอบเขตของระบบได้ โดยเคลื่อนที่ไปโดดเดี่ยว หรือไปพร้อมกับมวลของสารตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

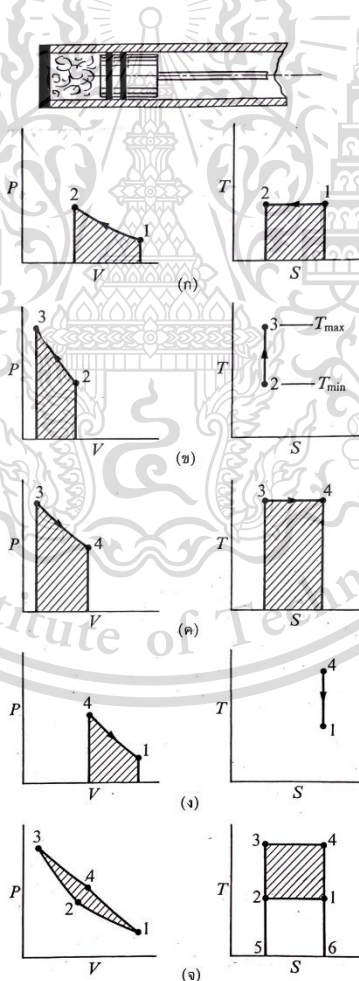
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.3.6 วัฏจักร

คือ กระบวนการหลายๆ อันของระบบที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน จากสภาพหนึ่ง และเมื่อเกิดขึ้นครบ วัฏจักรแล้วจะกลับมาอยู่ที่สภาพเดิม วัฏจักรหนึ่งจะประกอบด้วยก็กระบวนการก็ได้ กระบวนการเป็น ลักษณะที่ระบบเปลี่ยนแปลงจากสภาวะหนึ่งเป็นอีกสภาวะหนึ่ง เช่น กระบวนการปริมาตรคงที่ กระบวนการความดันคงที่ กระบวนการอุณหภูมิคงที่ เป็นต้น

### 2.3.7 วัฏจักรความร้อนในอุดมคติ

วัฏจักรคาร์โน เป็นวัฏจักรที่ถือว่ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงชนิดหนึ่งซึ่งใช้ เป็น วัฏจักรพื้นฐานของเครื่องยนต์ทุกชนิด ประกอบด้วยกระบวนการที่อุณหภูมิคงที่สองกระบวนการ และ กระบวนการไอเซนโทรปิกสองกระบวนการ ดังแสดงใน P-V และ T-S ไดอะแกรม ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วัฏจักรคาร์โน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
(ก) กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- (ข) กระบวนการอัดตัวแบบไอเซนโทรปิก
- (ค) กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่
- (ง) กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก

ช่วง 1-2 รูปที่ 2.9(ก) เป็นกระบวนการที่มีอุณหภูมิคงที่และมีความร้อนออกจากระบบช่วงนี้

ช่วง 2-3 รูปที่ 2.9(ข) เป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกเป็นช่วงที่สารตัวกลางถูกอัด

ให้มีปริมาตรเล็กลง ไม่มีการถ่ายเทความร้อน

ช่วง 3-4 รูปที่ 2.9(ค) เป็นกระบวนการที่อุณหภูมิคงที่อีกเช่นกัน แต่ความร้อนเข้าสู่ระบบในช่วงนี้

ช่วง 4-1 รูปที่ 2.9(ง) เป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกอีกครั้ง แต่สารตัวกลางจะขยายตัว

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรคาร์โนซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max}$  ซึ่งเป็นประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดในวัฏจักรความร้อนทุกชนิดการปรับปรุงประสิทธิภาพให้มีค่าสูงขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิสูงสุด หรือลดอุณหภูมิต่ำสุดหรือทำพร้อมกันทั้งสองกรณีแต่ การเพิ่มอุณหภูมิจะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของโลหะด้วย

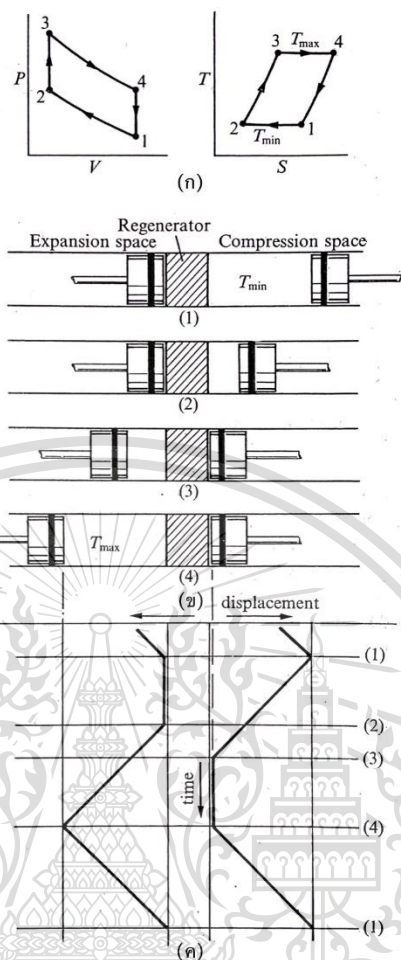
### 2.3.8 วัฏจักรสเตอร์ลิง

เป็นวัฏจักรที่ใช้ในเครื่องยนต์อีกชนิดหนึ่งซึ่งมีลักษณะคล้ายกับวัฏจักรคาร์โนโดยการแทนที่กระบวนการอัดตัวแบบไอเซนโทรปิกและกระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิกด้วยกระบวนการ รีเจนเรชันที่ปริมาตรจำเพาะคงที่(การถ่ายโอนความร้อนภายในจากรีเจนเนอเรเตอร์กลับไปยังของไหลทำงานหรือจากของไหลทำงานไปยังรีเจนเนอเรเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.10 วัฏจักรสเตอร์ลิง

- (ก) P-V และ T-S ไดอแกรม
- (ข) ตำแหน่งของลูกสูบในแต่ละกระบวนการ
- (ค) ตำแหน่งของลูกสูบเทียบกับเวลา

พิจารณา รูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงรูปแบบของวัฏจักรสเตอร์ลิงพร้อมทั้งจังหวะการทำงานของลูกสูบ ทั้งสองรูปที่นำมาประกอบกันรีเจนเนอเรเตอร์ในรูปแบบเปรียบเทียบเสมือนสิ่งที่สามารถปล่อยหรือ ได้รับความร้อนมาได้ รูปร่างของรีเจนเนอเรเตอร์จะเป็นในลักษณะของตะแกรงขดลวดโลหะบริเวณด้านหนึ่ง ระหว่างลูกสูบและรีเจนเนอเรเตอร์จะมีอุณหภูมิสูงสุดคงที่เสมอ เรียกว่า "บริเวณขยายตัว" และปริมาตร อีกด้านหนึ่งจะมีอุณหภูมิต่ำสุดคงที่เสมอ เรียกว่า "บริเวณอัดตัว" ในการพิจารณาระบบ ของวัฏจักรนี้ สมมติว่าไม่มีการนำความร้อนตามแนวยาวและ ไม่มีความเสียดทานระหว่างลูกสูบกับผนังและระบบ เป็นระบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในช่วงเริ่มต้นของวัฏจักร สมมติให้ลูกสูบชุดอัดอยู่ที่จุดศูนย์ตายล่างและลูกสูบชุดขยายตัวอยู่ที่จุดศูนย์ตายบนติดกับชุดรีเจนเนอเรเตอร์ ดังนั้นความดันและอุณหภูมิที่จุดนี้จะมีค่าต่ำสุด สามารถ แสดงได้ด้วยจุด 1 บน P-V และ T-S ไดอะแกรม ระหว่างการอัดตัว (ช่วงที่ 1-2) ลูกสูบชุดอัดจะเคลื่อนที่ เข้าหาจุดศูนย์ตายบน ส่วนลูกสูบชุดขยายจะยังคงอยู่นิ่งที่ตำแหน่งเดิมอยู่ ดังนั้นปริมาตรของอากาศ จะถูกอัดตัวในบริเวณอัดตัวและความดันจะเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิจะยังคงที่เนื่องจากความร้อนถูกนำออกสู่ สิ่งแวดล้อมรอบกระบอกสูบ

ในช่วง 2-3 ลูกสูบทั้งสองตัวจะเคลื่อนที่พร้อมกันกล่าวคือลูกสูบชุดอัดจะเคลื่อนเข้าหา จุดศูนย์ตายบน ส่วนลูกสูบชุดขยายจะเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์ตายบนดังนั้นปริมาตรของอากาศ จะยังคงที่อยู่ อากาศจึงถูกส่งผ่านตัวรีเจนเนอเรเตอร์จากบริเวณอัดตัวสู่บริเวณขยายตัว ดังนั้นอากาศ จะรับความร้อนจากตัวรีเจนเนอเรเตอร์ทำให้อุณหภูมิหลังจากผ่านออกมาจากตัวรีเจนเนอเรเตอร์มีค่าสูงสุด ในช่วง ปริมาตรจะยังคงที่อยู่ จึงทำให้ความดันของอากาศสูงขึ้น

ช่วง 3-4 ลูกสูบชุดขยายตัวยังคงเคลื่อนที่สู่จุดศูนย์ตายบนแต่ลูกสูบชุดอัดจะยังคงอยู่ที่จุดศูนย์ตายบนทำให้ความดันของอากาศลดลง เนื่องจากปริมาตรของอากาศเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของอากาศ จะยังคงที่อยู่ เนื่องจากการให้ความร้อนเข้าสู่ระบบจากแหล่งความร้อนภายนอก

ช่วง 4-1 ลูกสูบทั้งสองจะเคลื่อนที่พร้อมกัน กล่าวคือ ลูกสูบชุดขยายตัวเคลื่อนสู่จุดศูนย์ตายล่าง ส่วนชุดอัดตัวเคลื่อนที่สู่จุดศูนย์ตายล่าง ปริมาตรในช่วงนี้จะคงที่ และอากาศจะเคลื่อนที่จากบริเวณขยายตัวสู่บริเวณอัดตัว โดยผ่านตัวรีเจนเนอเรเตอร์และทำให้ความร้อนกลับคืนสู่ชุดรีเจนเนอเรเตอร์ด้วย ดังนั้นอุณหภูมิหลังจากผ่านชุดรีเจนเนอเรเตอร์เข้าสู่บริเวณอัดตัวจึงมีค่าต่ำสุดด้วยเหตุนี้เอง ความดันของอากาศจึงลดลงด้วย

### สรุปกระบวนการของวัฏจักรสเตอร์ลิงประกอบด้วย 4 กระบวนการดังนี้

กระบวนการ 1-2 เป็นการอัดตัวโดยที่อุณหภูมิคงที่ความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิต่ำสุดจะถ่ายเทออกสู่ระบบภายนอก

กระบวนการ 2-3 เป็นกระบวนการที่มีปริมาตรคงที่ความร้อนจะถูกส่งไปให้อากาศโดยตัวรีเจนเนอเรเตอร์ และมีอุณหภูมิสูงสุดที่ลูกสูบชุดขยาย

กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่อีกครั้งหนึ่งโดยความร้อนจะถูกส่งผ่านไปให้อากาศที่ลูกสูบขยาย จากแหล่งความร้อนภายนอก

กระบวนการ 4-1 เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่ความร้อนจากอากาศจะถูกถ่ายเทให้กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ชุดรีเจนเนอเรเตอร์ และมีอุณหภูมิต่ำสุดที่ลูกสูบชุดอัด

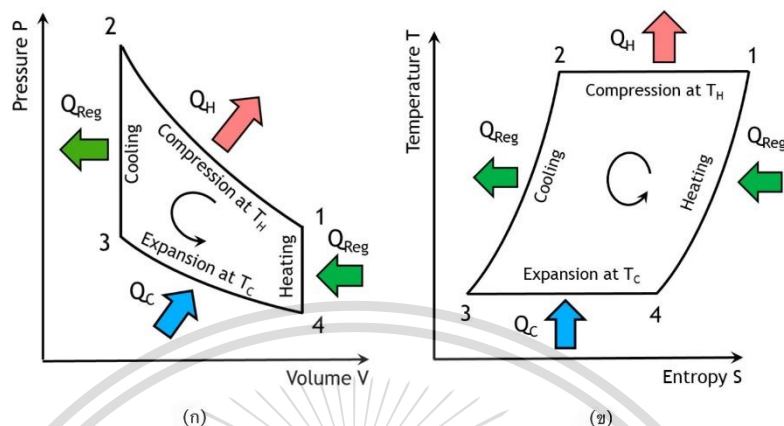
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อใช้เป็นเครื่องทำความเย็น

หลักการการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อใช้เป็นเครื่องทำความเย็น

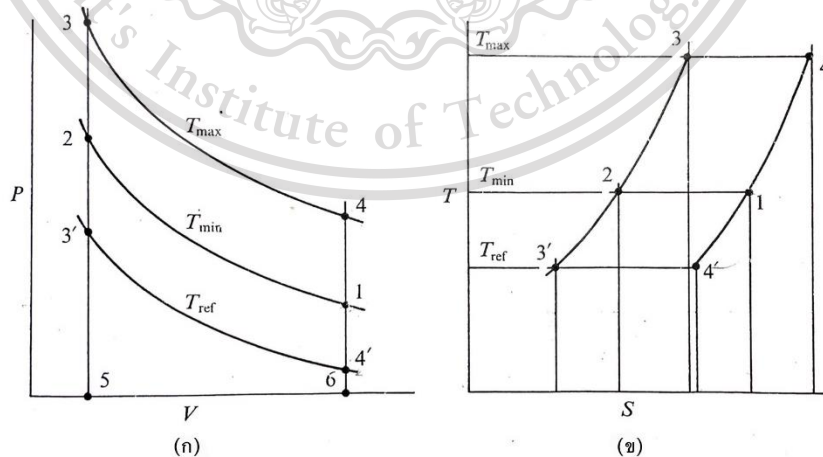


รูปที่ 2.11 P-V ไดอแกรมเมื่อเป็นเครื่องทำความเย็น

หลักการการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อใช้เป็นเครื่องทำความเย็นมีดังนี้

- กระบวนการ 4-1 เป็นกระบวนการลดความดันที่ปริมาตรคงที่ทำให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิกายนอก
- กระบวนการ 1-2 เป็นกระบวนการขยายตัวที่อุณหภูมิกคงที่ โดยความร้อนจะถูกดึงเข้ามาสู่ภายในระบบ
- กระบวนการ 2-3 เป็นกระบวนการเพิ่มความดันตัวที่ปริมาตรคงที่จะทำให้แก๊สอุณหภูมิสูงขึ้นจนมากกว่าอุณหภูมิกายนอก
- กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการอัดตัวที่อุณหภูมิกคงที่ โดยแก๊สจะถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก

### 2.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องยนต์และปั๊มความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



รูปที่ 2.12 (ก) P-V ไดอแกรมของเครื่องยนต์และปั๊มความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในองค์กรหรือหน่วยงานราชการ ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องยนต์และปั๊มความร้อนของเครื่องยนต์ สเตอริง โดยพื้นที่ด้านบนจะเป็นของเครื่องยนต์สเตอริงเมื่อทำงานเป็นเครื่องยนต์ส่วนด้านล่างเป็น ของเครื่องยนต์สเตอริงเมื่อทำงานเป็นปั๊มความร้อนจากภาพจะพบว่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเท ออกสู่ภายนอกของเครื่องยนต์และของปั๊มความร้อนจะมีค่าเท่ากัน

## 2.5 ข้อแตกต่างของวัฏจักรสเตอริงใช้งานจริงกับในอุดมคติ

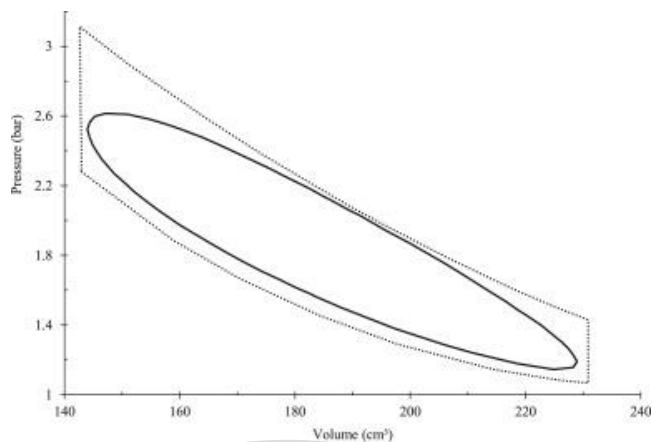
ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถที่จะสร้างเครื่องยนต์สเตอริงให้ทำงานตามวัฏจักรในอุดมคติได้เนื่องจาก

1. ในวัฏจักรอุดมคติ ได้สมมติให้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกลับไปมาผันกลับได้ แต่ในทางปฏิบัติมีปัจจัยที่ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ เช่น แรงเสียดทาน การถ่ายเทพลังงานผ่านความแตกต่างของอุณหภูมิ เป็นต้น ทำให้เกิดเป็นกระบวนการที่ไปแล้วกลับมาไม่ได้หมายความว่าเมื่ออากาศเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งมาสู่อีกสถานะหนึ่งแล้ว ในกรณีที่ต้องการจะกลับมาสู่สถานะเดิมนั้น คุณสมบัติเช่น ความดัน ปริมาตรและอุณหภูมิไม่สามารถเปลี่ยนกลับมาสู่สถานะเริ่มต้นได้ครบทุกตัวหรืออาจจะไม่ได้เลยทั้งสามตัว
2. สมมติให้กระบวนการอัดตัวและขยายตัวในวัฏจักรสเตอริงเป็นกระบวนการที่มีอุณหภูมิกงที่นั้นจะต้องสามารถรับการถ่ายเทความร้อนขนาดมหึมาระหว่างอากาศและกระบอกสูบ
3. อากาศในวัฏจักรทั้งหมดตามทฤษฎีจะพิจารณาแต่เพียงบริเวณที่อัดและขยายตัวเท่านั้นซึ่งในเครื่องยนต์สเตอริงแล้ว จำเป็นต้องมีพื้นที่ของตัวรีเจนเนอเรเตอร์ ช่องว่างที่หัวลูกสูบปริมาตรที่เชื่อมโยงระหว่างบริเวณอัดและบริเวณขยาย
4. ลูกสูบทั้งสองในวัฏจักรอุดมคติมีการเคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่องซึ่งกลไกจริงแล้วส่วนมากจะเป็นการเคลื่อนที่ในรูปของซิมเปิลฮาร์โมนิก (เคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง) ทำให้ช่วง P-V ไดอะแกรมที่ได้ออกมาเป็นรูปมนตลอดไม่มีการหักเป็นมุมใดๆทั้งสิ้นและยังส่งผลให้ เกิดการสูญเสียความดัน ทำให้งานที่ผลิตออกมาลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.13

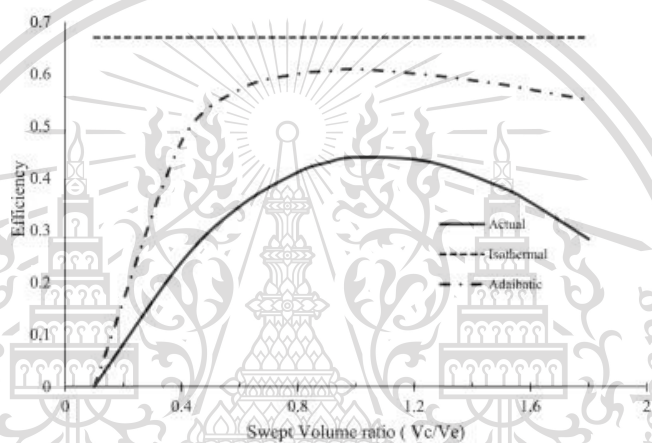
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



a) Pressure-volume diagram (dashed represent ideal cycle).



b) different model predictions

รูปที่ 2.13 วัฏจักรสเตอร์ลิงในทางปฏิบัติ

5. วัฏจักรในอุดมคติไม่ได้คิดผลต่อเนื่องจากการสูญเสียของแรงเสียดทานระหว่างลูกสูบกับผนังกระบอกสูบ ซึ่งในทางปฏิบัติความเสียดทานย่อมจะต้องมีอยู่เสมอเมื่อผิวทั้งสองสัมผัสกัน
6. วัฏจักรในอุดมคติสมมติให้ตัวรีเจนเนอเรเตอร์มีประสิทธิภาพพร้อยเปอร์เซ็นต์ในการรับความร้อนและคลายความร้อนให้กับอากาศเพื่อทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดในวัฏจักรอย่างแท้จริง ซึ่งในทางปฏิบัติจริงแล้วรีเจนเนอเรเตอร์ไม่สามารถกระทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.6 หลักในการคำนวณและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในทฤษฎีของซิมิดท์

ชื่อเรียก	สัญลักษณ์	หน่วย
ความดันเครื่องยนต์	$p$	Pa
Swept volume of expansion piston or displacer piston ปริมาตรชักของกระบอกสูบไล้	$V_{SE}$	$m^3$
Swept volume of compression piston or power piston ปริมาตรชักของกระบอกสูบอัด	$V_{SC}$	$m^3$
Dead volume of expansion space ปริมาตรตายของพื้นที่ ขยายตัว	$V_{DE}$	$m^3$
Dead volume of compression space ปริมาตรตายของพื้นที่ อัดตัว	$V_{DC}$	$m^3$
Regenerator volume ปริมาตรของรีเจเนอเรเตอร์	$V_R$	$m^3$
Expansion space volume ปริมาตรของพื้นที่ขยายตัว	$V_E$	$m^3$
Compression space volume ปริมาตรของพื้นที่อัดตัว	$V_C$	$m^3$
Total volume ปริมาตรรวม	$V$	$m^3$
Total mass of working gas มวลรวมของก๊าซทำงาน	$m$	Kg
Gas constant ค่าคงที่ของแก๊ส	$R$	J/Kg.K
Expansion space gas temperature อุณหภูมิของก๊าซในพื้นที่ ขยายตัว	$T_H$	K
Compression space gas temperature อุณหภูมิของก๊าซใน พื้นที่อัดตัว	$T_C$	K
Regenerator space gas temperature อุณหภูมิในรีเจเนอเร เตอร์	$T_R$	K
Phase angle มุมเฟส	$dx$	deg
Temperature ratio อัตราส่วนอุณหภูมิ	$t$	
Swept volume ratio อัตราส่วนปริมาตรชัก	$v$	
Dead volume ratio อัตราปริมาตรตาย	$X$	
Engine speed ความเร็วเครื่องยนต์	$n$	Hz
Indicated expansion energy	$Q_E$	J

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Indicated compression energy	$Q_C$	J
Indicated energy	$Q_i$	J
Indicated expansion power	$P_E$	W
Indicated compression power	$P_C$	W
Indicated power	$P_i$	W
Indicated efficiency	$e$	

### 2.6.1 ประสิทธิภาพทางความร้อน

ในการประมาณค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ปกติจะคิดเพียง 50% ของประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรคาร์โน ได้สมการดังนี้

$$\eta = 0.5 \left[ \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \right] \quad (2.1)$$

### 2.6.2 ตัวแปรสำคัญในการออกแบบ

ตัวแปรที่เลือกสำหรับการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้แก่

- อัตราส่วนอุณหภูมิ  $\tau = T_C / T_E$  เป็นอัตราส่วนอุณหภูมิของบริเวณอัดตัว ต่อบริเวณขยายตัว
- อัตราส่วนปริมาตรกวาด  $K = V_C / V_E$  เป็นอัตราส่วนของปริมาตรกวาดในบริเวณอัดตัวต่อบริเวณขยายตัว
- อัตราส่วนปริมาตรตาย  $X = V_D / V_E$  เป็นปริมาตรทั้งหมดของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (รวมรูและท่อต่างๆ) ต่อปริมาตรบริเวณขยายตัว
- มุมเฟส  $\alpha$  หมายถึงมุมที่ลูกสูบดิสเพลสเซอร์นำลูกสูบกำลัง (ปกติคือ 90 องศา)
- ความดันของแก๊ส อาจรู้ค่าความดันสูงสุด หรือความดันเฉลี่ยก็ได้
- ความเร็วรอบของเครื่อง
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและช่วงชักของลูกสูบและดิสเพลสเซอร์ในบริเวณขยายตัว การคำนวณโดยอาศัยสมการของซิมิทซ์ จะได้สมการดังนี้  
ปริมาตรขณะมุมใดๆ ของบริเวณขยายตัว

$$V_E = 0.5 V_{SE} (1 + \cos \phi) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริมาตรขณะมุมใดๆ ของบริเวณอัดตัว

$$V_C = 0.5V_{SC} (1 + \cos(\phi - \alpha)) \quad (2.3)$$

ความดันขณะใดๆ

$$p = p_{\max}(1 - \delta) / [1 + \delta \cos(\phi - \theta)] \quad (2.4)$$

เมื่อ

$$\delta = (\tau^2 + K^2 + 2\tau K \cos \alpha)^{1/2} / (\tau + K + 2S) \quad (2.5)$$

$$\theta = \tan^{-1} [K \sin \alpha / (\tau + K \cos \alpha)] \quad (2.6)$$

$$S = 2X\tau / (\tau + 1) \quad (2.7)$$

อัตราส่วนความดัน

$$p_{\max} / p_{\min} = (1 + \delta) / (1 - \delta) \quad (2.8)$$

ความดันเฉลี่ย

$$p_{\text{mean}} = p_{\max} [(1 - \delta) / (1 + \delta)]^{1/2} \quad (2.9)$$

กำลังสุทธิต่อรอบ

$$P = p_{\max} V_T \pi \frac{(1 - \tau)}{(K + 1)} \left( \frac{1 - \delta}{1 + \delta} \right)^{1/2} \frac{\delta \sin \theta}{(1 + (1 - \delta)^{1/2})} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$V_T = (V_E + V_C) = (1 + K)V_E \quad (2.11)$$

กำลังต่อหน่วยมวลของแก๊ส

$$P_{\text{mass}} = \frac{\pi(1 - \tau)(1 + \delta \cos \theta)(\delta \sin \theta)}{(1 - \delta^2)[1 + (1 - \delta^2)^{1/2}][\tau + \frac{K}{2}(1 + \cos \alpha) + S]} \quad (2.12)$$

ประสิทธิภาพทางความร้อน

$$\eta = \left[ \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \right] = (1 - \tau) \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การถ่ายเทความร้อนในบริเวณขยายตัวต่อวัฏจักร

$$Q_E = \pi p_{\text{mean}} V_E \frac{\delta \sin \theta}{1+(1-\delta^2)^{1/2}} \quad (2.14)$$

การถ่ายเทความร้อนในบริเวณอัดตัวต่อวัฏจักร

$$Q_C = \tau Q_E \quad (2.15)$$

สำหรับกรณีใช้เป็นเครื่องทำความเย็น

ความร้อนที่ดึงออกจากการขยายตัวของแก๊ส

$$Q_E = (p_{\text{max}} V_T) \frac{\pi}{(K+1)} \left(\frac{1-\delta}{1+\delta}\right)^{1/2} \frac{\delta \sin \theta}{[1+(1-\delta)^{1/2}]} \quad (2.16)$$

ความร้อนที่ดึงออกต่อมวลของแก๊ส

$$Q_{\text{mass}} = \frac{\pi(1+\delta \cos \theta)\delta \sin \theta}{(1-\delta)^{1/2}(1+(1-\delta^2)^{1/2})\left[\tau+\frac{K}{2}(1+\cos \alpha)+S\right]} \quad (2.17)$$

Coefficient of Performance (COP)

$$\text{COP}_{\text{ref}} = \frac{T_E}{(T_E - T_C)} = \frac{1}{(1-\tau)} \quad (2.18)$$

ความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกจากกระบวนการอัด

$$Q_C = \frac{1}{\tau} Q_E \quad (2.19)$$

กำลังที่ต้องการให้กับเครื่องยนต์

$$P = (1-\tau)Q_E \quad (2.20)$$

เครื่องยนต์กรณีใช้งานเป็นปั๊มความร้อน

ความร้อนจากการอัดต่อวัฏจักร

$$Q_C = (p_{\text{max}} V_T) \frac{\pi \tau}{(K+1)} \left(\frac{1-\delta}{1+\delta}\right)^{1/2} \frac{\delta \sin \theta}{[1+(1-\delta)^{1/2}]} \quad (2.21)$$

ความร้อนจากการอัดต่อมวลของแก๊ส

$$Q_{\text{mass}} = \frac{RT_c \pi(1+\delta \cos \theta)\delta \sin \theta}{(1-\delta)^{1/2}(1+(1-\delta^2)^{1/2})\left[\tau+\frac{K}{2}(1+\cos \alpha)+S\right]} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Coefficient of Performance (COP)

$$\text{COP}_{\text{hp}} = \frac{T_C}{T_C - T_E} = \frac{\tau}{(1-\tau)} \quad (2.23)$$

ความร้อนถ่ายเทเข้าระบบ

$$Q_E = \tau Q_C \quad (2.24)$$

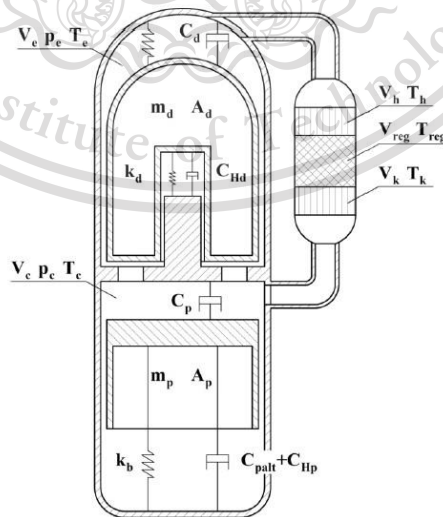
กำลังที่ต้องการให้กับเครื่องยนต์

$$P = Q_C \frac{(1-\tau)}{\tau} \quad (2.25)$$

## 2.7 ทฤษฎีการสั่นสะเทือน

การเคลื่อนที่ของลูกในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระนอกจากจะอาศัยแก๊สสปริงแล้ว ในเครื่องยนต์ส่วนมากยังมีการใส่สปริงกล ( $k_d$ ) เพิ่มเข้าไปดังรูปที่ 2.14 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของลูกสูบจากรูประบบมวล-สปริง ในรูปที่ 2.14 จะทำได้ง่ายขึ้นเมื่อกำหนดการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้งสองเป็นแบบฮาร์มอนิกซึ่งใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่จริง [5] สมการการเคลื่อนที่ของลูกสูบสามารถเขียนในรูปผลรวมของแรงเนื่องจากสปริงและแดมป์โดยไม่คิดอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วงของโลกเพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงข้างต้น [6] จากกฎข้อที่สองของนิวตัน จะได้สมการที่ 2.26

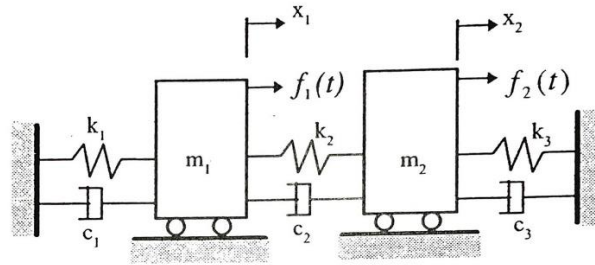
$$F_{\text{spring}} + F_{\text{damping}} = m\ddot{x} \quad (2.26)$$



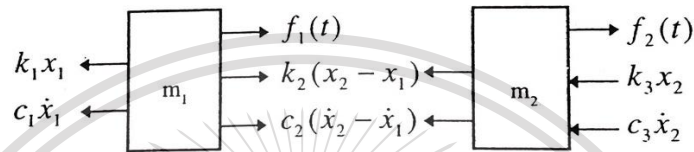
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.14 รูปแสดงระบบมวล-สปริง ของเครื่องยนต์นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก) ระบบระดับความเสรีสองขั้นที่มีตัวหน่วง



(ข) แผนภาพอิสระ

รูปที่ 2.15 ระบบมวล สปริง และแดมป์

ระบบระดับความเสรีสองขั้นที่ประกอบด้วยตัวหน่วงจะพิจารณาได้จากระบบตามรูปที่ 2.15

ถ้าการสั่นสะเทือนเป็นแบบบังคับจะได้สมการของการเคลื่อนที่ของมวล  $m_1$  เป็น

$$-k_1x_1 - C_1\dot{x}_1 + k_2(x_2 - x_1) + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_1(t) = m_1\ddot{x}_1 \quad (2.27)$$

$$m_1\ddot{x}_1 + (C_1 + C_2)\dot{x}_1 - C_2\dot{x}_2 + (k_1 - k_2)x_1 - k_1x_2 = f_1(t)$$

และของมวล  $m_2$  เป็น

$$-k_2(x_2 - x_1) - C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_3x_2 - C_3\dot{x}_2 + f_2(t) = m_2\ddot{x}_2$$

$$m_2\ddot{x}_2 - C_2\dot{x}_1 + (C_2 + C_3)\dot{x}_2 - k_2x_1 + (k_2 - k_3)x_2 = f_2(t) \quad (2.28)$$

จากสมการ (2.27) และ (2.28) จะจัดให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 + C_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{Bmatrix}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

โดยที่  $C_{11} = C_1 + C_2$ ,  $C_{12} = C_{21} = -C_2$ ,  $C_{22} = C_2 + C_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$k_{11} = k_1 + k_2$ ,  $k_{12} = k_{21} = -k_2$ ,  $k_{22} = k_2 + k_3$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ถ้าแรง  $f_1(t)$  และ  $f_2(t)$  เป็นแรงที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันแบบฮาร์มอนิก

$$X_1(t) = X_1 e^{i\omega t} \quad (2.30)$$

$$X_2(t) = X_2 e^{i\omega t}$$

ดังนั้นการตอบสนองแบบสถานะอยู่ตัวจะให้อยู่ในรูปของ

$$X_1(t) = X_1 e^{i\omega t} \quad (2.31)$$

$$X_2(t) = X_2 e^{i\omega t}$$

แทนสมการ (3.4) และ (3.5) ลงในสมการ (3.3) ได้

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 m_1 + i\omega c_{11} + k_{11} & i\omega c_{12} + k_{12} \\ i\omega c_{21} + k_{21} & -\omega^2 m_2 + i\omega c_{22} + k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

หรือ  $[Z(\omega)]\{X\} = \{F\} \quad (2.32)$

การตอบสนองแบบสถานะอยู่ตัวจะหาได้จาก

$$\{X\} = [Z(\omega)]^{-1} \{F\} \quad (2.33)$$

โดยที่

$$[Z(\omega)]^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} z_{22} & -z_{21} \\ -z_{12} & z_{11} \end{bmatrix}}{\det[Z(\omega)]}$$

และ

$$z_{mn} = -\omega^2 m_{mn} + i\omega c_{mn} + k_{mn}; \quad m, n = 1, 2$$

$$m_{12} = m_{21} = 0, \quad m_{11} = m_1, \quad m_{22} = m_2$$

$$\det[Z(\omega)] = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$$

การตอบสนองแบบสถานะอยู่ตัวของมวล  $m_p$  ได้

$$X_1 = \frac{z_{22}F_1 - z_{21}F_2}{z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}} \quad (2.34)$$

และของมวล  $m_d$  เป็น

$$X_2 = \frac{-z_{12}F_1 + z_{11}F_2}{z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}} \quad (2.35)$$

โดยที่  $X_1$  และ  $X_2$  จะแปรเปลี่ยนไปตามความถี่ของตัวขับเคลื่อน ( $\omega$ ) ส่วนความถี่ธรรมชาติของระบบจะมีสองค่าซึ่งจะหาได้จากรากของสมการ

$$\det[Z(\omega)] = 0$$

ในกรณีของระบบที่มีตัวหน่วง มีแอมพลิจูด  $X_1$  และ  $X_2$  ที่เกิดจากความถี่ธรรมชาติของระบบสามารถหาค่า

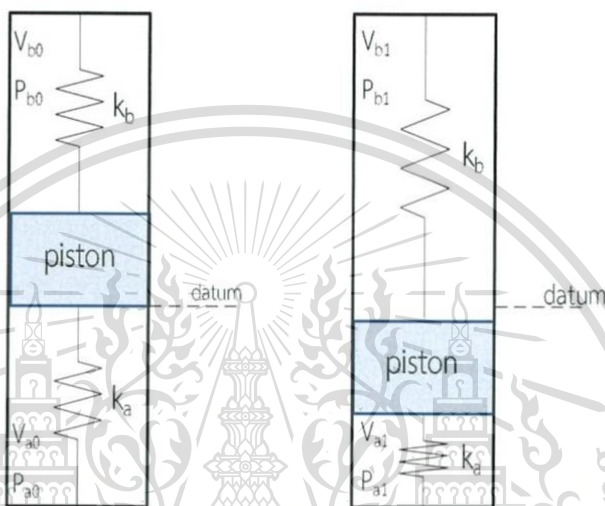
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ได้จะไม่เป็นค่านันต์เหมือนกับระบบที่ไม่มีตัวหน่วง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 แก๊สสปริง

ค่าคงที่ของแก๊สสปริงเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับความดันและปริมาตรเริ่มต้นของระบบ ดังรูปที่ 2.15 เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ออกจากจุดสมดุล จะทำให้เกิดแรงจากแก๊สสปริงกระทำต่อลูกสูบ โดยแรงดังกล่าวจะมากขึ้น ตามระยะห่างของลูกสูบจากจุดสมดุล ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าแก๊สสปริงได้จากสมการที่ 2.27-2.28



รูปที่ 2.16 รูปแสดงค่าคงที่ของแก๊สสปริง

$$k_a = A_p^2 \frac{P_{a1} - P_{a0}}{V_{a1} - V_{a0}} \quad (2.36)$$

$$k_b = A_p^2 \frac{P_{b1} - P_{b0}}{V_{b1} - V_{b0}} \quad (2.37)$$

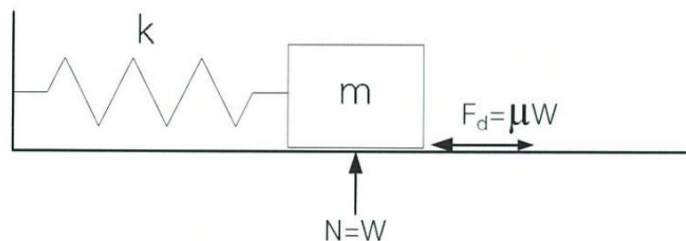
## 2.9 ตัวหน่วงเนื่องจากแรงเสียดทาน

ในการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์ที่มีแรงเสียดทานดังรูปที่ 2.16 การสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่และ equivalent-viscous-damping coefficient สามารถหาได้จากสมการที่ 2.29 และ 2.30 ตามลำดับ [7], [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.17 รูปแสดงแรงเสียดทาน

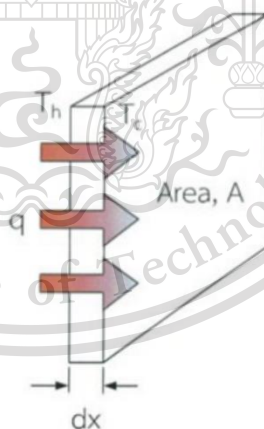
$$E_d = \pi c |x|^2 \omega \quad (2.38)$$

$$c_{eq} = \frac{4F_d}{\pi |x| \omega} \quad (2.39)$$

## 2.10 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นมีหลายชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นการออกแบบเครื่องยนต์จึงต้องคำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนของชิ้นส่วนดังกล่าว เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

### 2.10.1 การนำความร้อน



รูปที่ 2.18 รูปแสดงการนำความร้อน

$$q = kA \frac{dT}{dx} \quad (2.40)$$

เมื่อ

$q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่ถือครองลิขสิทธิ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

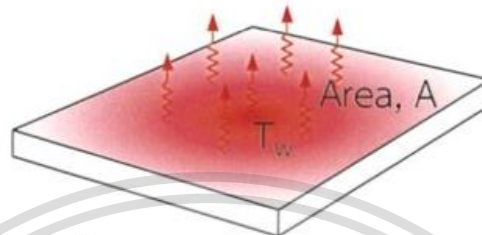
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน

dT คือ ค่าอุณหภูมิที่ต่างกัน

dx คือ ระยะทางการนำความร้อน

### 2.10.2 การนำความร้อน



รูปที่ 2.19 รูปแสดงการพาความร้อน

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.41)$$

เมื่อ

q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

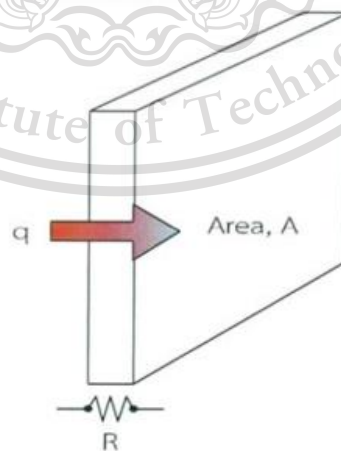
h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน

$T_w$  คือ ค่าอุณหภูมิที่ผิว

$T_\infty$  คือ ค่าอุณหภูมิของไหล

### 2.10.3 ความต้านทานการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 2.20 รูปแสดงความต้านทานการถ่ายเทความร้อน

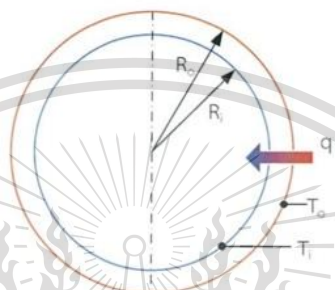
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $R = \frac{\Delta T}{qA} \quad (2.42)$   
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อ  $R$  คือ ค่าความต้านทานความร้อน  
 $Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน  
 $A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน  
 $\Delta T$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ

#### 2.10.4 การนำความร้อนผ่านผิวทรงกลม



รูปที่ 2.21 รูปแสดงการนำความร้อนผ่านผิวทรงกลม

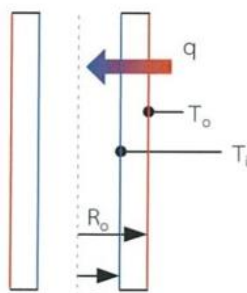
$$q = \frac{4\pi k(T_o - T_i)}{\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_i}}$$

(2.43)

เมื่อ

$q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน  
 $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน  
 $T_i$  คือ ค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านใน  
 $T_o$  คือ ค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านนอก  
 $R_i$  คือ รัศมีพื้นผิวด้านใน  
 $R_o$  คือ รัศมีพื้นผิวด้านนอก

#### 2.10.5 การนำความร้อนผ่านผิวทรงกระบอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.22 รูปแสดงการนำความร้อนผ่านผิวทรงกระบอก  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)} \quad (2.44)$$

เมื่อ

$q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

$k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$L$  คือ ความยาวทรงกระบอก

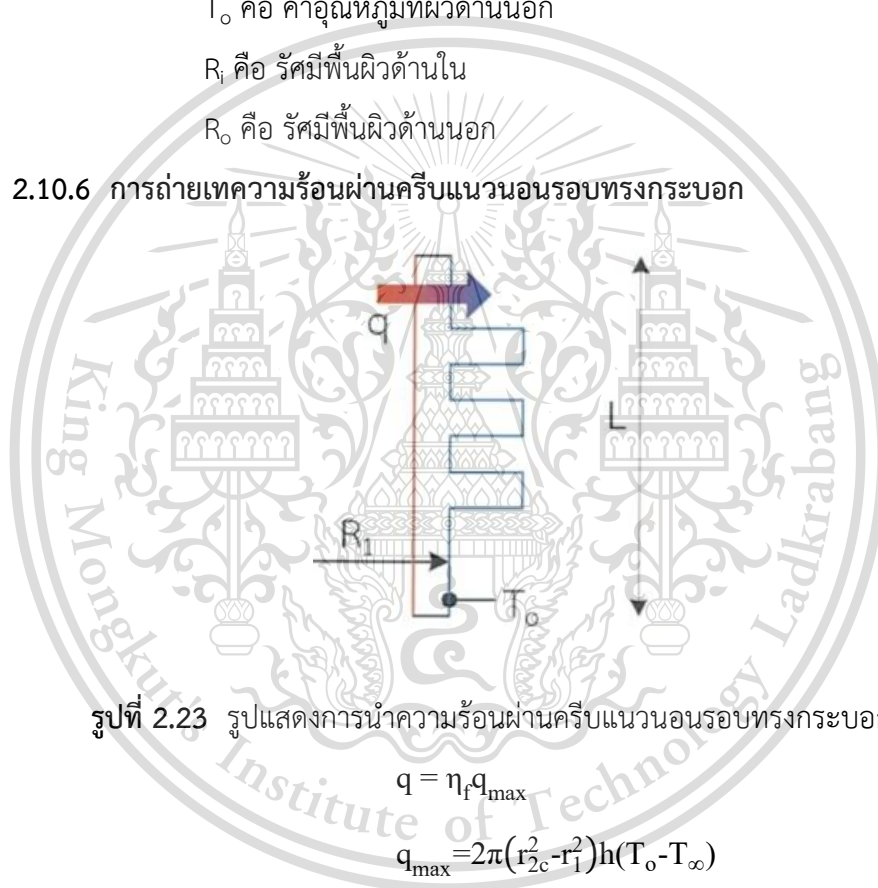
$T_i$  คือ ค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านใน

$T_o$  คือ ค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านนอก

$R_i$  คือ รัศมีพื้นผิวด้านใน

$R_o$  คือ รัศมีพื้นผิวด้านนอก

### 2.10.6 การถ่ายเทความร้อนผ่านครีบนวนรอบทรงกระบอก



รูปที่ 2.23 รูปแสดงการนำความร้อนผ่านครีบนวนรอบทรงกระบอก

$$q = \eta_f q_{\max} \quad (2.45)$$

$$q_{\max} = 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2)h(T_o - T_\infty) \quad (2.46)$$

$$r_{2c} = r_1 + L_c \quad (2.47)$$

$$L_c = L + \frac{t}{2} \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

$\eta_f$  คือ ค่าประสิทธิภาพของครีบ

$r_1$  คือ รัศมีพื้นผิวด้านนอกของทรงกระบอก

$h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$L$  คือ ความยาวทรงกระบอก

$T_o$  คือ ค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านนอก

$T_\infty$  คือ ค่าอุณหภูมิของไหล

$t$  คือ ความหนาของครีบ

### 2.10.7 การถ่ายเทความร้อนผ่านท่อเมื่อฟลักซ์ความร้อนคงที่

ในการณที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = hA_s(T_s - T_m) \quad (2.49)$$

เมื่อ

$Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

$h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$AS$  คือ พื้นที่ผิวท่อ

$T_s$  คือ ค่าอุณหภูมิที่ผิวท่อ

$T_m$  คือ ค่าอุณหภูมิของไหลในท่อ

### 2.10.8 การถ่ายเทความร้อนผ่านท่อเมื่ออุณหภูมิผิวท่อคงที่

$$Q = hA_s(T_s - T_m)_{avg} \quad (2.50)$$

เมื่อ

$Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

$h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$AS$  คือ พื้นที่ผิวท่อ

$(T_s - T_m)_{avg}$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.11 ถังรับแรงดัน

ถังรับแรงดันแบ่งเป็นสองประเภท คือ ถังรับแรงดันผนังบาง และถังรับแรงดันผนังหนา แบ่งตามอัตราส่วนความหนาของผนัง ( t ) กับ รัศมีภายในของผนัง ( r<sub>i</sub> )

$$\text{ถังรับแรงดันผนังบาง} \quad \frac{t}{r_i} \leq \frac{1}{10} \quad (2.51)$$

$$\text{ถังรับแรงดันผนังหนา} \quad \frac{t}{r_i} > \frac{1}{10} \quad (2.52)$$

สำหรับ ถังรับแรงดันผนังบาง โดยทั่วไปแล้ว หน่วยแรงในแนวรัศมี(radian stress หรือ  $\sigma_3$ ) จะ มีค่าน้อยกว่า hoop stress และ longitudinal stress มาก จึงคิดค่าความเค้นเพียง 2 ทิศทาง คือ

Hoop stress

$$\sigma_1 = \frac{Pr_i}{t} \quad (2.53)$$

Longitudinal stress

$$\sigma_2 = \frac{Pr_i}{2t} \quad (2.54)$$

สำหรับ ถังรับแรงดันผนังหนา มีความเค้นทั้ง 3 ทิศทาง ได้แก่

Hoop stress

$$\sigma_1 = \frac{Pr_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left[ 1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right] \quad (2.55)$$

Longitudinal stress

$$\sigma_2 = \frac{Pr_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2.56)$$

Radial stress

$$\sigma_3 = \frac{Pr_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left[ 1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right] \quad (2.57)$$

$\sigma_1$  คือ Hoop stress

$\sigma_2$  คือ Longitudinal stress

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$\sigma_3$  คือ Radial stress

$P_i$  คือ ความดันภายในถึงรับแรงดัน

$r_o$  คือ รัศมีภายนอก

$r_i$  คือ รัศมีภายใน

Von mises stress

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

(2.58)



รูปที่ 2.24 รูปแสดงทิศทางความเค้นหลักในถังรับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 3

# การออกแบบเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง

### 3.1 การออกแบบเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง

การออกแบบเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงจะคำนึงถึงความเหมาะสมของขนาดชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ได้ขนาดพอดีกับขนาดของตัวขับเคลื่อนซึ่งเป็นชิ้นส่วนของปั๊มลมแบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electrical magnetic air compressor) ออกแบบเพื่อใช้งบประมาณในการสร้างที่เหมาะสม ใช้วัสดุที่หาได้ง่ายและราคาไม่สูง เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง ซึ่งเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ ลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ลูกสูบกำลัง กระบอกสูบ ตัวขับเคลื่อน ครีบบระบายความร้อน สปริงระนาบ รีเจนเนอเรเตอร์ และมีส่วนของสารทำงาน 3 ส่วน คือ ปริมาตรส่วนขยาย ปริมาตรส่วนอัด และปริมาตรส่วนรีเจนเนอเรเตอร์ โดยมีเงื่อนไขในการออกแบบตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของส่วนประกอบชิ้นส่วนเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง

ส่วนประกอบ	วัสดุที่ใช้	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	ยาว (มม.)
ลูกสูบกำลัง	ทองเหลือง	20	39
ลูกสูบดิสเพลสเซอร์	ทองเหลือง	19.6	43.32
กระบอกสูบ	ทองเหลือง	20	172.5
ฝาสูบ	สแตนเลส 304	37.6	89.5
ก้านลูกสูบดิสเพลสเซอร์	สแตนเลส 304	3.9	128.96
ส่วนรองรับกระบอกสูบ	เหล็ก SC200	128	25
ส่วนรองรับตัวขับเคลื่อน	เหล็ก SC200	128	70
ส่วนรองรับสปริงระนาบ	เหล็ก SC200	128	68
สปริงระนาบ	สแตนเลส 304	80	-
ครีบบระบายความร้อน	อะลูมิเนียม	-	-

#### 3.1.1 สมมติฐานสำหรับการคำนวณในการออกแบบ

1. อากาศที่ใช้เป็นสารทำงานเป็นก๊าซอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2. อากาศที่ใช้เป็นสารทำงานเป็นอากาศแห้ง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. การไหลของสารทำงานเป็นกรไหลแบบสภาวะคงตัว
4. ค่าความดันขณะใดๆมีค่าเท่ากันทั้งระบบ
5. การเปลี่ยนแปลงแรงของตัวขับเคลื่อนเป็นแบบกราฟไซน์(sin)
6. ไม่คิดการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อน
7. ค่าความดันสูงสุด 5 บาร์

### 3.1.2 การออกแบบฝาสูบ

สิ่งแรกที่ต้องคำนึงในการออกแบบฝาสูบคือความแข็งแรง เนื่องจากมีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูง ในขณะเดียวกันต้องมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีนั้นหมายความว่าต้องออกแบบส่วนฝาสูบให้มีความบางที่สุดแต่ยังแข็งแรงมากพอที่จะรับแรงดันสูงสุดของเครื่องยนต์ได้ เพื่อการกระจายแรงดันตรงยอดฝาสูบจึงออกแบบให้มีลักษณะโค้งมนคล้ายโดม ดังนั้นการออกแบบฝาสูบจึงเลือกใช้วัสดุที่ใช้คือ สแตนเลส ANSI 304L มีค่า yield strength เท่ากับ  $200 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  ความหนาของฝาสูบเพื่อให้สามารถรองรับความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ ได้จากสมการความเค้นแนวตั้งฉากทรงกระบอก  $\sigma_t = \frac{pr}{t}$  ต้องมีความหนาน้อยกว่า 0.047 mm ดังนั้นจึงออกแบบให้มีความหนา 2 mm เพื่อถ่ายต่อสร้างชิ้นงาน และทำการวาดแบบดังรูป 3.1



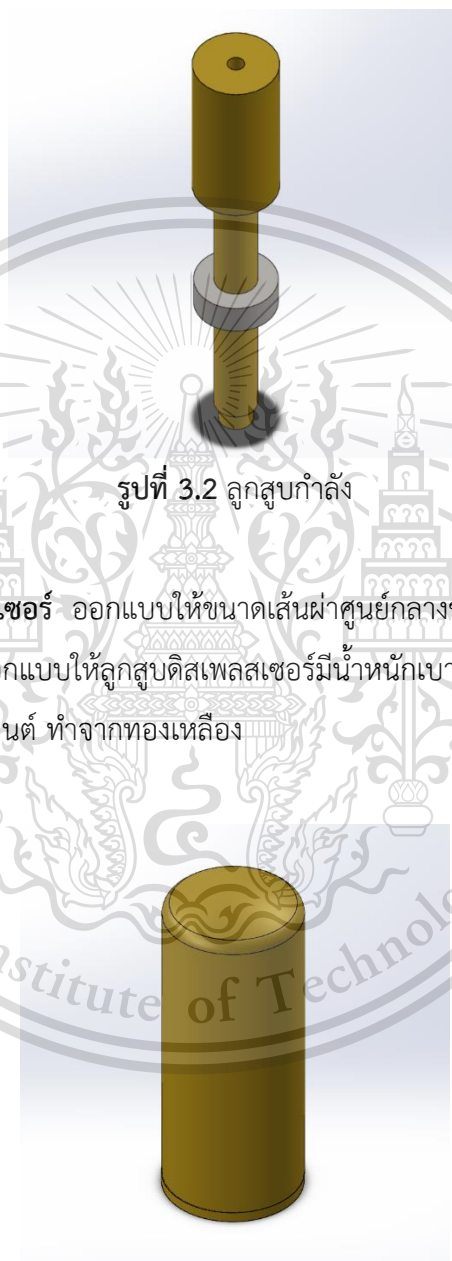
รูปที่ 3.1 ฝาสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**3.1.3 ลูกสูบกำลัง** ทำจากทองเหลือง เพราะต้องการความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา มีผิวเรียบเงา เพื่อลดผลจากแรงเสียดทาน มีขนาดพอดีกับกระบอกสูบ โดยมีการออกแบบให้มีระยะ Clearance ไม่เกิน 0.2 มม.



รูปที่ 3.2 ลูกสูบกำลัง

**3.1.4 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์** ออกแบบให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกสูบควรถัดกว่ากระบอกสูบไม่เกิน 5% เนื่องจากต้องออกแบบให้ลูกสูบดิสเพลสเซอร์มีน้ำหนักเบาจึงต้องทำให้กลวงและมีผนังบาง เพื่อที่จะไม่กินกำลังของเครื่องยนต์ ทำจากทองเหลือง

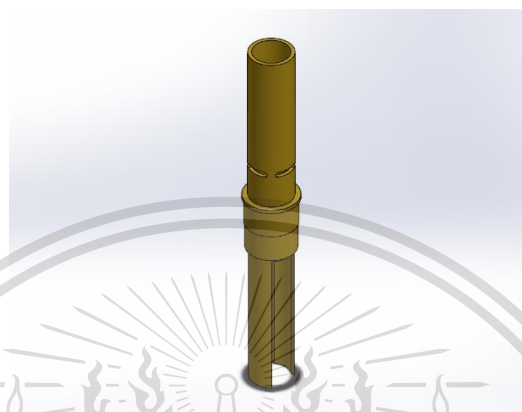
รูปที่ 3.3 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

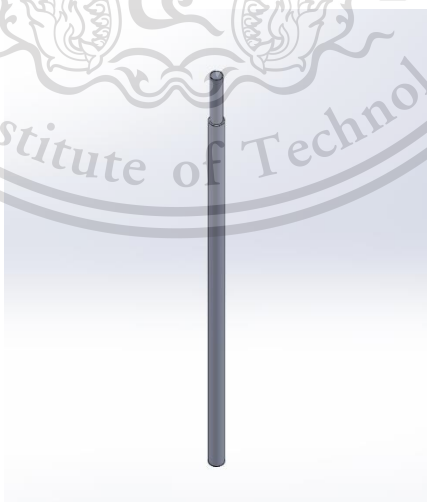
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**3.1.5 กระจกสูบ** ทำจากทองเหลือง การออกแบบกระจกสูบควรใช้โลหะที่มีความแข็งแรงสูง เพราะเป็นชิ้นส่วนที่ถูกเสียดสีอยู่ตลอดเวลาและเพื่อลดการสึกหรอของชิ้นส่วน ด้านในกระจกสูบควรมีผิวเรียบเงา



รูปที่ 3.4 กระจกสูบ

**3.1.6 ก้านลูกสูบดิสเพลสเซอร์** ทำจากสแตนเลส 304 โดยจะออกแบบให้มีน้ำหนักเบา มีขนาดตามชิ้นส่วนนิวมेटริกซ์ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนมาตรฐาน และผิวของก้านลูกสูบดิสเพลสเซอร์ควรมีความเรียบเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างก้านลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังเนื่องจากแกนของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ต้องทะลุผ่านลูกสูบกำลัง



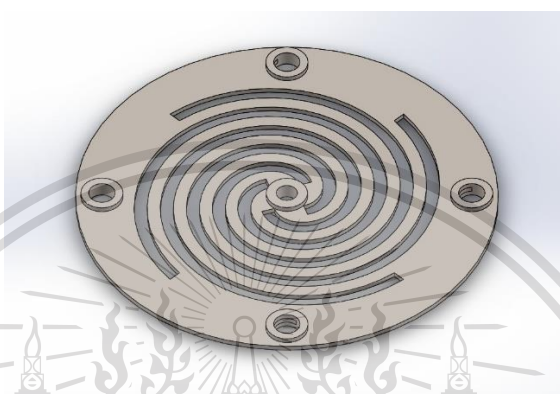
รูปที่ 3.5 ก้านลูกสูบดิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

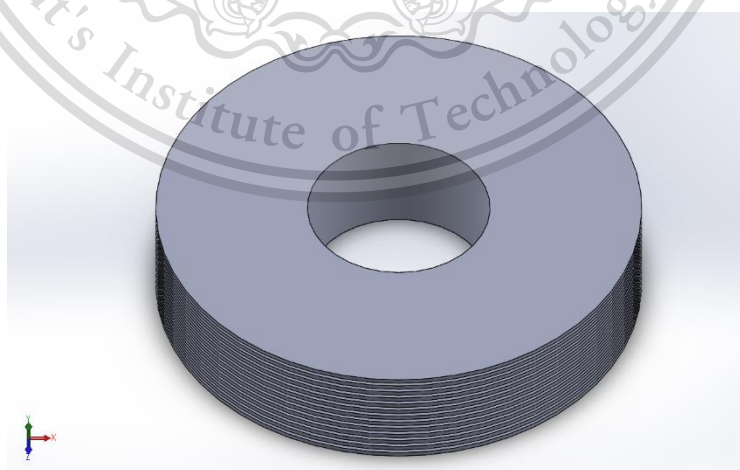
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**3.1.7 สปริงระนาบ** ออกแบบให้มีค่าคงที่ของสปริงที่ต้องการในช่วงการทำงานของเครื่อง  
ตอบสนองได้ในความถี่ที่ต้องการ



รูปที่ 3.6 สปริงระนาบ

**3.1.8 ครีบริบายความร้อน** เนื่องจากส่วนระบายความร้อนมีอุณหภูมิไม่สูงนักจึงต้องการพื้นที่  
จำนวนมากในการแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นครีบริบายความร้อนควรออกแบบให้มีความบาง โดยจะใช้  
แผ่นอลูมิเนียมบางมาพับแล้วซ้อนกันหลายแผ่น เนื่องจากหาได้ง่าย มีราคาถูก นำความร้อนได้ดี และมี  
ความแข็งแรง



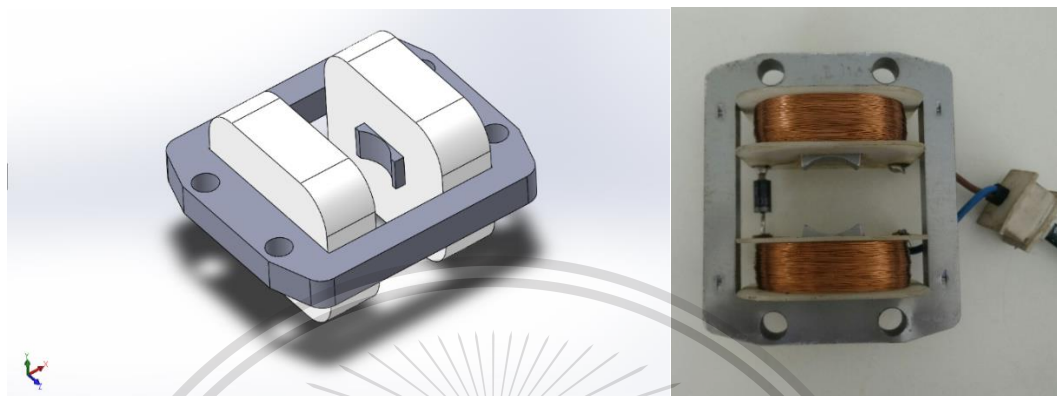
รูปที่ 3.7 ครีบริบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

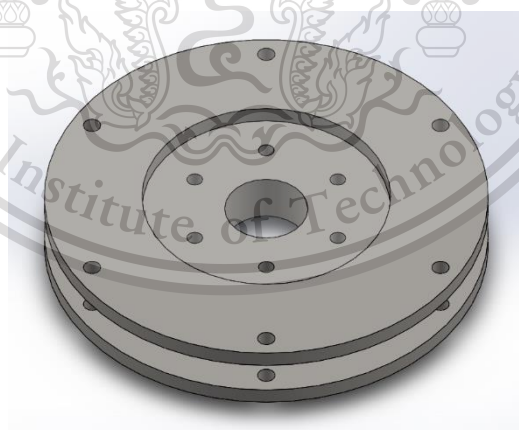
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**3.1.9 ตัวขับเคลื่อน** ใช้ตัวขับเคลื่อนซึ่งเป็นชิ้นส่วนของปั๊มลมแบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electrical magnetic-air compressor) มีความถี่ในการสั่นอยู่ที่ 50 Hz



รูปที่ 3.8 ตัวขับเคลื่อน

**3.1.10 ส่วนโครงสร้าง** โครงสร้างตัวถังประกอบด้วย 3 ชั้นส่วนคือ ส่วนรองรับกระบอกสูบ ส่วนรองรับตัวขับเคลื่อน และ ส่วนรองรับสปริงระนาบ ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงเพราะภายในตัวถังมีการอัดความดันเท่ากับความดันของกระบอกสูบ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบโดยคำนึงถึงการป้องกันการรั่วซึมของตัวถังในการประกอบกันของทั้ง 3 ชั้นส่วน สำหรับวัสดุในการทำชิ้นส่วนตัวถังคือ เหล็ก SC200

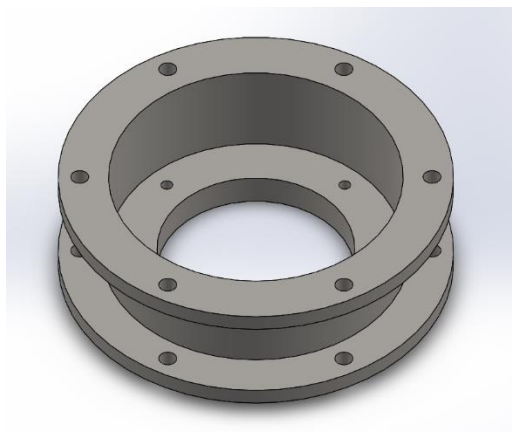


รูปที่ 3.9 ส่วนรองรับกระบอกสูบ

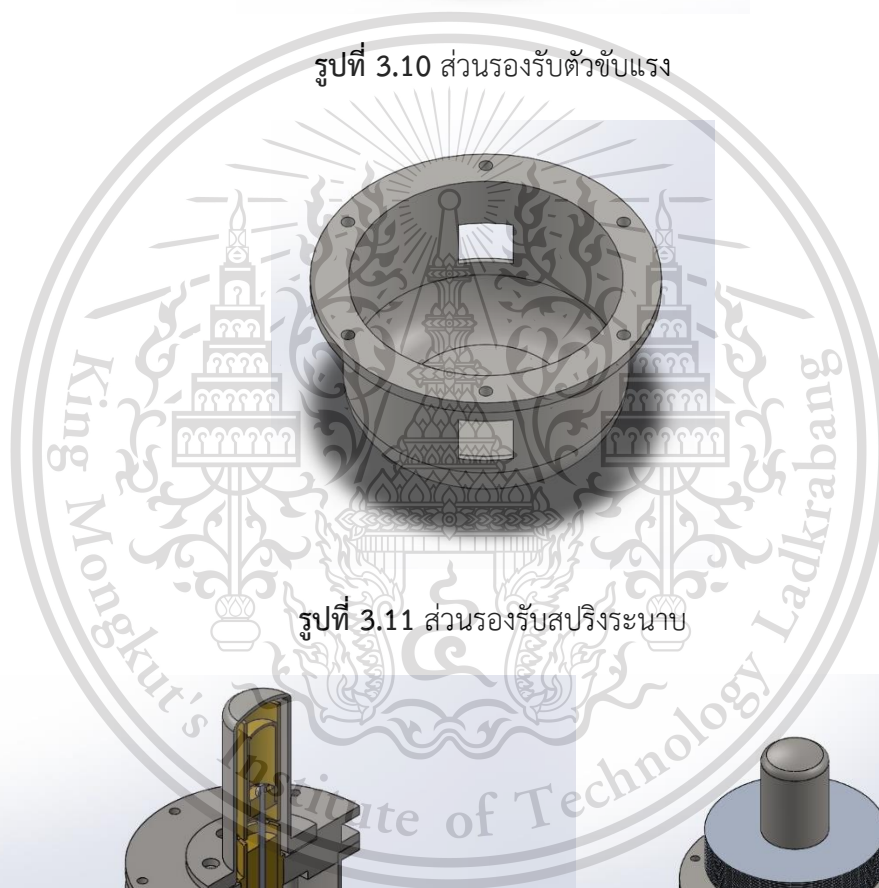
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

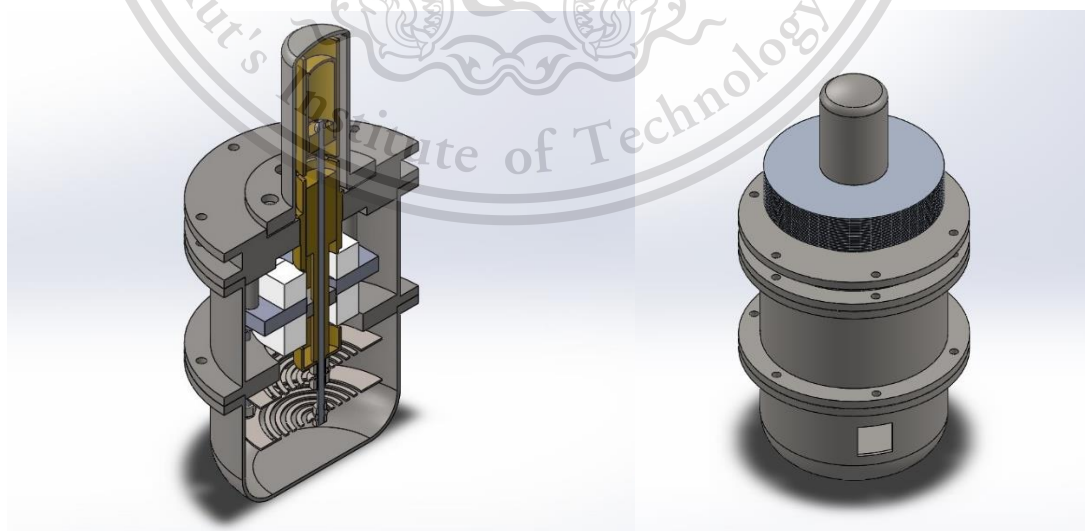
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.10 ส่วนรองรับตัวขับเคลื่อน



รูปที่ 3.11 ส่วนรองรับสปริงระนาบ



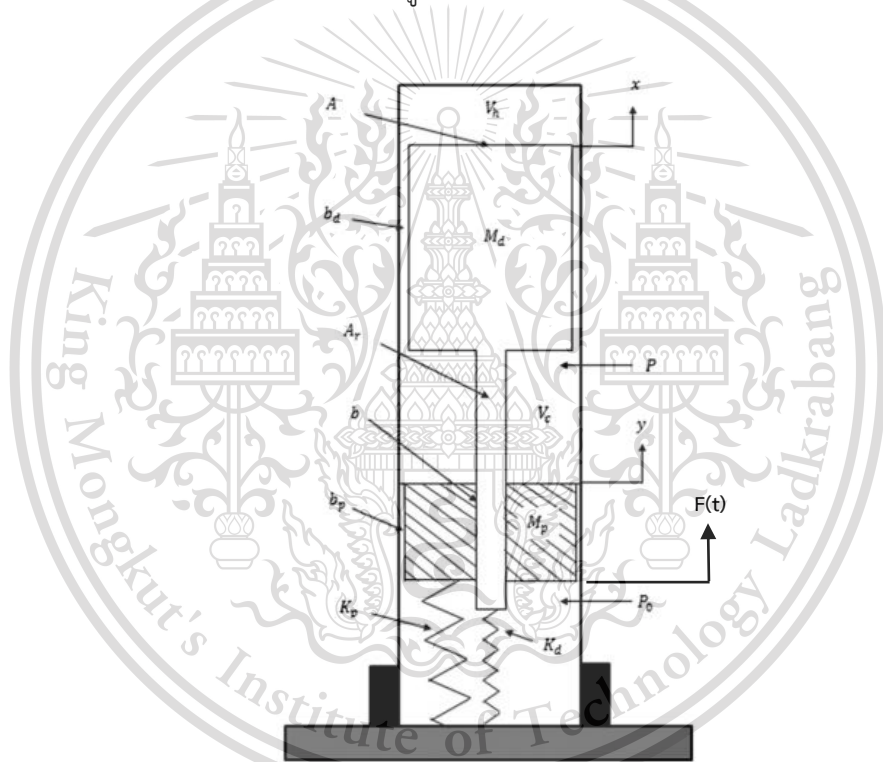
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.2 การวิเคราะห์ความถี่ของเครื่องยนต์

เครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ ทำงานด้วยแก๊สที่บรรจุภายในเครื่องยนต์ทำหน้าที่เป็นสารทำงาน มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ 2 ชิ้น คือลูกสูบกำลังและลูกสูบดิสเพลสเซอร์ โดยมีแรงขับจากตัวขับแรงไฟฟ้า ขับให้ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความดันของสารทำงานภายในเครื่องยนต์ แก๊สภายในเครื่องยนต์มีพฤติกรรมเหมือนสปริงและแดมป์ และในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระส่วนมากจะเพิ่มสปริงกลเข้ามาเพื่อช่วยให้การเคลื่อนที่ของลูกสูบมีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถ วิเคราะห์ได้ว่าการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้งสองเป็นการสั่นแบบบังคับที่มีตัวหน่วงที่ระดับความเสรีสองชั้น (2DOF) ดังรูปที่ 3.13

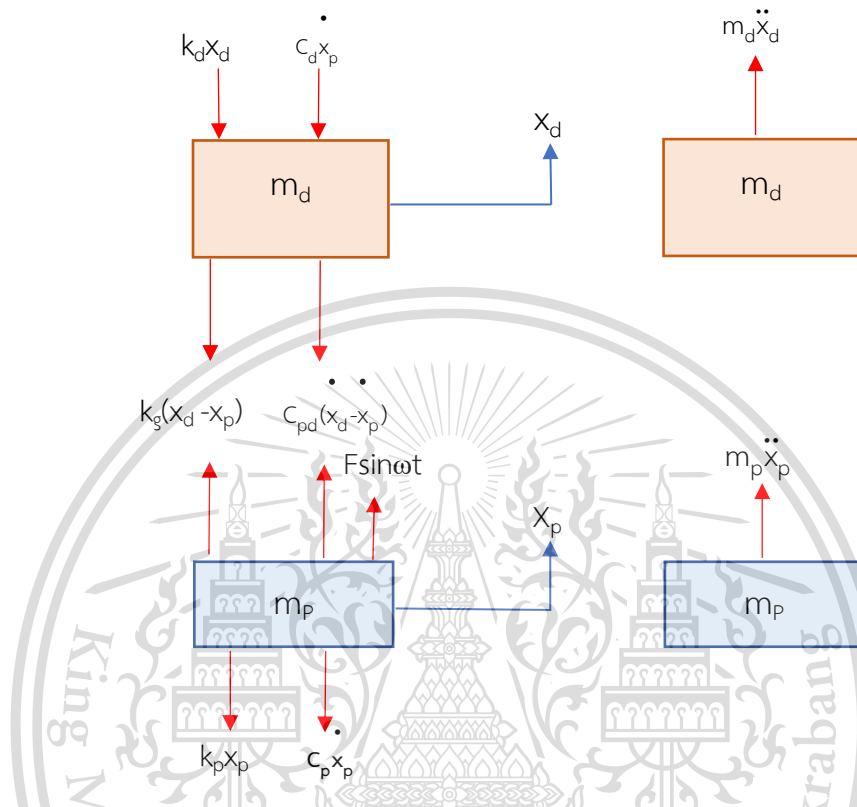


รูปที่ 3.13 รูปแสดงระบบของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.14 แผนภาพอิสระของลูกสูบติสเพลสเซอร์ และ ลูกสูบกำลัง

เมื่อทำการวิเคราะห์แผนผังอิสระ(FBD)ของลูกสูบติสเพลสเซอร์ และ ลูกสูบกำลังจะได้สมการ

ดังนี้

สมการการเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลัง ( $m_p$ )

$$\begin{aligned}
 -k_p x_p - C_p \dot{x}_p + k_g(x_d - x_p) + C_{pd}(\dot{x}_d - \dot{x}_p) + f(t) &= m_p \ddot{x}_p \\
 m_p \ddot{x}_p + (C_p + C_{pd})\dot{x}_p - C_{pd}\dot{x}_d + (k_p - k_g)x_p - k_g x_d &= f(t)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

สมการการเคลื่อนที่ของลูกสูบติสเพลสเซอร์ ( $m_d$ )

$$\begin{aligned}
 -k_g(x_d - x_p) - C_{pd}(\dot{x}_d - \dot{x}_p) - k_d x_d - C_d \dot{x}_d &= m_d \ddot{x}_d \\
 m_d \ddot{x}_d - C_{pd}\dot{x}_p + (C_{pd} + C_d)\dot{x}_d - k_g x_p + (k_g - k_d)x_d &= 0
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

จากสมการ (3.1) และ (3.2) จะจัดให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} m_p & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{x}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_p + C_{pd} & -C_{pd} \\ -C_{pd} & C_{pd} + C_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_p + k_g & -k_g \\ -k_g & k_g + k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_p \\ x_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f(t) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

หรือ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\begin{bmatrix} m_p & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{x}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_p \\ x_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

โดยที่  $C_{11} = C_p + C_{pd}$ ,  $C_{12} = C_{21} = -C_{pd}$ ,  $C_{22} = C_{pd} + C_d$   
 $k_{11} = k_p + k_g$ ,  $k_{12} = k_{21} = -k_g$ ,  $k_{22} = k_g + k_d$

เนื่องจากเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนไฟฟ้า มีความถี่ 50 เฮิร์ต หรือ 314.16 rad/s ซึ่งเป็นความถี่ที่สูงมาก เนื่องจากการกำหนดขนาดของเครื่องทำความเย็นไว้เบื้องต้น มวลลูกสูบกำลังและมวลลูกสูบดิสเพลสเซอร์จึงไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ ระบบมวล-สปริงที่ออกแบบไม่สามารถมีแอมพลิจูดการสั่นที่ต้องการได้ที่มีความถี่ 50 เฮิร์ต ดังนั้นในการศึกษานี้จึงต้องออกแบบค่าคงที่สปริงของลูกสูบกำลังและลูกสูบดิสเพลสเซอร์เพื่อให้ได้ความถี่เครื่องยนต์สูงสุดโดยที่มีแอมพลิจูดการสั่นตามที่ออกแบบไว้ และใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในการปรับความถี่ทางไฟฟ้าของตัวขับเคลื่อนเพื่อให้ตรงกับความถี่ของเครื่องยนต์ ขั้นตอนการวิเคราะห์ความถี่เครื่องยนต์ตามรูปที่ 3.15 โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้

ตัวแปรต้น : ความดันเริ่มต้นของเครื่องยนต์ , มวลลูกสูบกำลัง , มวลลูกสูบดิสเพลสเซอร์

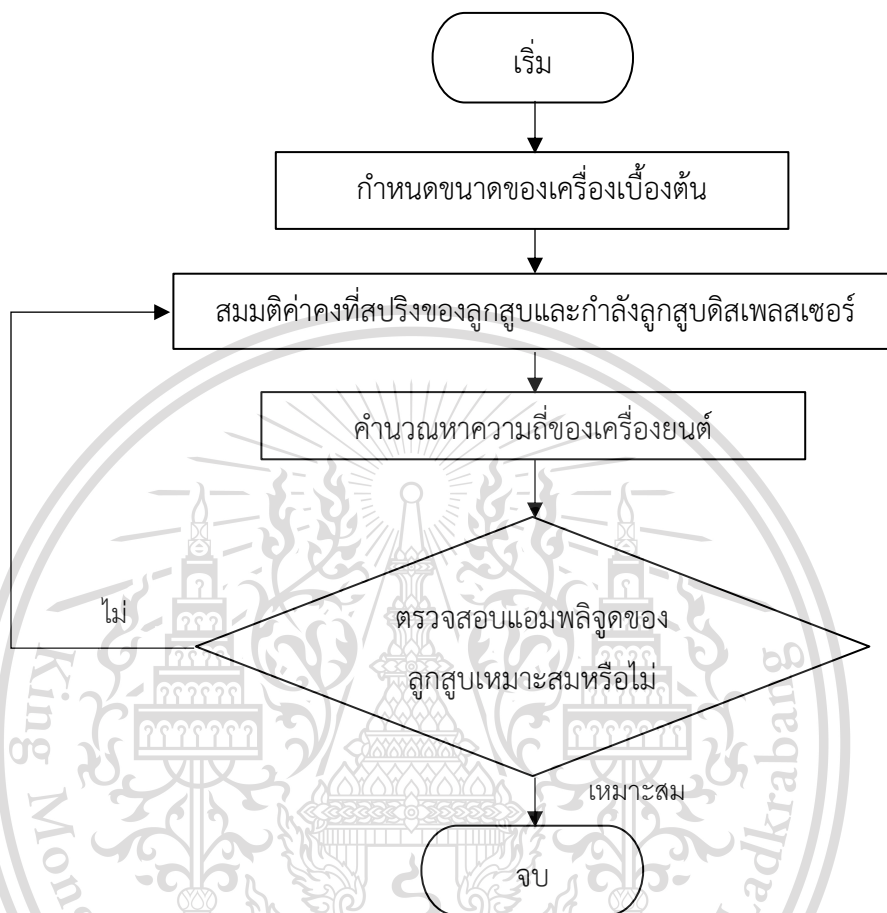
ตัวแปรตาม : ค่าคงที่สปริงของลูกสูบกำลัง , ค่าคงที่สปริงของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ ,  
ความถี่ของเครื่องยนต์ , แอมพลิจูดของการสั่น

ตัวแปรควบคุม : ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของลูกสูบดิสเพลสเซอร์ไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ,  
เครื่องยนต์มีสภาวะการทำงานที่มีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.15 แผนผังการวิเคราะห์ความถี่ของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

# การวิเคราะห์เครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง

### 4.1 การวิเคราะห์วัฏจักรการเคลื่อนที่ของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง

#### 4.1.1 สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์

1. สารทำงานมีคุณสมบัติเปรียบเสมือนแก๊สอุดมคติ
2. มวลของสารทำงานคงที่ ไม่มีการรั่วไหล
3. ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นไซน์
4. สารทำงานอยู่ในสภาวะคงตัว
5. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้งสองคงที่
6. ไม่มีการสูญเสียความดันเนื่องจากแรงเสียดทานของเครื่อง

#### ตารางที่ 4.1 ตารางค่าตัวแปรต่างๆของเครื่องยนต์

ตัวแปร	ค่า
ชนิดเครื่องยนต์	ลูกสูบอิสระ
สารทำงาน	อากาศ
การระบายความร้อน	อากาศ
มวลของลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์	68.96 กรัม
มวลของลูกสูบกำลัง	103.26 กรัม
ความดันเฉลี่ยเครื่องยนต์	500kPa
อุณหภูมิด้านขยาย	263K
อุณหภูมิด้านอัด	333K
ปริมาตรส่วนขยาย	6.28 ลบ.ซม.
ปริมาตรส่วนอัด	3.01 ลบ.ซม.
ขนาดของลูกสูบทั้งสอง	20 มม.
ระยะการเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลัง	10 มม.
ระยะการเคลื่อนที่ของลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์	20 มม.
ความถี่ของตัวขับเคลื่อน	50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเคลื่อนที่ของลูกสูบจะเป็นไปตามรูปที่ 3.13 ซึ่งเราจะนำมาวิเคราะห์ห้วงจักรของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง โดยจะเขียนได้สมการดังนี้

สมการการเคลื่อนที่ของลูกสูบ

$$x = X_d \cdot \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

$$y = Y_p \cdot \sin(\omega t - \pi/2) \quad (4.2)$$

ปริมาตรขณะมุมใดๆ ของบริเวณขยายตัว

$$V_h = 0.5V_{h0} - (Ax) + V_d \quad (4.3)$$

ปริมาตรส่วนรีเจนเนอเรเตอร์เราเลือกใช้ปริมาตรเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ เพราะ

ปริมาตรขณะมุมใดๆ ของบริเวณอัดตัว

$$V_c = (0.5V_{c0} - (A - A_r)y) + (0.5V_{h0} + (A - A_r)x) \quad (4.4)$$

ปริมาตรรวม

$$V = V_h + V_c + V_{reg} + V_d \quad (4.5)$$

$V_{reg}$  คือ ปริมาตรส่วนรีเจนเนอเรเตอร์ จะใช้ปริมาตรคำนวณเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ เพราะ

ปริมาตรส่วนนี้จะมีพอยอะลูมิเนียมอยู่ภายในด้วยจึงประมาณว่าพอยที่ใส่มีปริมาตร 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรส่วนรีเจนเนอเรเตอร์

$V_d$  คือ ปริมาตรตายของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิง

มวลของอากาศ

$$M = P_0 V / RT_0 \quad (4.6)$$

ความดันขณะใด ๆ

$$P_1 = P_0 - [(C_2(A - A_r) - C_1A) \cdot x] + (C_2 \cdot (A - A_r)y) \quad (4.7)$$

โดยค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  มีค่าเท่ากับ

$$C_1 = MR \left( \frac{V_{h0}}{T_h} + \frac{V_{c0}}{T_c} + \frac{V_{reg} \ln(T_h/T_c)}{(T_h - T_c)} \right) - 2 \left( \frac{1}{T_h} \right) \quad (4.8)$$

$$C_2 = MR \left( \frac{V_{h0}}{T_h} + \frac{V_{c0}}{T_c} + \frac{V_{reg} \ln(T_h/T_c)}{(T_h - T_c)} \right) - 2 \left( \frac{1}{T_c} \right) \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เนื่องจากการคำนวณในสมการที่เกี่ยวข้องนั้นมีความซับซ้อนจึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรมMATLAB เพื่อนำมาช่วยในการคำนวณและสร้างกราฟให้แสดงค่าได้อย่างละเอียดในแต่ละจุด การเขียนโค้ดของโปรแกรมนั้นจะเป็นไปตามนี้

```
clear all
D=20; %Displacer diameter,mm
strokeD=20; % stroke of displacer ,mm
strokeDP=10;% stroke of piston , mm
A=pi*(D^2)/4; %displacer cross section area,mm^2
Drod=4;
Ar=pi*(Drod^2)/4;
Vh0=A*strokeD;
Vc0=(A-Ar)*strokeDP;
Vd=A*1;
Areg=pi*(40^2-26^2)/4;
Vreg=Areg*66.5*0.5; % Vreg 50 percent
Xd=10; % Amplitude of displacer ,mm
Yd=5; % Amplitude of power piston ,mm
t=0:0.0001:0.02; %for 1 loop / 1 cycle
f=50; %engine frequency ,Hz
w=2*pi*f;
x=Xd*sin(w*t); %motion of displacer
y=Yd*sin(w*t-pi/2); %motion of power piston
Vh=Vh0/2-A*x+Vd;
Vc=(Vc0/2-(A-Ar)*y)+(Vh0/2+(A-Ar)*x);
V=Vh+Vc+Vreg+Vd;

Rair=287;%j/kg*k
T0=(273+25);%k
P0=500000; %pa
M=(P0*(V(1))*10^-6)/(Rair*T0);%kg

Texp=(273.15-10); %temp of expansion
Tcom=(273.15+60); %temp of compression

C1=M*Rair*((Vh0/Texp)+(Vc0/Tcom)+(Vreg*log(Texp/Tcom)/log(exp(1))*(Texp-Tcom))^-2)*(1/Texp);
C2=M*Rair*((Vh0/Texp)+(Vc0/Tcom)+(Vreg*log(Texp/Tcom)/log(exp(1))*(Texp-Tcom))^-2)*(1/Tcom);

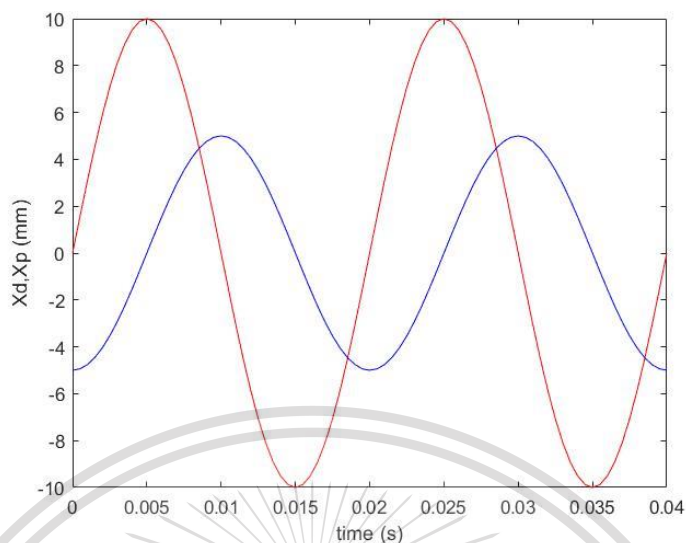
P1=P0-((C2*(A-Ar)-C1*A)*x)+(C2*(A-Ar)*y);
W=trapz(V,P1)
Qe=trapz(Vh,P1)
Qc=trapz(Vc,P1)

figure
plot(t,x,'r',t,y,'b'),xlabel('time (s)'),ylabel('Xd,Xp (mm)')
figure
plot(t,Vh,'r',t,Vc,'b'),xlabel('time (s)'),ylabel('Vh,Vc (mm^3)')
figure
plot(V,P1),xlabel('Volume (mm^3)'),ylabel('Pressure (Pa)')
figure
plot(t,P1),xlabel('time (s)'),ylabel('Pressure (Pa)')
figure
plot(t,V),xlabel('time (s)'),ylabel('Volume (mm^3)')
```

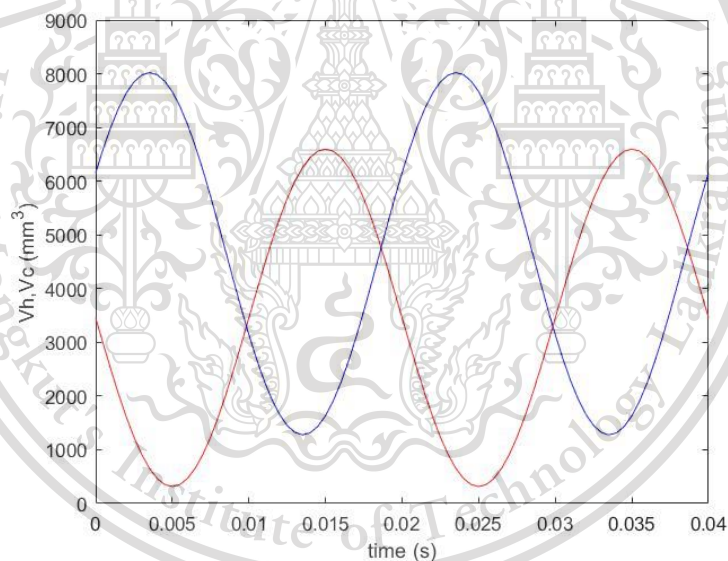
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตามขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลัง (สีแดง) และลูกสูบดีสเพลสเซอร์ (สีน้ำเงิน)

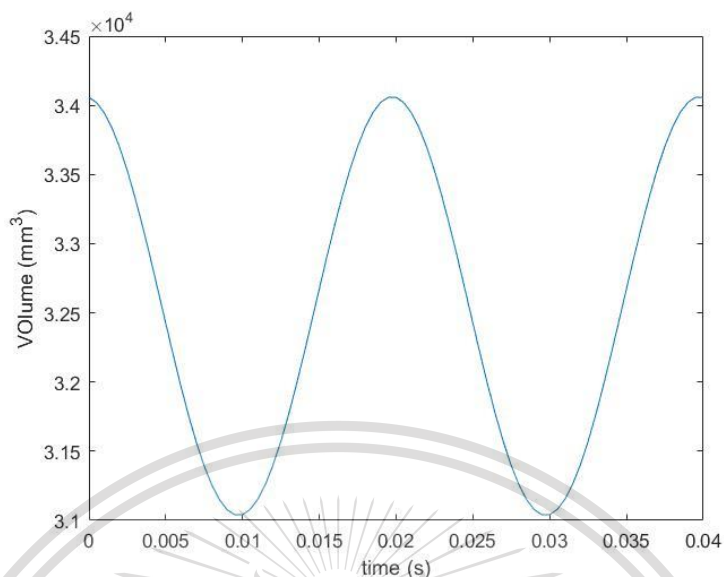


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงปริมาตรส่วนขยาย(สีแดง) และปริมาตรส่วนอัด (สีน้ำเงิน)

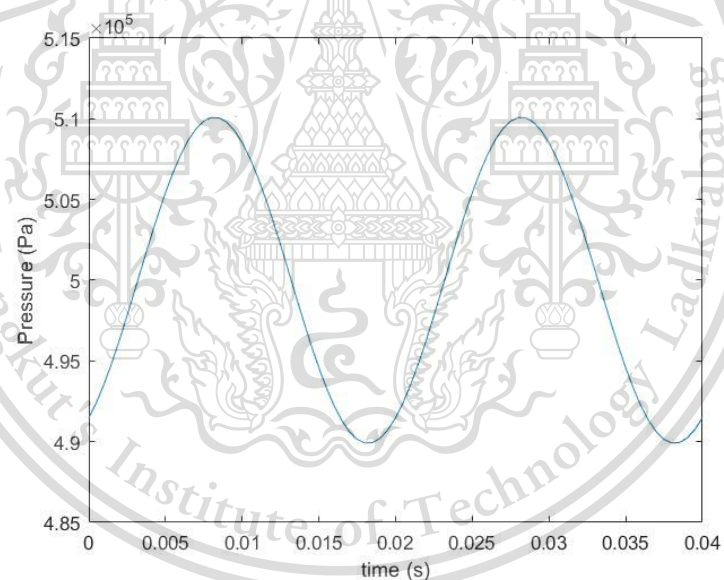
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงปริมาตรรวม

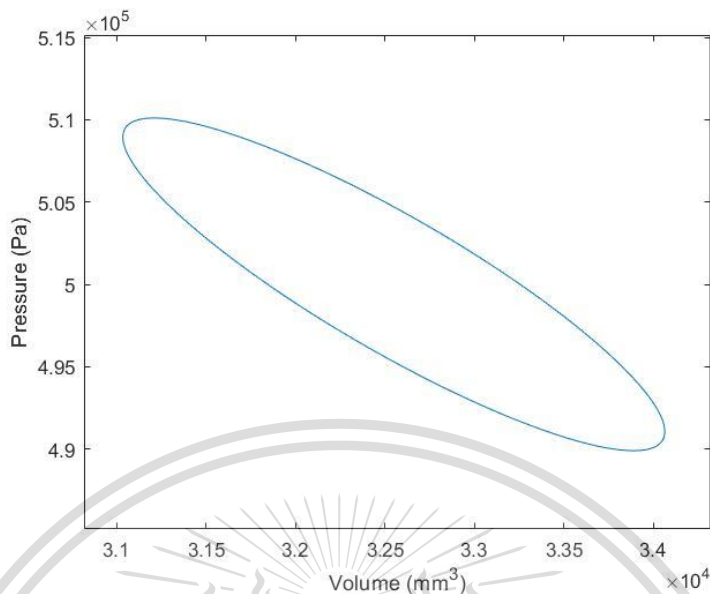


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 กราฟ P-V diagram

จากกราฟที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมMATLAB จะทำให้ทราบค่าต่างๆตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมMATLAB

ตัวแปรที่หาได้	ค่า
ค่าความดันสูงสุด	510.1 kPa
ค่าความดันต่ำสุด	489.9 kPa
ปริมาตรรวมสูงสุด	3.406e-5 m <sup>3</sup>
ปริมาตรรวมต่ำสุด	3.104e-5 m <sup>3</sup>
ความร้อนส่วนขยาย	8.4048 J
ความร้อนส่วนอัด	-10.641 J
งานสุทธิของวัฏจักร	-2.2362 J
COP	3.76

จะเห็นได้ว่างานสุทธิที่ได้มีค่าติดลบ ซึ่งหมายความว่าเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงนี้จะต้องป้อนงาน 2.2362 จูลต่อ1รอบการทำงาน เพื่อที่จะทำให้เครื่องทำความเย็นได้โดยงานที่ป้อนเข้าไปเกิดจากตัวขับเคลื่อนที่ส่งกำลังทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่และทำงานเป็นวัฏจักร เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

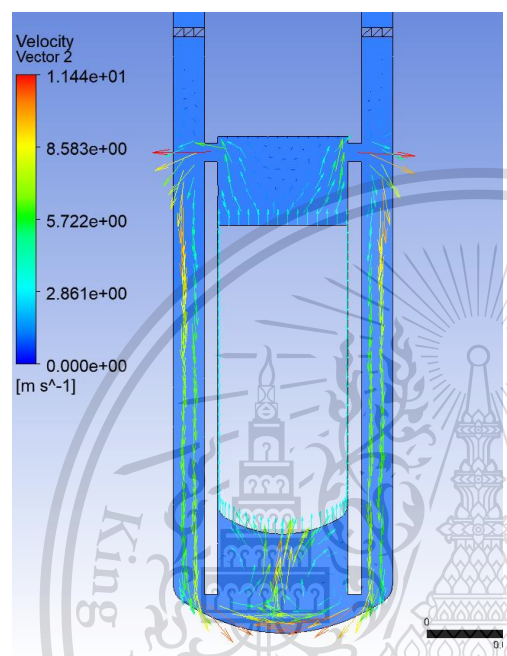
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

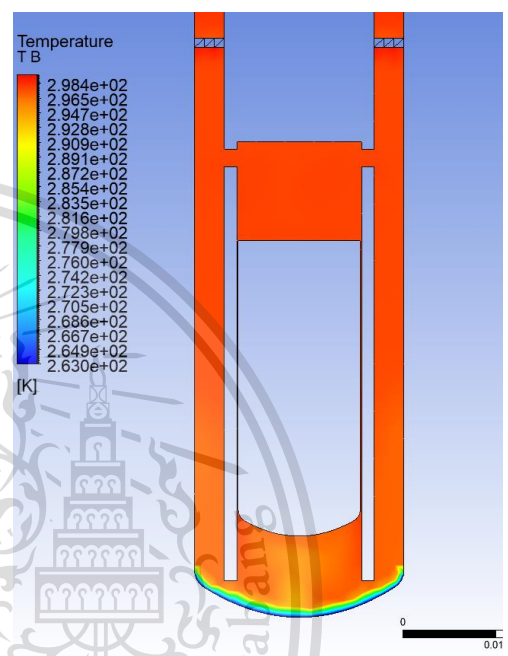
## 4.2 การวิเคราะห์สารทำงานโดยวิธีสร้างแบบจำลองจากโปรแกรม Ansys

### 4.2.1 การวิเคราะห์ทิศทางการไหลและความเร็วของสารทำงาน

ทิศทางการไหลของสารทำงานมีความเร็วมากที่สุด 14.44 เมตรต่อวินาทีในแต่ละรอบ และมีทิศทางการไหลที่ค่อนข้างดี ไม่มีการรั่วซึมของก๊าซจากพื้นที่ทำงานลงไปยังพื้นที่ตีกลับ (Bounce Space)



รูปที่ 4.6 แบบจำลองทิศทางการไหลของสารทำงาน



รูปที่ 4.7 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน

### 4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน

การถ่ายเทความร้อนโดยใช้อากาศเป็นก๊าซทำงานและจำลองเป็นก๊าซในอุดมคติ มีลักษณะที่ดี ก๊าซสามารถนำความร้อนจากปลายกระบอกสูบถ่ายเทไปยังครีบบระบายความร้อนได้

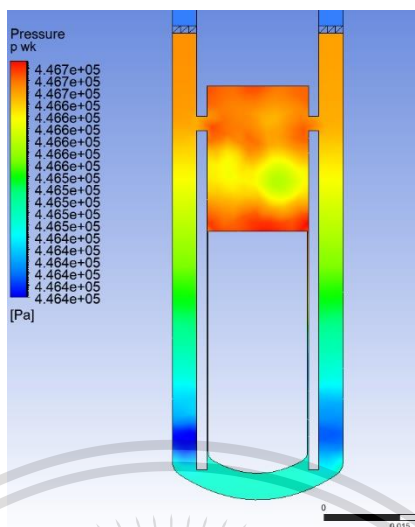
### 4.2.3 การวิเคราะห์ความดันภายในกระบอกสูบ

ความดันเริ่มต้นของกระบอกสูบคือ 0.5 MPA เมื่อลูกสูบกำลังและลูกสูบไล่อัดตัวความดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อลูกสูบกำลังเคลื่อนตัวถอยออกมาจากผลของสปริง ความดันจะลดลงเป็นไปสมการ ก๊าซอุดมคติ ดังนั้นการออกแบบเครื่องทำความเย็นดังกล่าวเป็นไปได้ในทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 แบบจำลองความดันในกระบอกสูบ

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนเครื่องยนต์

การออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องทำความเย็นสเตอร์ลิงจำเป็นต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของวัสดุเนื่องจากการอัดความดันภายในเครื่องยนต์ เพื่อเพิ่มปริมาณการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องยนต์ จากหัวข้อการออกแบบชิ้นส่วนรับความร้อนและชิ้นส่วนโครงสร้างได้คำนวณและออกแบบ จากนั้นจึงได้ทำการจำลองชิ้นส่วนเครื่องยนต์ภายใต้แรงดันโดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid Works ได้ผลจากการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.10-4.113

##### 4.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ชิ้นส่วนฝาสูบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก รัศมีภายใน 16.8 มม. มีความหนา 2 มม. มีอัตราส่วน

$$\frac{t}{r_i} = \frac{2}{16.8} = 0.119 \text{ ชิ้นส่วนฝาสูบเป็น thick-wall cylinder และมีการอัดความดัน 5 บาร์ เมื่อ}$$

พิจารณาที่ ผิวด้านในทรงกระบอก ความเค้นทั้ง 3 ทิศทาง เป็น  $\sigma_h = 4.46 \text{ MPa}$  ,

$\sigma_l = 1.98 \text{ MPa}$  ,  $\sigma_r = -0.5 \text{ MPa}$  จะได้ค่า Von Mises stress เท่ากับ 4.29 MPa ซึ่งมีค่า

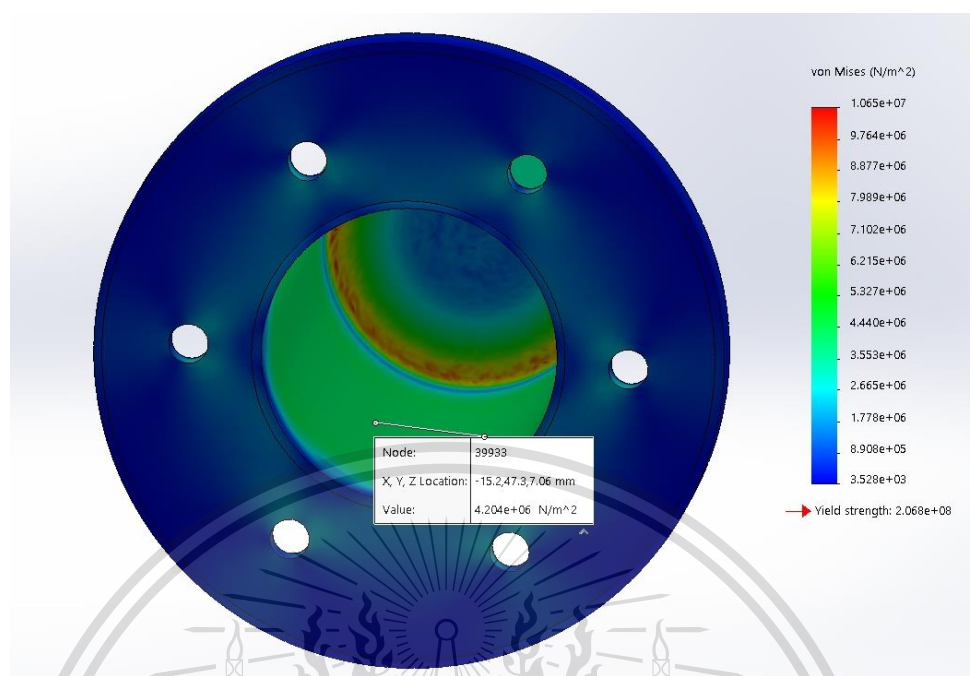
ใกล้เคียงกับผลการจำลองในโปรแกรม ดังรูปที่ 4.9 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน 2 % ดังนั้นผล

การจำลองจากโปรแกรมข้างต้นมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

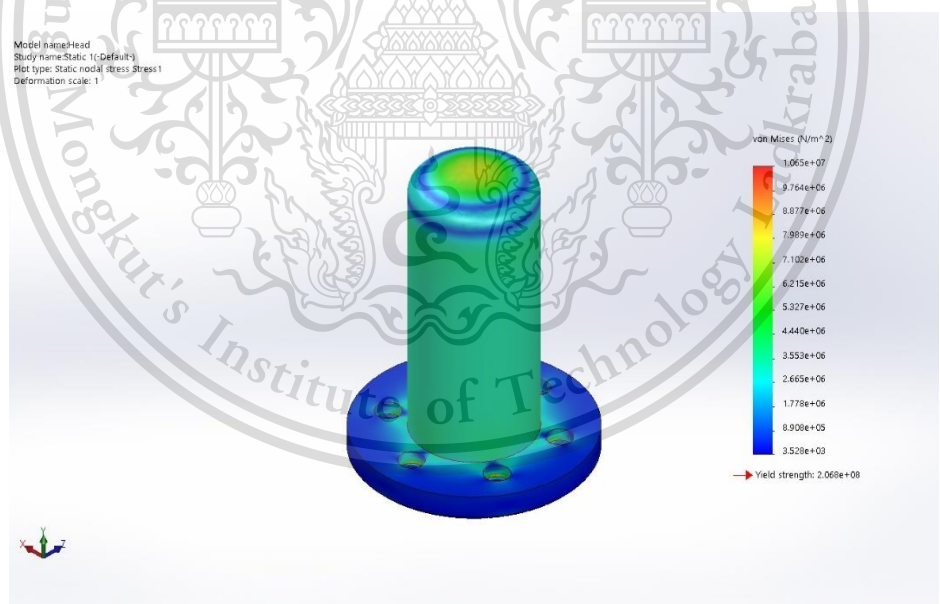
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.9 รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นชิ้นส่วนฝาสูบภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์

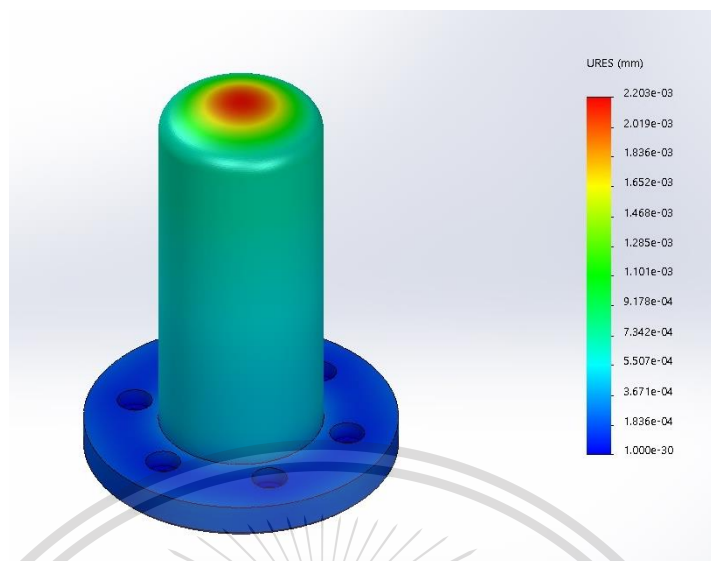


รูปที่ 4.10 รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นชิ้นส่วนฝาสูบภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์

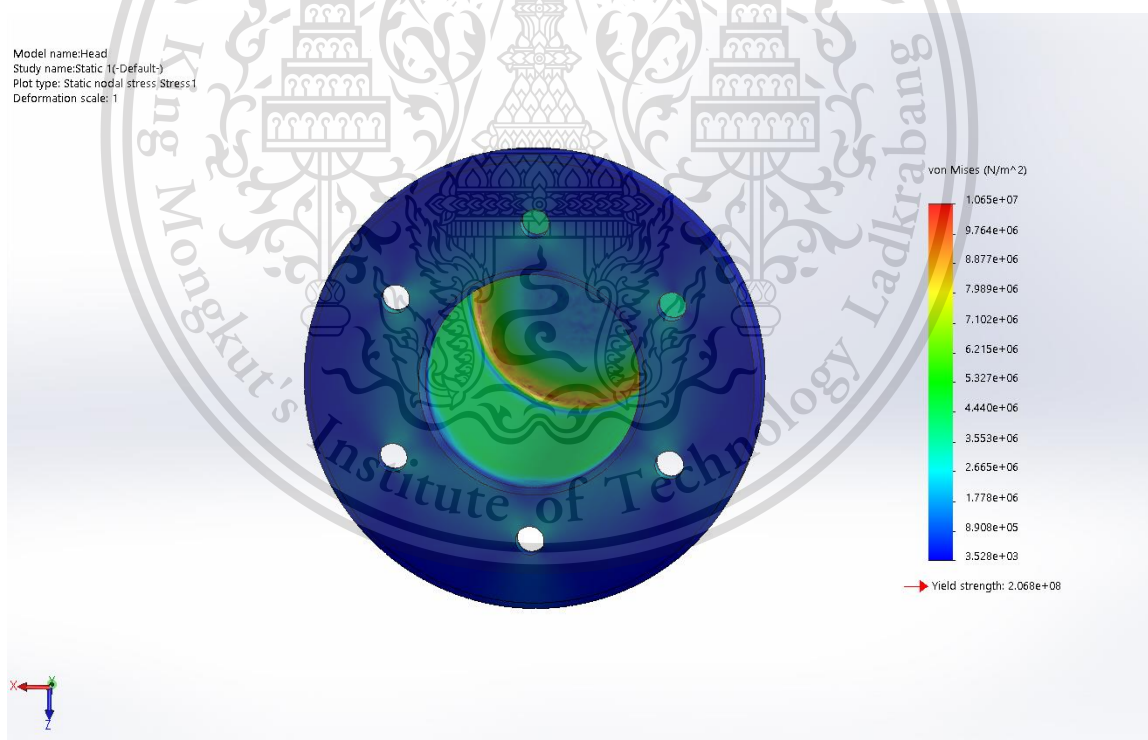
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.11 รูปแสดงผลการวิเคราะห์ Displacement ชิ้นส่วนฝาสูบภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์

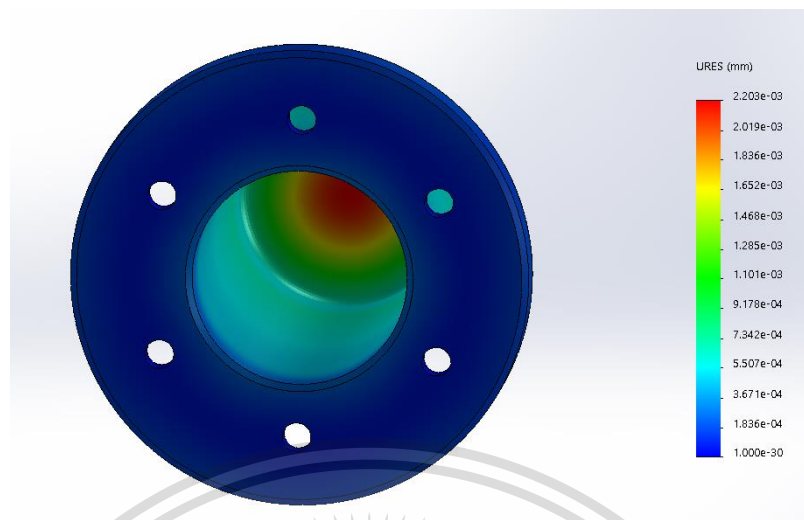


รูปที่ 4.12 รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นชิ้นส่วนฝาสูบภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์

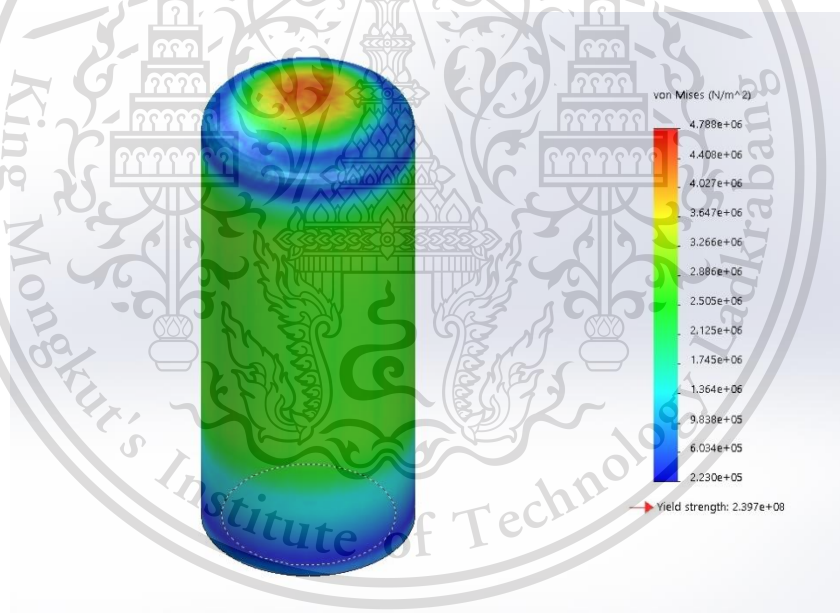
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.13 รูปแสดงผลการวิเคราะห์Displacementชิ้นส่วนฝาสูบภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์

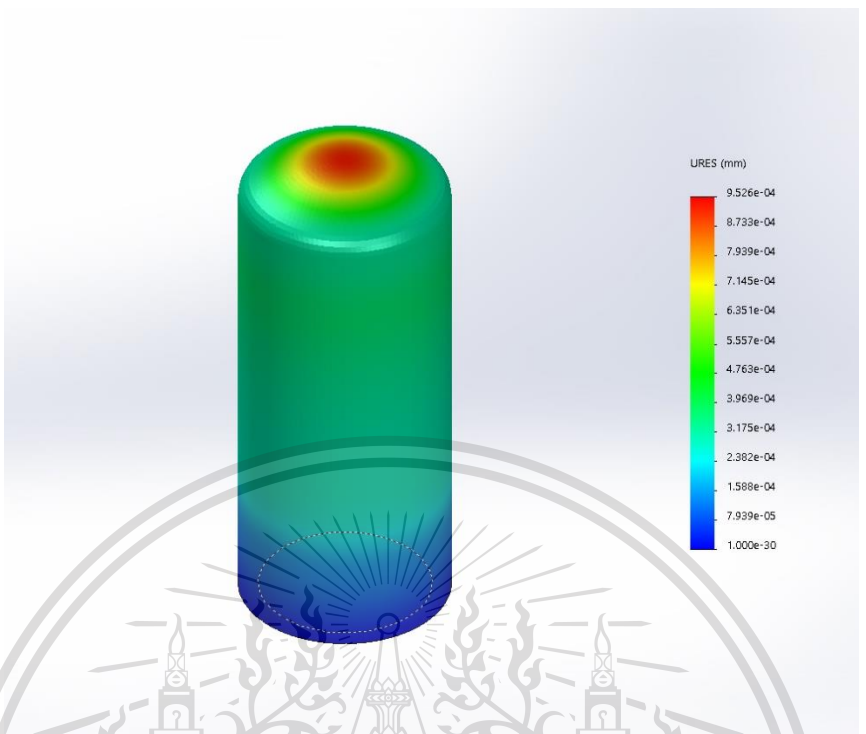


รูปที่ 4.14 รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นชิ้นส่วนลูกสูบดีเซลภายใต้แรงดันที่ความดัน 5 บาร์

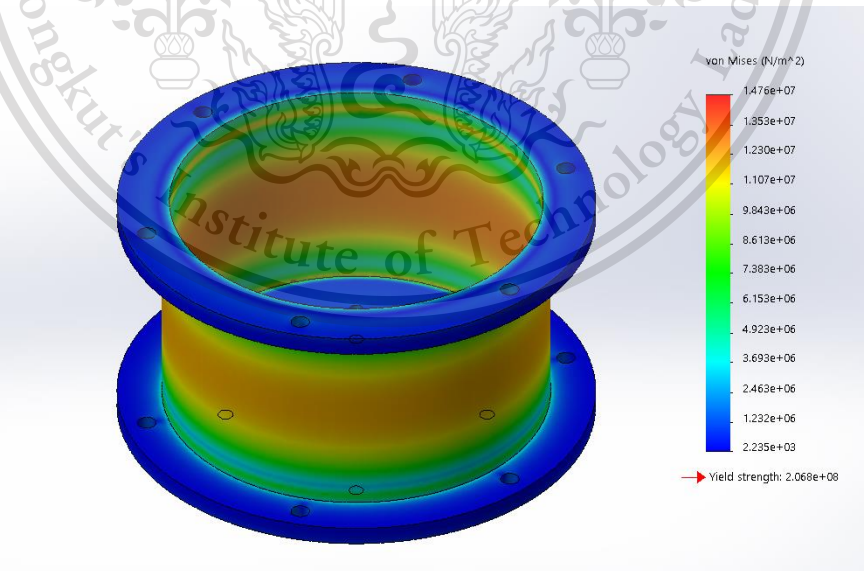
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.15 รูปแสดงผลการวิเคราะห์Displacementชิ้นส่วนลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์ภายใต้แรงดันที่  
ความดัน5บาร์

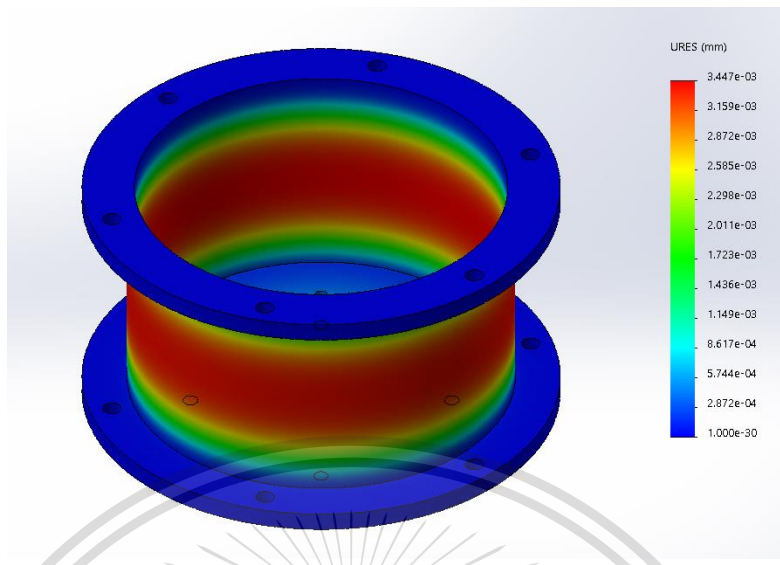


รูปที่ 4.16 รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นชิ้นส่วนโครงสร้างภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์

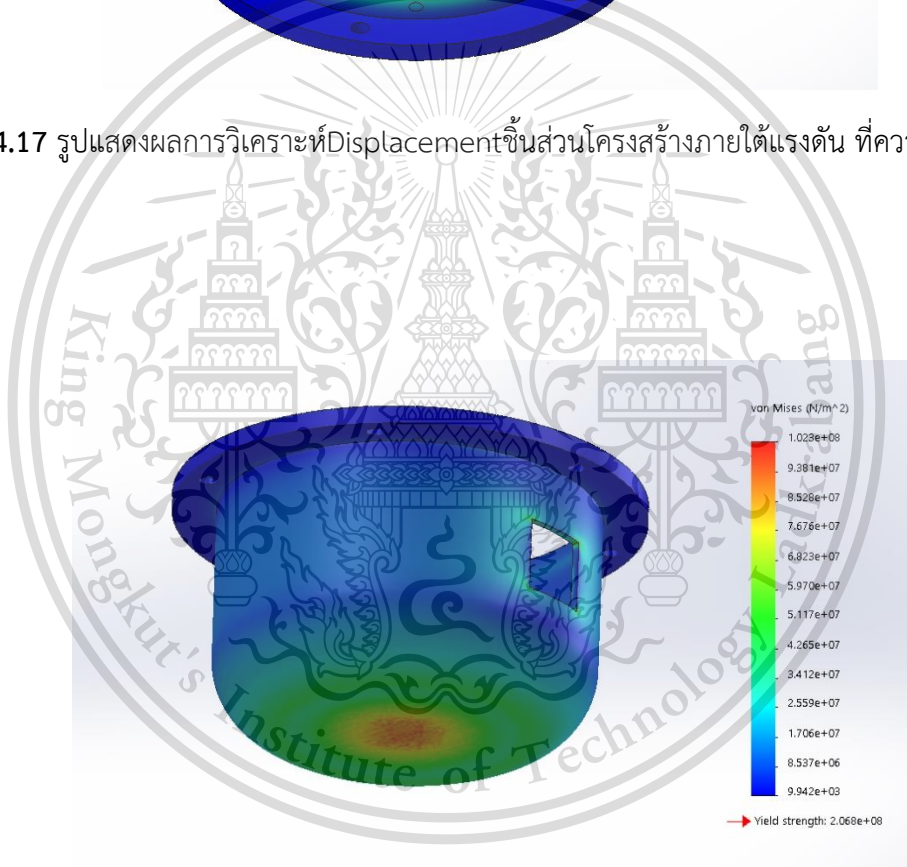
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

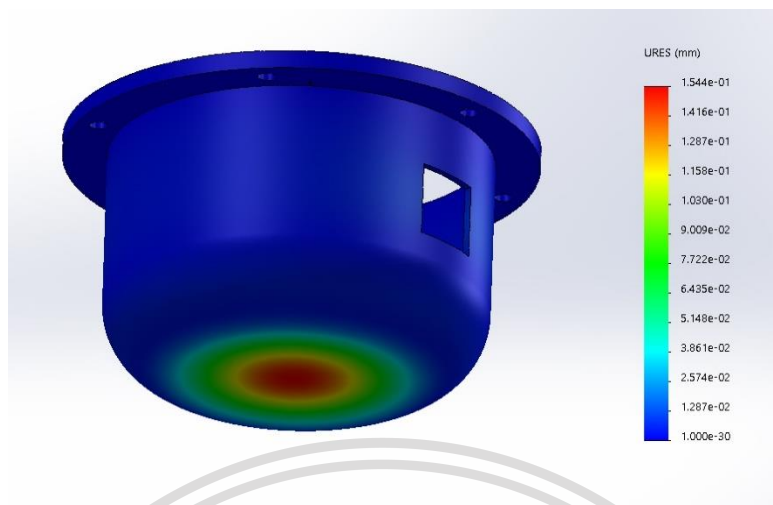


รูปที่ 4.17 รูปแสดงผลการวิเคราะห์Displacementชิ้นส่วนโครงสร้างภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์



รูปที่ 4.18 รูปแสดงผลการวิเคราะห์ความเค้นชิ้นส่วนโครงสร้างภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 รูปแสดงผลการวิเคราะห์ Displacement ชิ้นส่วนโครงสร้างภายใต้แรงดัน ที่ความดัน 5 บาร์

#### 4.3.2 ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย

จากผลการจำลองข้างต้นพบว่าค่าความเค้นสูงสุดคือ 102.3 MPa และวัสดุมีค่า Yield strength 206.8 MPa ดังนั้นค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัยเท่ากับ 2.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

# สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

### สรุปผลวิจัย

การดำเนินงานวิจัยไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ทั้งหมด โดยเราสามารถออกแบบเครื่องยนต์ขึ้นมาได้และวิเคราะห์การออกแบบโดยการจำลองด้วยโปรแกรมต่าง ๆ แต่ไม่สามารถสร้างเครื่องยนต์ ส่งผลให้การวิเคราะห์ต่าง ๆ ของเครื่องยนต์นั้นเป็นไปแต่ในทางทฤษฎี จึงทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นจริงออกมาไม่ได้และไม่ทราบว่าเครื่องยนต์นี้จะทำความเย็นได้ในอุณหภูมิตามที่ตั้งเป้าไว้ จากการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างของตัวเครื่องสามารถรองรับความดันตามขอบเขตงานวิจัยได้คือ ความดันเริ่มต้นที่ 5 บาร์ และเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ความถี่ 50 Hz จะต้องป้อนพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 111.81 วัตต์ เพื่อให้ระบบทำงานเป็นวัฏจักร และการไหลและการถ่ายโอนความร้อนของสารทำงานในระบบเป็นได้ด้วยดี

### ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการคำนวณในทางทฤษฎีเท่านั้น ไม่สามารถเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ขณะทำงานได้ เนื่องจากช่วงเวลาในการทำงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงระบาดของโรคไวรัส จึงทำได้แค่การคำนวณในทางทฤษฎีและสร้างแบบจำลองขึ้นมาแต่ไม่สามารถสร้างเครื่องยนต์ตามที่ได้ออกแบบเพื่อดูการค่าทำงานของเครื่องยนต์ตามความเป็นจริงได้ และทำให้ไม่ทราบว่า การออกแบบเครื่องยนต์นั้นมีความถูกต้องเพียงใด และมีจุดบกพร่องอะไรบ้าง ส่งให้การปรับแก้แบบเป็นไปได้อย่างยาก เช่น อาจจะมีการรั่วของ ความดันเกิดขึ้น การถ่ายโอนความร้อนในส่วนของฟินไม่เพียงพอ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนู ฉุยฉาย. **การสันสเทือนเชิงกล**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2544.
- [2] พงษ์นรินทร์ สว่างวงศ์. “การออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระขนาดเล็ก”. ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ. 2558
- [3] ขวัญจิต วงษ์ขารี, สมชัย อัครทิวา. **เทอร์โมไดนามิกส์**. กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล. 2546.
- [4] G. Walker. **STIRLING ENGINE**. New York : Oxford University Press, Inc. 1980
- [5] E.D. Rogdakis, N.a. Bormpilas and I.K. Koniakos, **A thermodynamic study for the optimization of stable operation of free piston Stirling engines**, Energy Conversion and Management 45(2004) 575-593
- [6] J. Boucher, F. Lanzetta and P. Nika, **Optimization of a dual free piston Stirling engine**, Applied Thermal Engineering 27(2007) 802-811
- [7] Daniel J. Inmann, **Mechanical Vibration**, Prentice-hall International, Inc. 1994
- [8] M. L. James, G. M. Smith, J. C. Wolford, P. W. Whaley. **Vibration of Mechanical and Structural System: With Microcomputer Applications**. New York : Harpercollins College Div, Inc. 1994
- [9] AliReza Tavakolpour-Saleh, Shahryar Zare. **Free piston Stirling engines: A review** แหล่งที่มา <https://onlinelibrary.wiley.com/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

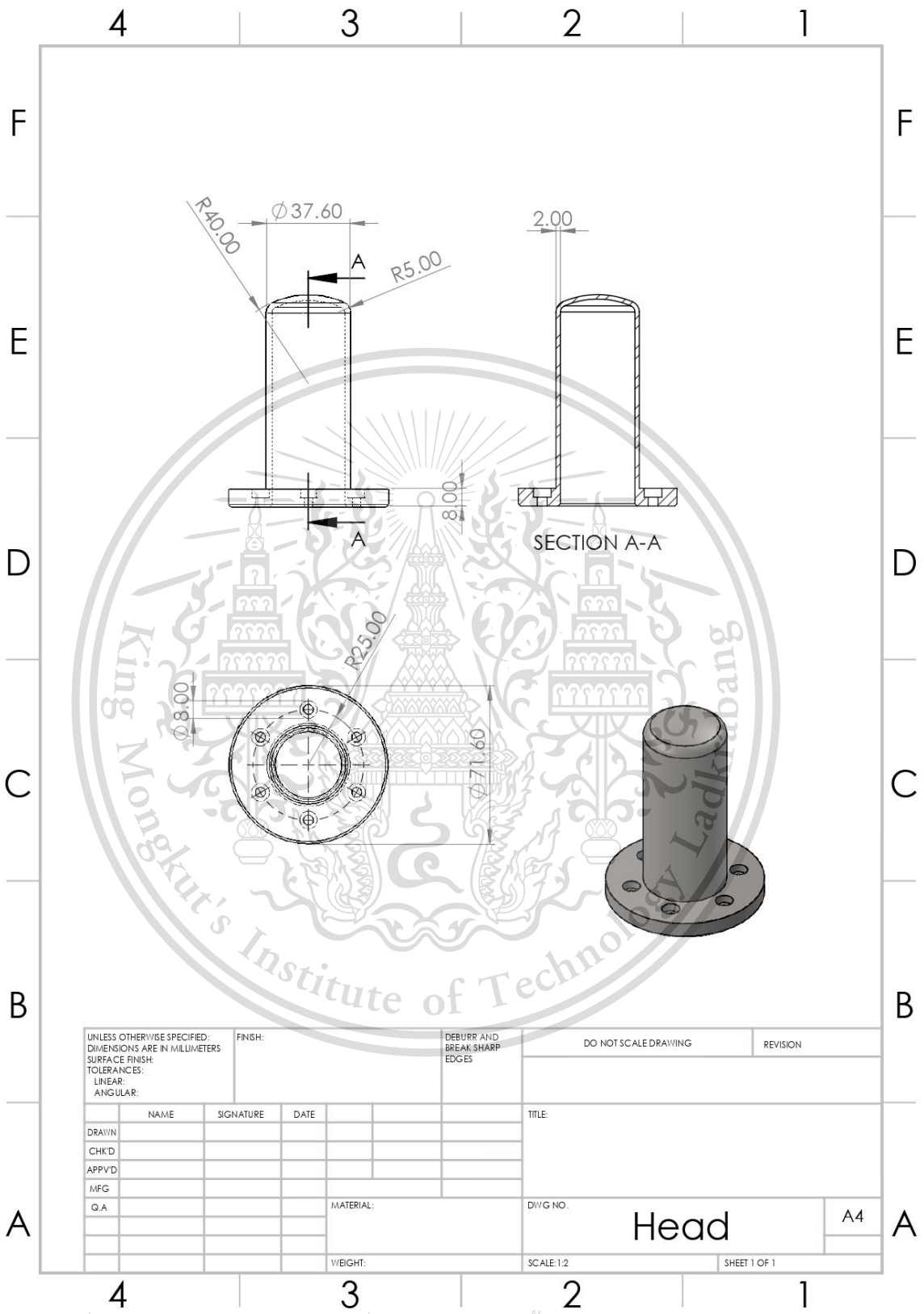
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

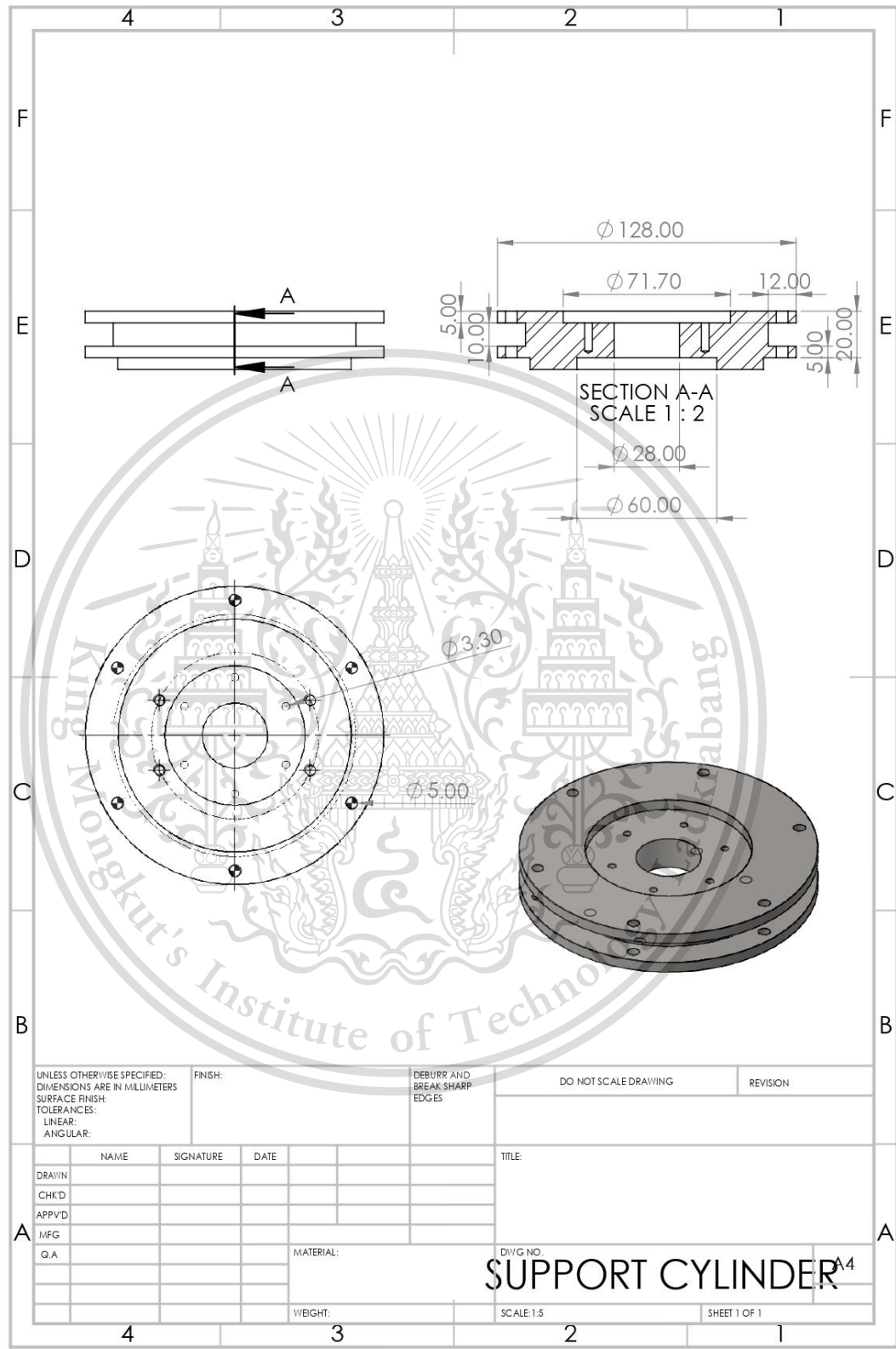
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

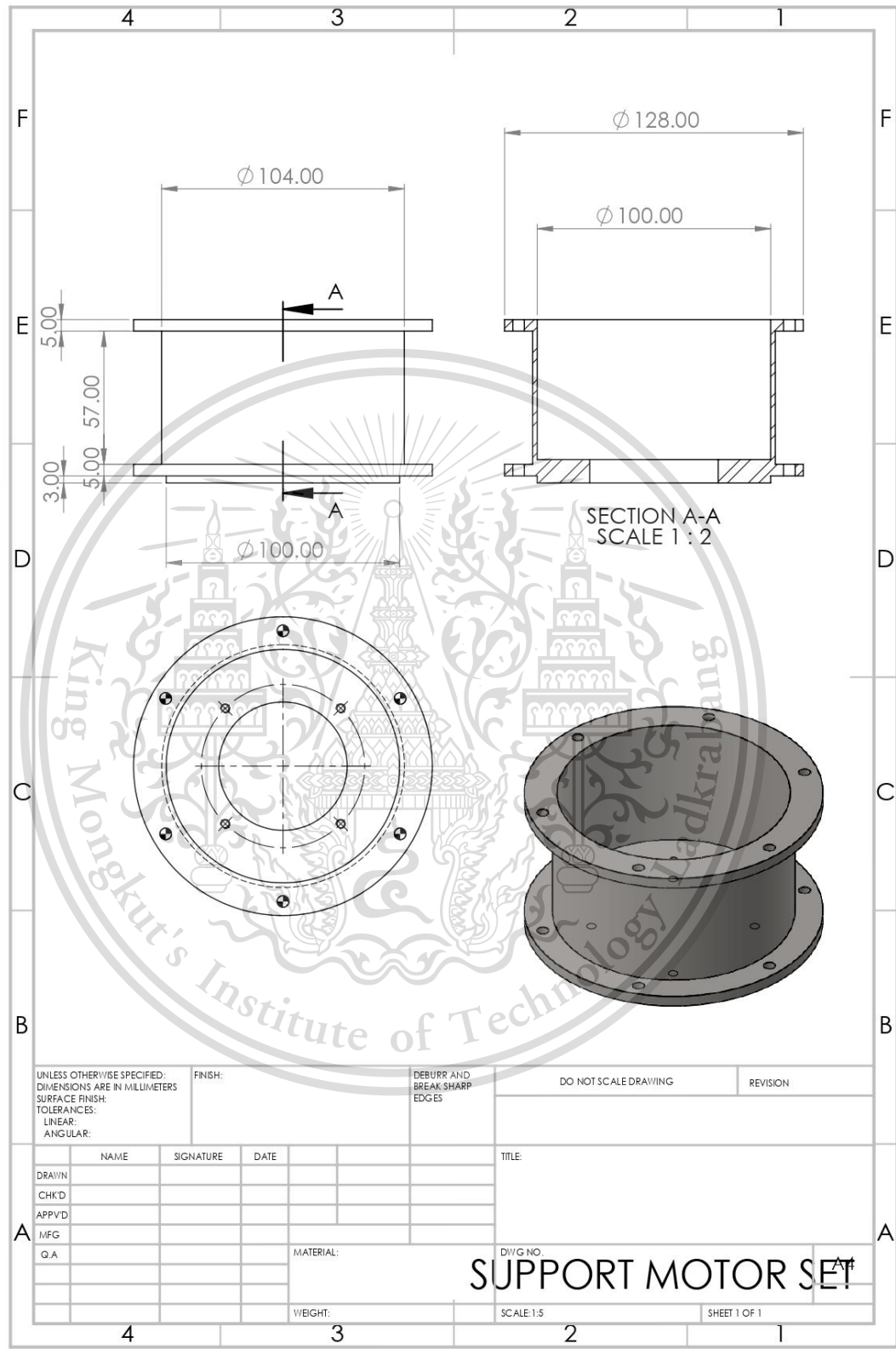


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN			SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHKD										
APPV'D										
MFG										
Q.A					MATERIAL:		DIV'G NO.		Head	
					WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ ก.1 ฝาสูบ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

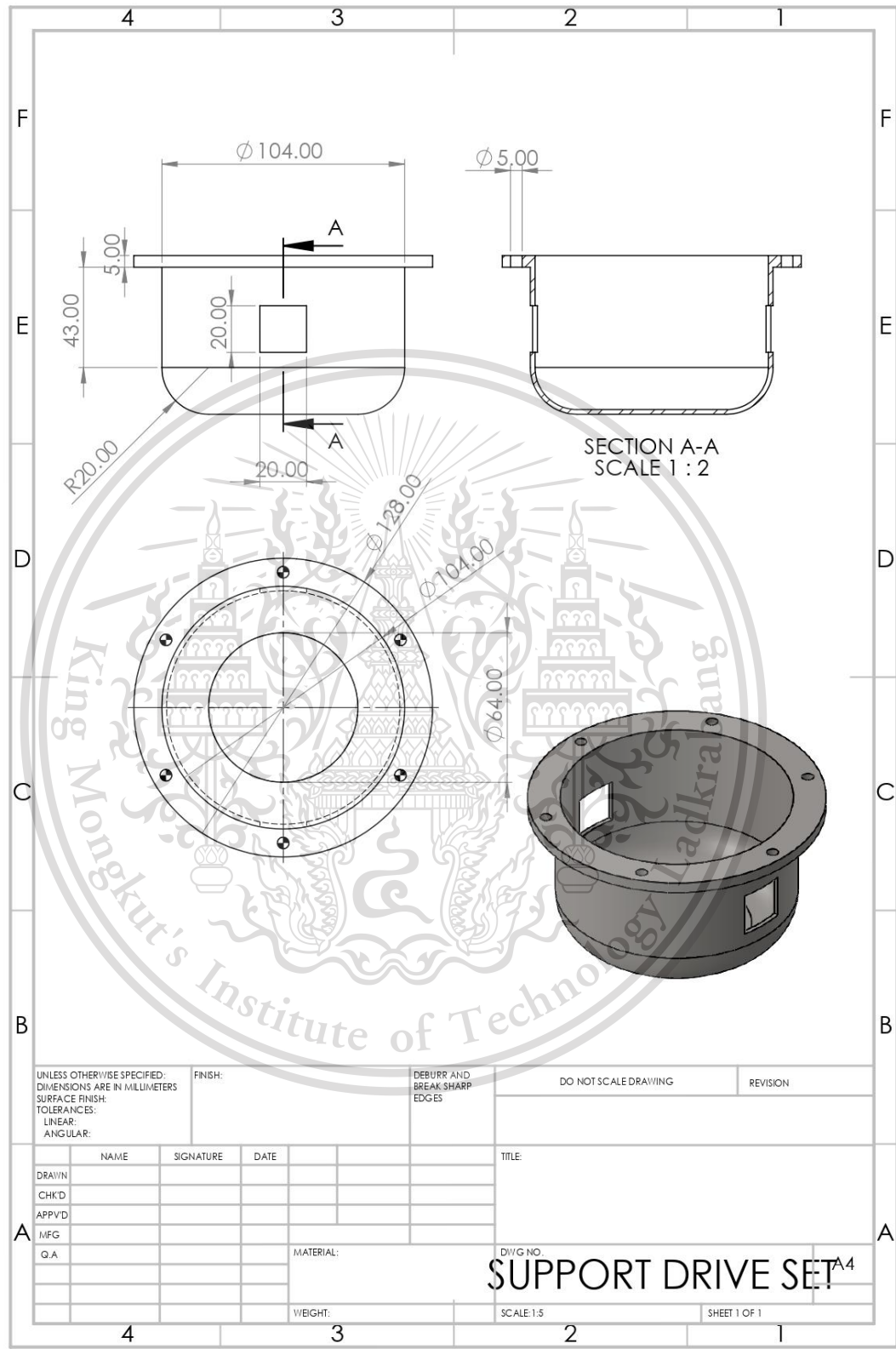


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ ก.2 ส่วนรองรับกระบอบสูบ**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

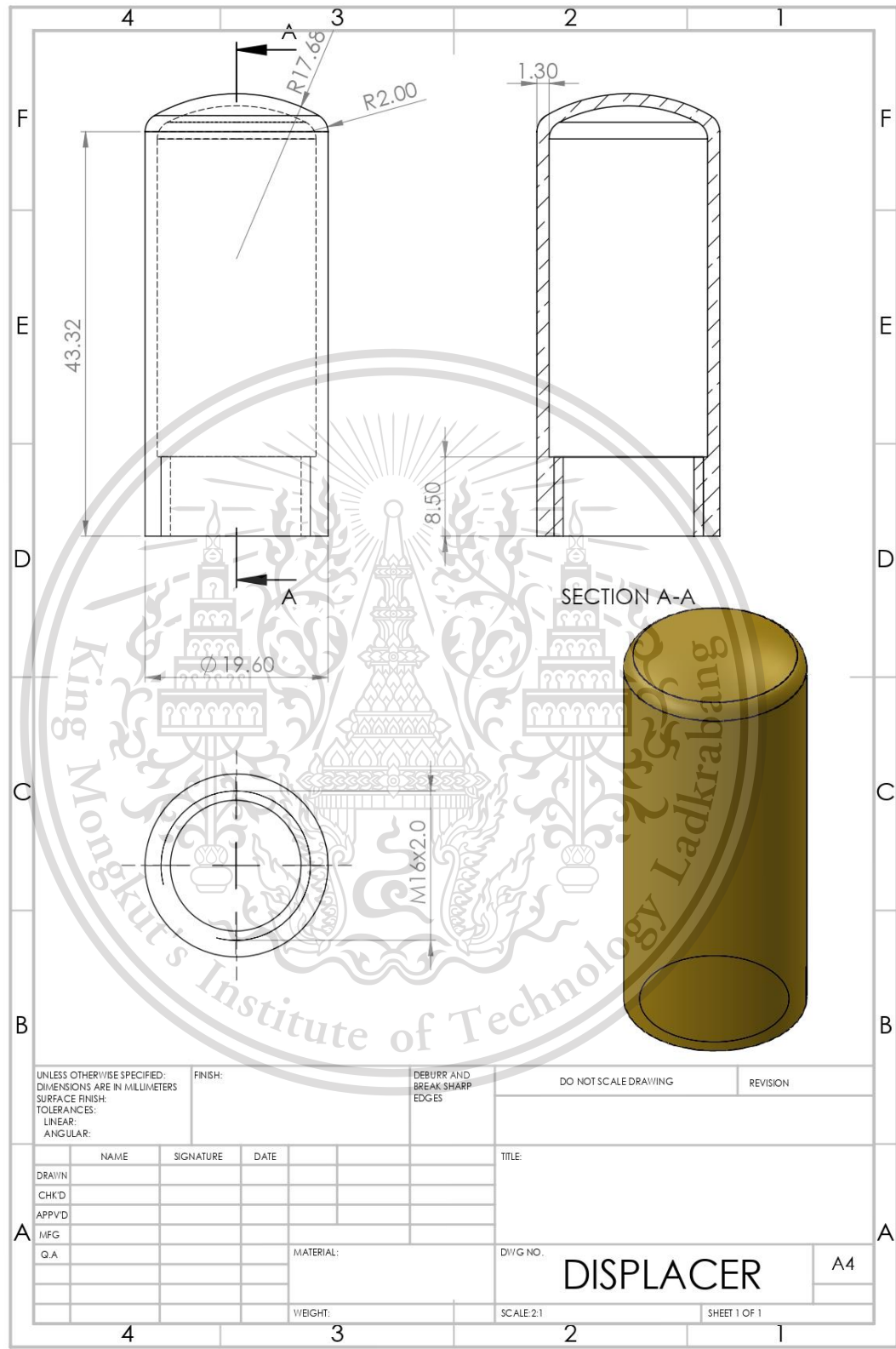


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:		
DRAWN					
CHKD					
APPV'D					
MFG			MATERIAL:		
Q.A			WEIGHT:	DWG NO.	SHEET 1 OF 1
			<b>SUPPORT MOTOR SET</b>		

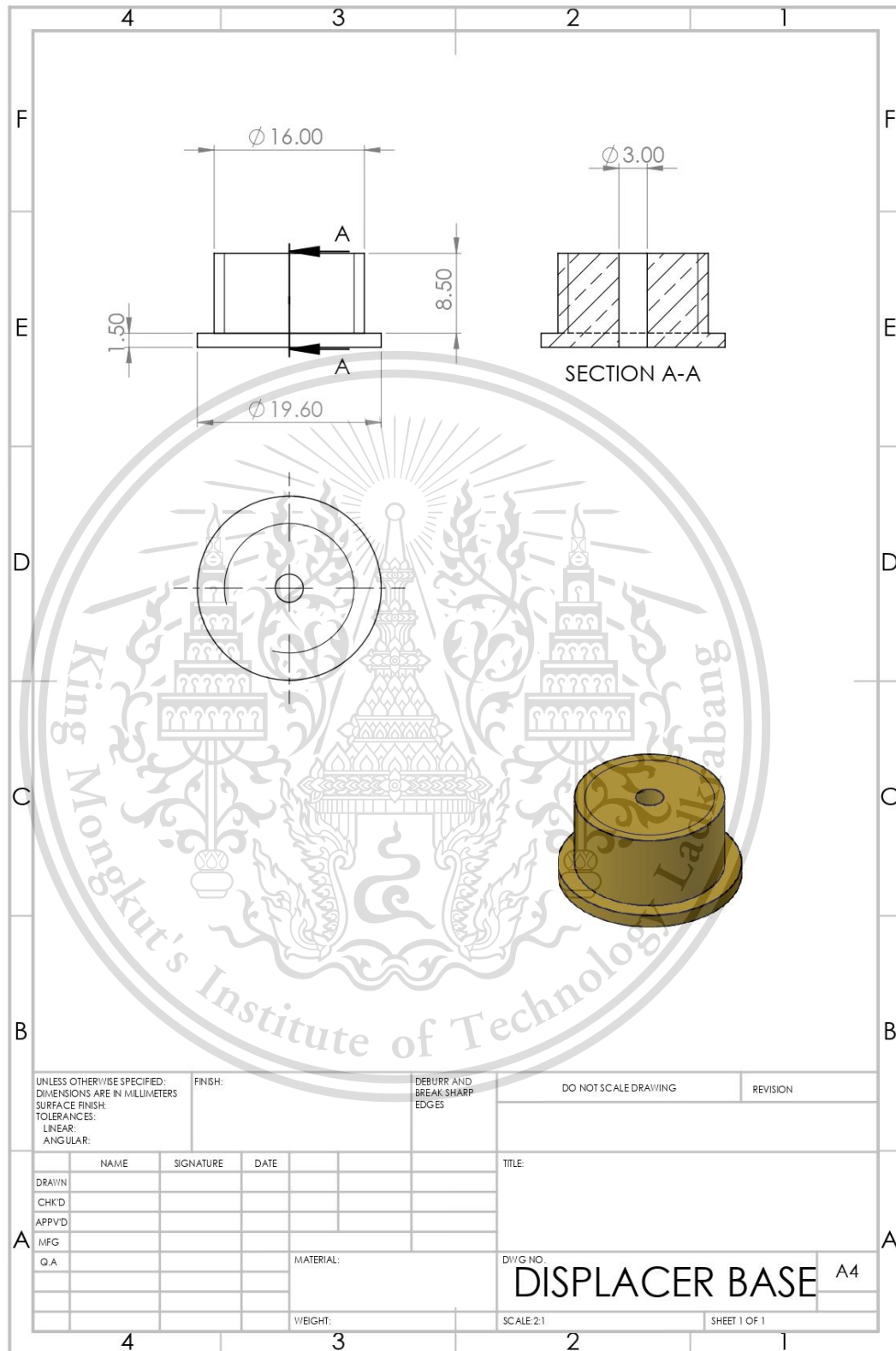
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ ก.3 ส่วนรองรับตัวขับเคลื่อน**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ ก.4 ส่วนรองรับสปริงระนาบ**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



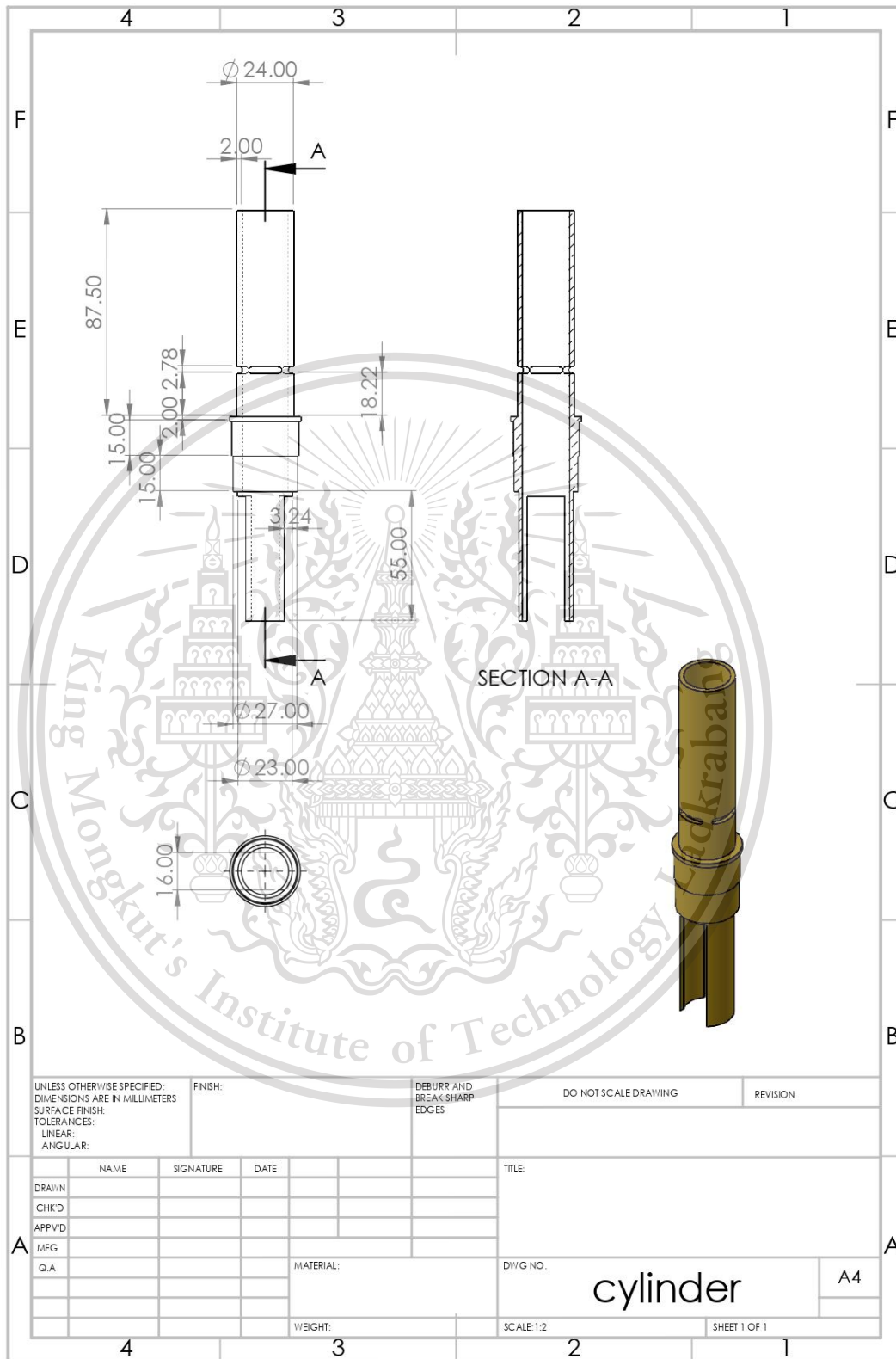
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ ก.5 ลูกสูบดิสเพลสเซอร์**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ ก.6** ฐานลูกสูบดิสเพลสเซอร์  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

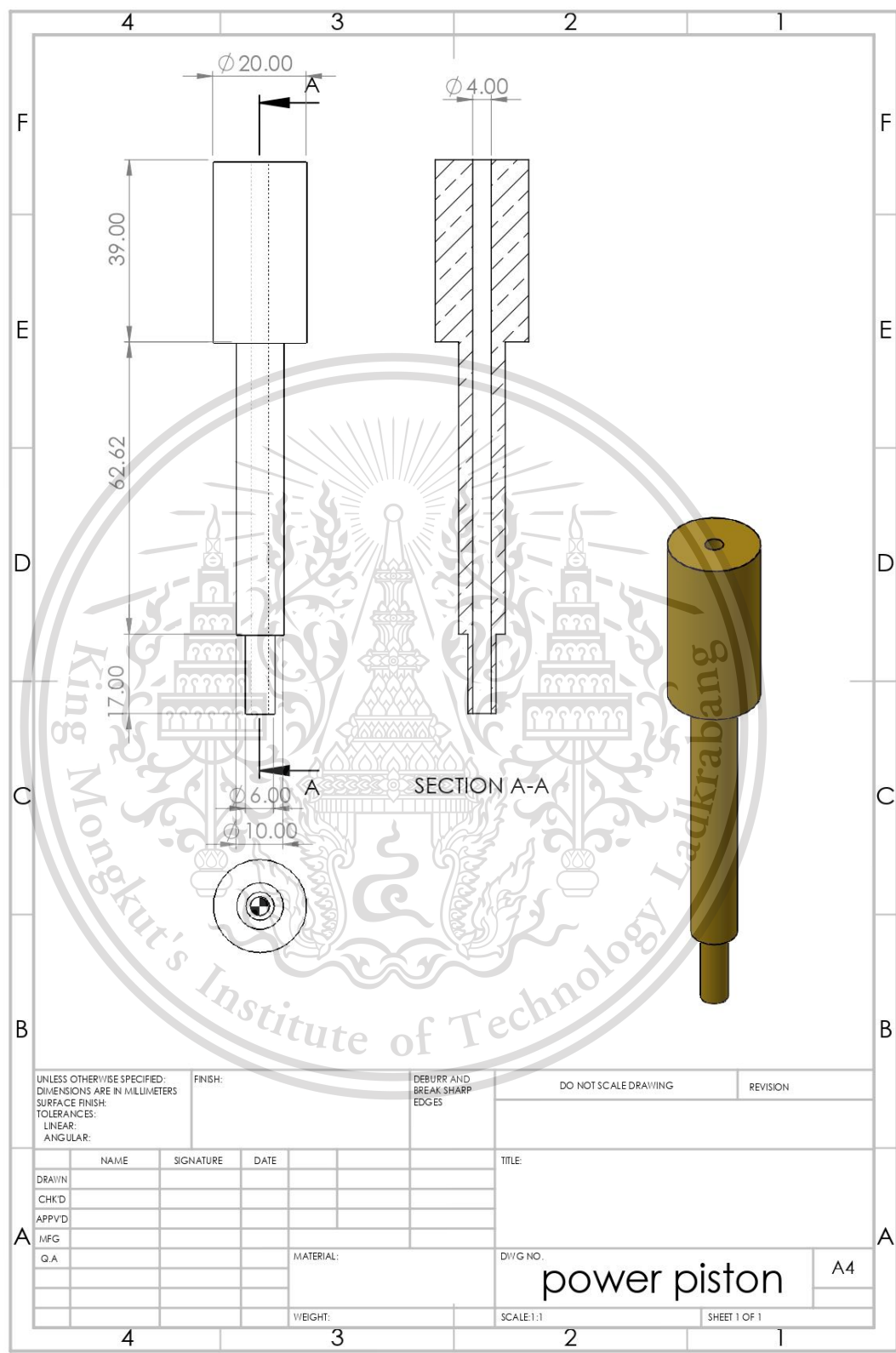


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN			SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHKD										
APPV'D										
MFG							MATERIAL:		DIV'G NO.	
Q.A									cylinder	
							WEIGHT:		SCALE: 1:2	
									SHEET 1 OF 1	

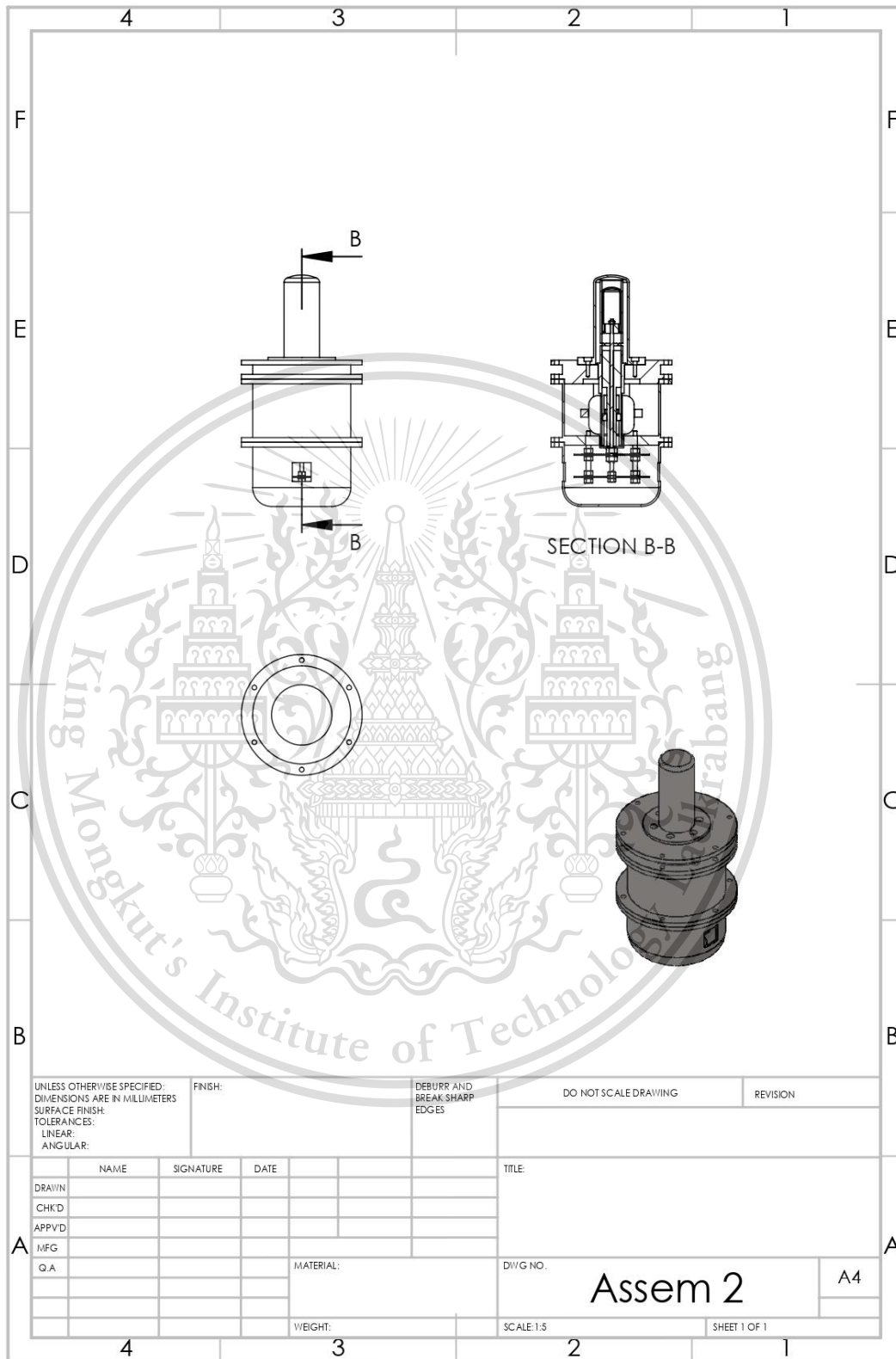
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ ก.7 กระบอกสูบ**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ ก.8 ลูกสูบกำลัง**  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่สอนหรือซ่อมบำรุงไปเฉพาะภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.