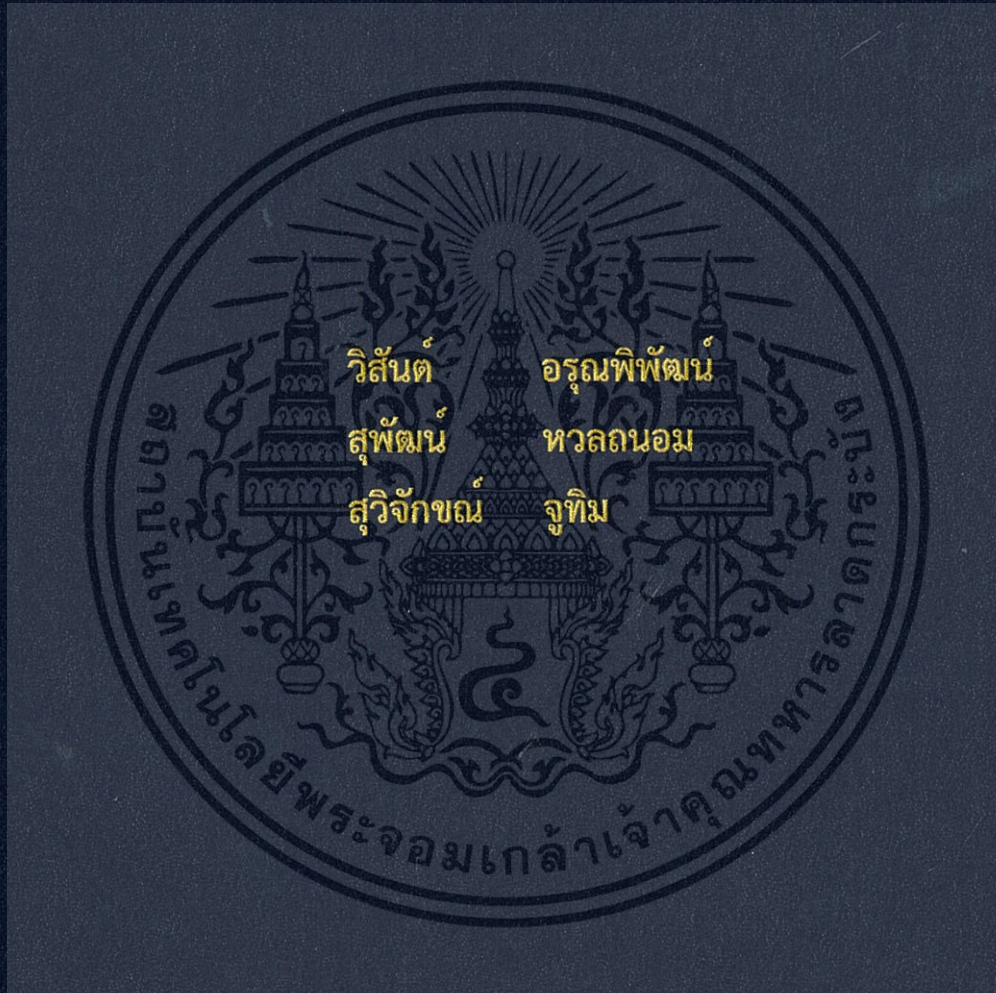


ออกแบบและวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาแบบวี
DESIGN AND ANALYSIS V-TYPE ALPHA STIRLING ENGINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

ออกแบบและวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาแบบวี

DESIGN AND ANALYSIS V-TYPE ALPHA STIRLING ENGINE



ช.น.
๑๗๕๘

เลขหมู่..... ๑๕๕๘
เลขทะเบียน..... 143876
วันเดือนปี..... 04 มี.ค. 2559

b. 12809573
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND ANALYSIS V-TYPE ALPHA STIRLING ENGINE



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

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ออกแบบและวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาในรูปแบบวี

Design and Analysis V-type Alpha Stirling

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|------------------|-------------|--------------|----------|
| 1. นายวิสันต์ | อรุณพิพัฒน์ | รหัสประจำตัว | 55011165 |
| 2. นายสุพัฒน์ | หวลถนอม | รหัสประจำตัว | 55011346 |
| 3. นายสุวิจักขณ์ | จุฑิมา | รหัสประจำตัว | 55011369 |



(ผศ.ดร.สุตภัสร์ แคว้นเขาเม็ง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบและวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาแบบวี

| | | |
|----------------|--------------|-------------------------------------|
| นายวิสันต์ | อรุณพิพัฒน์ | 55011165 |
| นายสุพัฒน์ | หวลถนอม | 55011346 |
| นายสุวิจักขณ์ | จุฑามิ | 55011369 |
| ผศ.ดร.สุตาภัทร | แคว้นเขาเม็ง | อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2558 |

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์จัดทำขึ้นเพื่อวิเคราะห์และออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาแบบลูกสูบวี เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาที่มีการแยกตัวของกระบอกสูบร้อนและกระบอกสูบเย็นทำให้อุณหภูมิของทั้งสองกระบอกสูบเกิดความแตกต่างกันมาก และใช้กลไกส่งกำลังแบบเพลลาข้อเหวี่ยง เนื่องจากใช้กลไกที่ซับซ้อนน้อยกว่า เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาแบบลูกสูบวีประกอบด้วย 5 ส่วน ได้แก่ ฮีทเตอร์, คูลเลอร์, รีเจนเนอเรเตอร์, ลูกสูบร้อนและลูกสูบเย็น การวิเคราะห์วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ใช้วิธีวิเคราะห์แบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Analysis) หลักการวางจรรยาความร้อนใช้วิเคราะห์ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องยนต์ เช่น ฮีทเตอร์, คูลเลอร์ หลักการวิเคราะห์ความล้าใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนทางกล จากการคำนวณ เครื่องยนต์จะมีกำลังสูงสุดที่ 70 วัตต์ที่ความเร็วรอบ 3300 รอบต่อนาที ที่ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ อุณหภูมิสูงสุดที่ฮีทเตอร์ 650 องศาเซลเซียส

Design and Analysis V-type Alpha Stirling Engine

Wisat Aroonpipat 55011165

Supat Hualthanom 55011346

Suwajack Jutim 55011369

Assoc.Prof. Dr.Sutapat Kwankaomeng Advisor

Year 2015

Abstract

The purposes of this project are design and analysis an Alpha type Stirling engine with V configuration. Alpha-type Stirling engine consisting of hot and cold cylinders separately, can be treated and obtained more differential temperature between hot and cold sections than that of others. Furthermore, slider crank is simply used for driving mechanism .The V- type Alpha Stirling engine design has five components consisting of heater or hot cylinder, cooler or cold cylinder, regenerator, hot piston or displacer and cold piston or power piston. The working cycle of engine is analyzed by Isothermal analysis. Heat addition part and heat rejection part are designed by Heat network. Fatigue analysis is used to design mechanical part. The engine maximum power from calculation will be 70 watts at 3300 rpm, the initial pressure is 101.35 kPa, the heater's temperature will be 923 K and the cooler's temperature will be 350 K.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ก็เพราะคำแนะนำ และการช่วยเหลือในทุกๆด้าน จาก อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง

ขอขอบพระคุณ ผศ.บรรเทง ศิลป์สกุลสุข จากมหาวิทยาลัยสยาม ที่ช่วยให้คำแนะนำดีๆ และแนวคิดต่างๆ ในด้านการออกแบบ รวมไปถึงรุ่นพี่ปริญญาโทและเอกในห้องทดลอง ที่คอยให้คำแนะนำ และคอยช่วยเหลือ ในการดำเนินไปอย่างราบรื่น

ขอขอบคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยสั่งสอนให้ความรู้ตลอดมาจนกระทั่ง ปริญญาานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จ

และสุดท้ายนี้ ต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักรยิ่ง ที่ช่วยเหลือและให้ คำแนะนำตลอดมา ซึ่งข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณ และขอกราบขอบพระคุณทุกท่านมา ณ ที่นี้

นายวิสันต์ อรุณพิพัฒน์

นายสุพัฒน์ ทวณอม

นายสุวิจักขณ์ จุฑิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | VIII |
| สารบัญรูป | IX |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ | 1 |
| 1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 1 |
| 1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย | 1 |
| 1.4 ข้อสมมติฐานของการศึกษา | 2 |
| 1.5 ขอบเขตงานวิจัย | 2 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| 1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ | 4 |
| 2.1 วัฏจักรคาร์โนลต์ | 4 |
| 2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิงค์ | 4 |
| 2.3 รูปแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ | 7 |
| 2.3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์แบบกลไกจลศาสตร์ | 8 |
| 2.3.1.1 เครื่องยนต์แบบส่งกำลัง 1 ทิศทาง | 8 |
| 2.3.1.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแกรมม่า | 8 |
| 2.3.1.1.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดเบต้า | 9 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **iv** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| 2.3.1.1.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดแอลฟา | 9 |
| 2.3.1.3 กลไกที่นิยมใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ประเภทต่างๆในปัจจุบัน | 10 |
| 2.3.1.3.1 กลไกแบบตัววี | 10 |
| 2.3.1.3.2 กลไกแบบรอมบิค | 10 |
| 2.3.1.3.3 กลไกโรสฮอร์ด | 11 |
| 2.3.1.3.4 กลไกวอบเบิลเพลท | 11 |
| 2.3.1.3.5 กลไกสวอชเพลท | 12 |
| 2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์แบบลูกสูบอิสระ | 12 |
| 2.4 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิดอัลฟา | 13 |
| บทที่ 3 แนวคิดและการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงค์ชนิด V-90 | 15 |
| บทที่ 4 การออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบ | 17 |
| 4.1 สมมติฐานสำหรับการคำนวณในการออกแบบ | 17 |
| 4.2 การออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน | 17 |
| 4.2.1 ส่วนรับความร้อน | 17 |
| 4.2.2 ส่วนระบายความร้อน | 21 |
| 4.2.3 กระบอกสูบ | 24 |
| 4.2.4 ลูกสูบ | 24 |
| 4.3 การออกแบบชิ้นส่วนกลไก | 25 |
| 4.3.1 Upper part of piston pin | 25 |
| 4.3.2 Lower part of piston pin | 27 |
| 4.3.3 Connecting rod | 28 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| 4.3.4 Folk connecting rod | 30 |
| 4.3.5 Flywheel | 32 |
| 4.3.6 Shaft | 33 |
| บทที่ 5 การวิเคราะห์หัวจักรของเครื่องยนต์ | 35 |
| 5.1 สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์ | 35 |
| 5.2 รายละเอียดของเครื่องยนต์ | 36 |
| 5.3 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่สำหรับกลไก | 38 |
| 5.4 กำลังของเครื่องยนต์เชิงปฏิบัติ | 42 |
| บทที่ 6 ส่วนประกอบเครื่องยนต์ | 46 |
| 6.1 โคมรับความร้อน | 46 |
| 6.2 ส่วนระบายความร้อน | 46 |
| 6.3 กระจบอกสูบ | 47 |
| 6.4 ลูกสูบ | 47 |
| 6.5 หมุดเชื่อมลูกสูบ | 48 |
| 6.6 แท่งเชื่อม | 48 |
| 6.7 หมุดเชื่อมเพลลา | 48 |
| 6.8 เพลลาข้อเหวี่ยง | 49 |
| 6.9 ยอยล้อดุนกำลัง | 49 |
| 6.10 ล้อดุนกำลัง | 49 |
| 6.11 กล่องเครื่องยนต์ | 50 |
| 6.12 ฐาน | 50 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 6.13 เครื่องยนต์ V-90 | 51 |
| บทที่ 7 สมรรถนะเครื่องยนต์ | 53 |
| 7.1 การทดสอบสมรรถนะ | 53 |
| 7.1.1 วิธีการทดสอบ | 53 |
| 7.1.2 หลักการคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ | 54 |
| 7.2 ผลการทดสอบ | 54 |
| 7.3 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง | 54 |
| บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย | 55 |
| 8.1 สรุป | 55 |
| 8.2 ข้อเสนอแนะ | 55 |
| บรรณานุกรม | 56 |
| ภาคผนวก | 57 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.1 ค่า Nusselt number | 19 |
| 5.1 รายละเอียดของเครื่องยนต์ต้นแบบ D 90 | 36 |
| 5.2 รายละเอียดของเครื่องยนต์ V | 37 |
| 5.3 ตารางค่าที่ได้จากวัฏจักร | 42 |
| 5.4 ตารางค่าที่ได้จากวัฏจักรชมิต | 42 |
| 5.5 แสดงกำลังที่ได้จากวิธีต่างๆ | 43 |
| 6.1 ตารางแสดงน้ำหนักของแต่ละชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ | 52 |
| ก.1 ตารางแสดงชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ต้นแบบ | 58 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **viii** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน | 3 |
| 2.1 แสดงแผนภาพ P-V และ T-S ของวัฏจักรคาร์โนลต์ | 4 |
| 2.2.1 ภาพแสดงลักษณะของลูกสูบในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรสเตอร์ลิง | 7 |
| 2.2.2 กราฟแผนภาพ P-V และ T-S ของวัฏจักรสเตอร์ลิง | 7 |
| 2.3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาแบบลูกสูบวี | 8 |
| 2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกรมม่า | 8 |
| 2.3.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า | 9 |
| 2.3.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา | 10 |
| 2.3.5 กลไกแบบตัววี | 10 |
| 2.3.6 กลไกแบบรอมบิค | 10 |
| 2.3.7 กลไกโรสยอร์ก | 11 |
| 2.3.8 กลไกวอเบิ้ลเพลต | 11 |
| 2.3.9 กลไกสวอชเพลท | 12 |
| 2.3.10 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ | 12 |
| 2.4.1 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 1-2 | 13 |
| 2.4.2 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 2-3 | 13 |
| 2.4.3 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 3-4 | 14 |
| 2.4.4 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 4-1 | 14 |
| 3.1 ตำแหน่งของลูกสูบที่ตำแหน่ง 0 องศา | 15 |
| 3.2 ตำแหน่งของลูกสูบที่ตำแหน่ง 90 องศา | 15 |
| 3.3 ตำแหน่งของลูกสูบที่ตำแหน่ง 180 องศา | 16 |
| 3.4 ตำแหน่งของลูกสูบที่ตำแหน่ง 270 องศา | 16 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IX ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2.1 | รูปวงครความร้อนของฮีทเตอร์ | 17 |
| 4.2.2 | รูปวงจรความร้อนของฮีทเตอร์ | 21 |
| 5.4.1 | กราฟแสดงค่า B_n | 43 |
| 5.2.1 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของลูกสูบร้อนและลูกสูบเย็น | 44 |
| 5.2.2 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของกระบอกสูบร้อนและเย็น | 44 |
| 5.2.3 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของเครื่องยนต์ | 45 |
| 6.1 | โตมรับความร้อน | 46 |
| 6.2 | ส่วนระบายความร้อน | 46 |
| 6.3 | กระบอกสูบ | 47 |
| 6.4.1 | ลูกสูบส่วนล่าง | 47 |
| 6.4.2 | ลูกสูบส่วนบน | 47 |
| 6.5 | หมุดเชื่อมลูกสูบ | 48 |
| 6.6.1 | แท่งเชื่อมชนิดส้อม | 48 |
| 6.6.2 | แท่งเชื่อม | 48 |
| 6.7 | หมุดเชื่อมเพลลา | 48 |
| 6.8 | เพลลาข้อเหวี่ยง | 49 |
| 6.9 | ยอยล้อดุนกำลัง | 49 |
| 6.10 | ล้อดุนกำลัง | 49 |
| 6.11 | กล่องเครื่องยนต์ | 50 |
| 6.12 | ฐานเครื่องยนต์ | 50 |
| 6.13 | ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ | 51 |
| 7.1 | ชุดทดสอบแบบโรปเบรก | 53 |
| ก.1 | กล่องเครื่องยนต์ | 60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| | |
|-----------------------------------|----|
| ก.2 ฝาปิดหน้า/หลังเครื่องยนต์ | 61 |
| ก.3 ฐานเครื่องยนต์ | 62 |
| ก.4 โคมรับความร้อน | 63 |
| ก.5 รีเจนเนอเรเตอร์ | 64 |
| ก.6 ท่อทองแดง | 65 |
| ก.7 กระจบอกสูบ | 66 |
| ก.8 ลูกสูบบน | 67 |
| ก.9 ลูกสูบล่าง | 68 |
| ก.10 เพลลาข้อเหวี่ยง | 69 |
| ก.11 หมุดเชื่อมเพลลา | 70 |
| ก.12 แท่งเชื่อมรูปสี่อม | 71 |
| ก.13 แท่งเชื่อม | 72 |
| ก.14 หมุดลูกสูบ | 73 |
| ก.15 ภาพประกอบของเพลลาเครื่องยนต์ | 74 |
| ก.16 ยอยล้อดุนกำลัง | 75 |
| ก.17 ล้อดุนกำลัง | 76 |
| ก.18 ภาพประกอบเครื่องยนต์ | 77 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันโลกเราได้ให้ความสนใจเรื่องพลังงานทางเลือก เนื่องจากพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เช่น น้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติ กำลังจะหมดลง ผู้ศึกษาจึงตระหนักถึงการใชพลังงานทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงทำให้มีผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจำนวนมาก มีการนำผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและกากทางการเกษตรมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล พลังงานทางเลือกที่ต้องคำนึงถึงอัตราการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งปัจจุบันโลกเราได้คำนึงถึงเรื่องภาวะโลกร้อนเช่นกัน ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่คิดค้นโดย โรเบิร์ต สเตอร์ลิง เมื่อปีค.ศ.1816 โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอาศัยหลักการของแหล่งอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 2 แหล่ง เป็นตัวที่ทำให้ลูกสูบขับเคลื่อนโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน ซึ่งกระบวนการทำงานนี้เป็นคาร์บอนนิวทรัล เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากกระบวนการเผาไหม้พืชสามารถดูดกลับไปสังเคราะห์แสงได้ ผู้ศึกษาจึงทำการศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาให้กำลังมากกว่าเมื่อเทียบกับเบต้าและแกมมา แต่ปัญหาของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือการรั่วไหลของสารทำงานและเวลาในการให้ความร้อน(warm up time) โดยผู้ศึกษาสนใจที่จะปรับปรุงทางด้านารรั่วไหลของสารทำงาน โดยการออกแบบ ปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีให้เหมาะสมกับเครื่องยนต์ชนิดแอลฟา เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจในด้านเครื่องยนต์สันดาปภายนอกรวมทั้งพลังงานทางเลือกต่อไป

1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาเป็นเครื่องยนต์ที่ลูกสูบทั้งสอง 2 กระบอกแยกจากกันเป็นเครื่องยนต์ชนิดที่ให้กำลังมากที่สุดเมื่อเทียบกับชนิดเบต้าและแกมมา โดยเทียบที่ความต่างเฟส 90 องศา และกระบอกสูบร้อนและกระบอกสุบเย็นอยู่กันคนละกระบอกทำให้ความแตกต่างอุณหภูมิมาก จึงทำให้กำลังมากขึ้นตาม เมื่อเทียบกับชนิดอื่นๆลูกสูบร้อนและเย็นอยู่ในกระบอกสุบเดียวกัน [1], [2], [3]

เราจะออกแบบกลไกการเคลื่อนที่ของลูกสูบด้วยระบบ Slider Crank เนื่องจากผลิตง่ายและไม่ต้องสนใจตำแหน่งของลูกสูบว่าจะขนานกันหรือไม่ [2]

1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเครื่องเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาแบบวี
2. ทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้

1.4 ข้อสมมติฐานของการศึกษา

เครื่องยนต์สามารถสร้างกำลังได้ 70 วัตต์ ตามเครื่องต้นแบบของ Ross โดยลูกสูบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 59.5 มิลลิเมตร และระยะกระจัดของลูกสูบเท่ากับ 25 มิลลิเมตร โดยอากาศเริ่มต้นมีความดัน 1 บรรยากาศ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบวี
2. กลไกสเตอร์ลิง
3. ใช้อากาศที่ความดันบรรยากาศเป็นสารทำงานที่ความดัน 1 บรรยากาศ

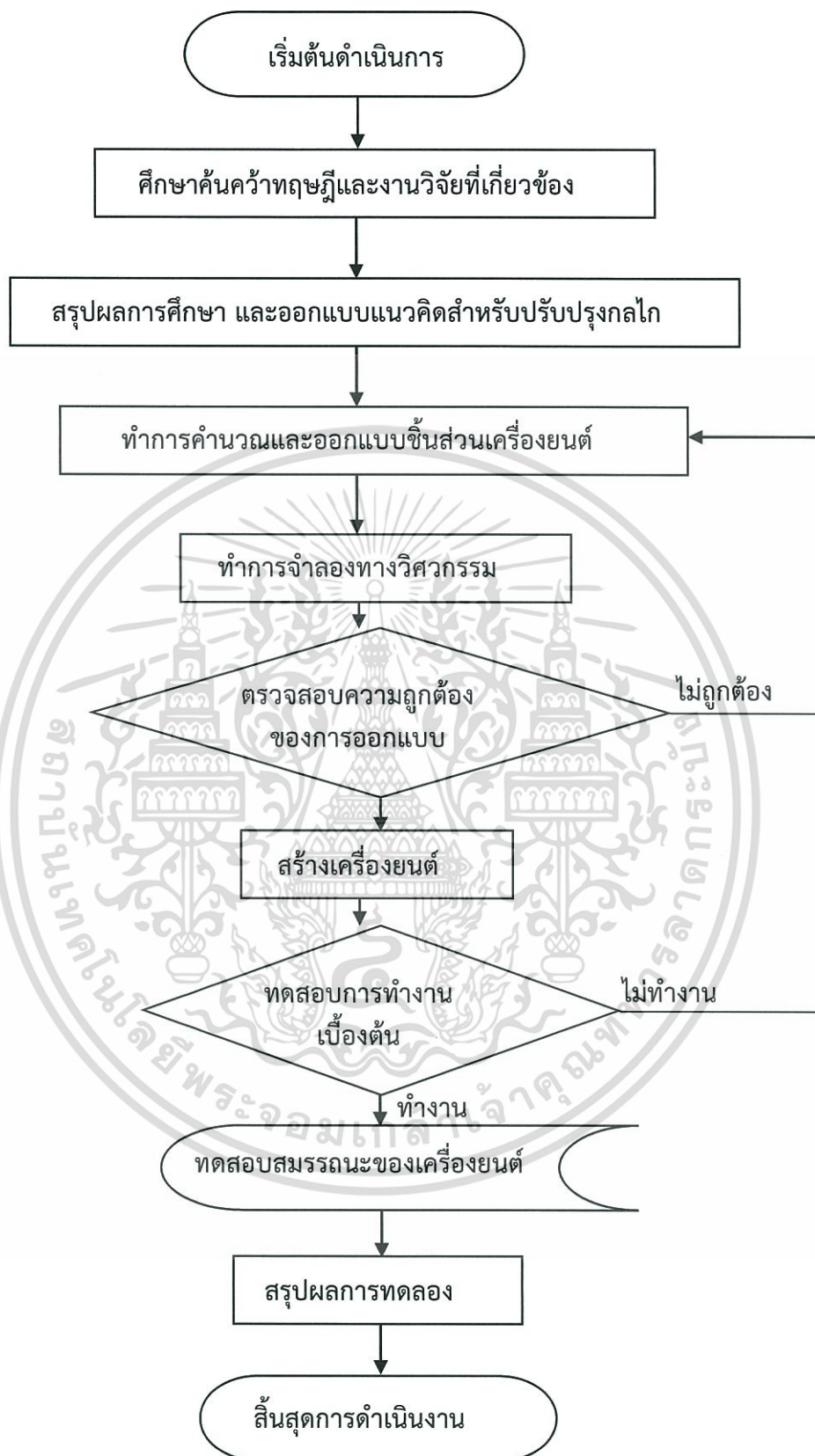
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้ความรู้และประสบการณ์ที่ได้เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต่อไป
2. ต้นแบบเครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นจะสามารถเป็นแบบในการศึกษาเพื่อพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาต่อไปได้

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของวัฏจักรและเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรวมถึงลักษณะเคลื่อนที่และการส่งกำลังของกลไกเครื่องส่งกำลังของกลไกส่งกำลังในเครื่องยนต์จากหนังสือและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องรวมถึงแหล่งข้อมูลอื่นๆ
2. ทำการสรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาและออกแบบแนวคิดสำหรับการสร้างกลไกลักษณะใหม่ รวมถึงความเป็นไปได้ในการทำงาน
3. ออกแบบชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์โดยอ้างอิงจากเครื่องต้นแบบของรอส ทำการคำนวณทางความร้อนและทางกลเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมกับการทำงาน
4. ทำเครื่องยนต์ที่ออกแบบมาทำการจำลองทางวิศวกรรม
5. ตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบเครื่องยนต์
(หากยังไม่ถูกต้องให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 1.6.3)
6. ทำการสร้างเครื่องยนต์
7. ทำการทดสอบเบื้องต้นว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้
(หากเครื่องยนต์ไม่ทำงานให้กลับไปขั้นตอนที่ 1.6.3)
8. ทำการทดสอบเครื่องยนต์และบันทึกค่า
9. สรุปผลการทดลอง
10. สิ้นสุดการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

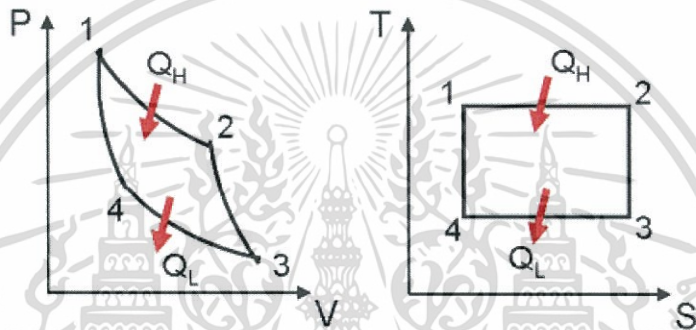
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

2.1 วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle)

เป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ในอุดมคติ ซึ่งวัฏจักรคาร์โนต์เป็นวัฏจักรที่ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด ซึ่งไม่มีวัฏจักรใดที่ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนเกินวัฏจักรนี้ โดยวัฏจักรคาร์โนต์นั้นประกอบด้วยกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ 4 ขั้นตอน คือ กระบวนการรับความร้อนคงที่ กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก กระบวนการคายความร้อนคงที่ และกระบวนการอัดตัวแบบไอเซนโทรปิก ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงแผนภาพ P-V และ T-S ของวัฏจักรคาร์โนต์

แต่ทว่าในชีวิตจริง เราไม่สามารถสร้างเครื่องยนต์ที่มีลักษณะตามวัฏจักรคาร์โนต์ได้ เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะควบคุมไม่ให้มีการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบโดยชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ต่างๆได้ อีกทั้งเราไม่สามารถสร้างกระบวนการไอเซนโทรปิกแบบอัดตัวและขยายตัว เนื่องจากทุกครั้งที่มีการอัดตัวและขยายตัวเกิดขึ้น อุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ รวมถึงไม่สามารถทำให้เครื่องยนต์ที่เราออกแบบทำงานแบบย้อนกลับได้ (Reversible) ดังนั้นเราจึงอ้างอิงวัฏจักรคาร์โนต์นี้มาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบเครื่องยนต์ให้ใช้งานได้จริง

2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling cycle)

เป็นวัฏจักรที่ลอกเลียนแบบวัฏจักรคาร์โนต์ในบางส่วน ประกอบด้วยกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1-2 กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal compression)

ในขั้นตอนนี้ความร้อนจะถูกดึงออกจากสารทำงานและระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยที่อุณหภูมิในขั้นตอนนี้จะเป็นอุณหภูมิที่ต่ำสุดของวัฏจักรและลูกสูบจะอัดสารทำงานให้มีความดันสูงขึ้น โดยงานที่ใช้ในการอัดนั้นเท่ากับความร้อนที่ระบายออกจากระบบทำให้กระบวนการนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในแต่มีการลดลงของเอนโทรปี โดยมีสมการสำหรับระบุสถานะของกระบวนการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} \quad (2.1)$$

$$Q_{out} = W_c = P_1 V_1 \ln\left(\frac{1}{r}\right) = R T_1 \ln\left(\frac{1}{r}\right) \quad (2.2)$$

$$S_2 - S_1 = R \ln\left(\frac{1}{r}\right) \quad (2.3)$$

| | | |
|-------|-----------------|--|
| เมื่อ | T_1 และ T_2 | คืออุณหภูมิของสารทำงาน ณ สถานะที่ 1 และ 2 โดยที่ $T_1 = T_2 = T_{min}$ |
| | P_1 และ P_2 | คือความดันของสารทำงาน ณ สถานะที่ 1 และ 2 |
| | V_1 และ V_2 | คือปริมาตรของสารทำงาน ณ สถานะที่ 1 และ 2 |
| | r | คืออัตราส่วนการอัด โดยที่ $r = V_1/V_2$ |
| | Q_{out} | คือความร้อนที่ระบายออกจากระบบ |
| | W_c | คืองานที่ใช้ในการอัด |
| | S_1 และ S_2 | คือเอนโทรปี ณ สถานะที่ 1 และ 2 |

ขั้นตอนที่ 2-3 กระบวนการรับความร้อนแบบปริมาตรคงที่ (Constant volume heat addition process)

ในกระบวนการนี้สารทำงานจะเคลื่อนตัวจากส่วนเย็นเพื่อไปรับความร้อนโดย มีความดันและอุณหภูมิสูงสุดของระบบ โดยกระบวนการนี้จะมีพลังงานภายในและเอนโทรปีเพิ่มขึ้น

$$P_3 = \frac{P_2 T_3}{T_2} \quad (2.4)$$

$$Q_{in} = C_v (T_3 - T_2) \quad (2.5)$$

$$S_3 - S_2 = C_v \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) \quad (2.6)$$

| | | |
|-------|-------|--|
| เมื่อ | T_3 | คืออุณหภูมิของสารทำงาน ณ สถานะที่ 3 โดยที่ $T_3 = T_{max}$ |
| | P_3 | คือความดันของสารทำงาน ณ สถานะที่ 3 โดยที่ $P_3 = P_{max}$ |
| | V_3 | คือปริมาตรของสารทำงาน ณ สถานะที่ 3 โดยที่ $V_2 = V_3$ |
| | Q_h | คือความร้อนที่ป้อนในส่วนรับความร้อน |
| | S_3 | คือเอนโทรปี ณ สถานะที่ 3 |

ขั้นตอนที่ 3-4 กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal expansion process)

ในกระบวนการนี้ความร้อนจะถูกป้อนให้กับกระบอกสูบขยายตัว เมื่อสารทำงานรับความร้อนก็จะขยายตัวดันลูกสูบออกและได้งานออกมาจากระบบโดยที่อุณหภูมิคงที่เนื่องจากความร้อนทั้งหมดที่ให้ถูกเปลี่ยนเป็นงานในการขยายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_4 = \frac{P_3 T_4}{T_3} \quad (2.7)$$

$$Q_e = W_e = P_3 V_3 \ln(r) = RT_3 \ln(r) \quad (2.8)$$

$$S_4 - S_3 = R \ln(r) \quad (2.9)$$

| | | |
|-------|-------|---|
| เมื่อ | T_4 | คืออุณหภูมิของสารทำงาน ณ สถานะที่ 4 โดยที่ $T_3 = T_4 = T_{\max}$ |
| | P_4 | คือความดันของสารทำงาน ณ สถานะที่ 4 |
| | V_4 | คือปริมาตรของสารทำงาน ณ สถานะที่ 4 |
| | r | คืออัตราส่วนการอัด โดยที่ $r = V_4/V_3$ |
| | Q_e | คืองานที่ได้จากการขยายตัว |
| | S_4 | คือเอนโทรปี ณ สถานะที่ 4 |

ขั้นตอนที่ 4-1 กระบวนการคายความร้อนแบบปริมาตรคงที่ (constant volume heat rejection process)

หลังจากที่สารทำงานขยายตัวแล้วและถูกกลูกลับคืนให้ไหลกลับไปสู่กระบอกสูบอัดตัว ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการระบายความร้อนออกส่วนหนึ่งก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการอัดตัว โดยจะการระบายความร้อนนี้เป็นเพียงการลดพลังงานภายในของระบบลงโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

$$P_1 = \frac{P_4 T_4}{T_1} \quad (2.10)$$

$$Q_k = C_v (T_1 - T_4) \quad (2.11)$$

$$S_1 - S_4 = C_v \ln\left(\frac{T_4}{T_1}\right) \quad (2.12)$$

ดังนั้นเมื่อเราทำการรวมทุกขั้นตอนของวัฏจักรเราจะได้

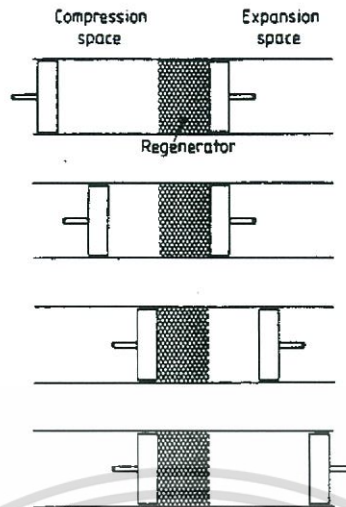
$$W_{\text{net}} = W_e + W_c \quad (2.13)$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_e} \quad (2.14)$$

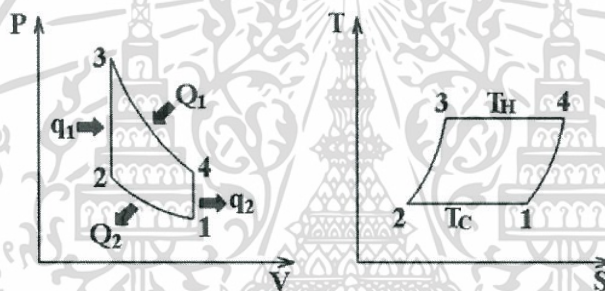
| | | |
|-------|------------------|---------------------------|
| เมื่อ | W_{net} | คืองานสุทธิของวัฏจักร |
| | η_{th} | คือประสิทธิภาพทางความร้อน |

ซึ่งเราสามารถแสดงลักษณะขั้นตอนของแต่ละกระบวนการได้ตามรูปที่ 2.2.1 และ ในรูปที่ 2.2.2 นั้นได้แสดงกราฟความดันและปริมาตร กับกราฟอุณหภูมิและเอนโทรปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



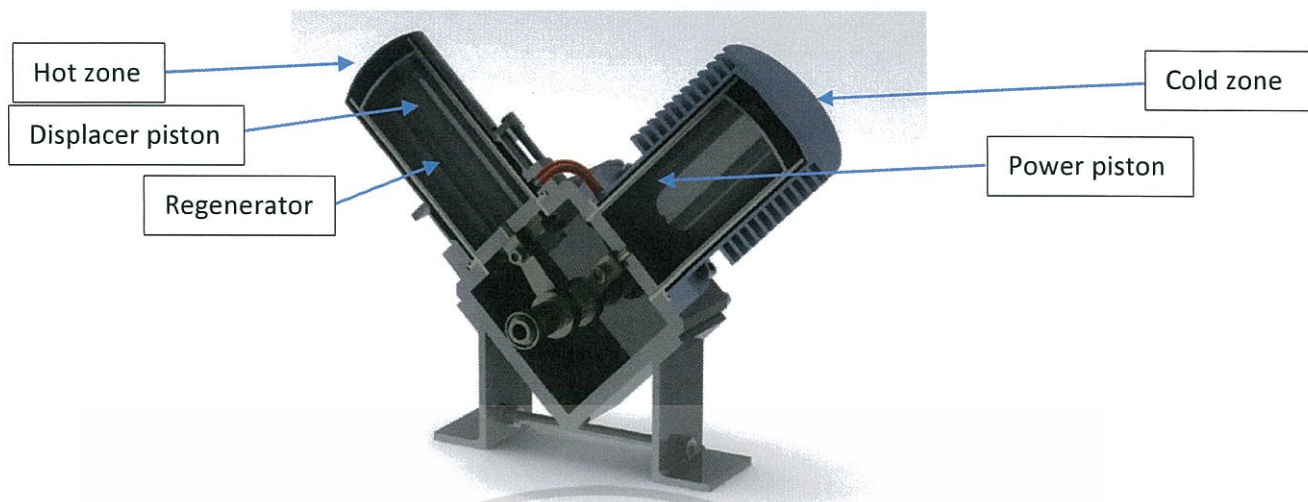
รูปที่ 2.2.1 ภาพแสดงลักษณะของลูกสูบในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรสเตอร์ลิง



รูปที่ 2.2.2 กราฟแผนภาพ P-V และ T-S ของวัฏจักรสเตอร์ลิง

2.3 รูปแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นจะมีส่วนประกอบสำคัญหลัก 5 ส่วนคือจะมีการแบ่งเครื่องยนต์ออกเป็น ส่วนรับความร้อน (Hot zone), รีเจนเนเรเตอร์ (Regenerator) และส่วนระบายความร้อน (Cold zone) ซึ่งจะมีลูกสูบดิสเพลสเซอร์ (Displacer piston) ที่อยู่ในด้านร้อนคอยทำหน้าที่ไล่สารทำงานภายในเครื่องยนต์ให้ไหลกลับจากด้านร้อนและด้านเย็น และลูกสูบกำลัง (Power piston) ซึ่งเป็นลูกสูบที่ทำงานกับระบบ องค์ประกอบโดยทั่วไปของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3.1



รูปที่ 2.3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาแบบลูกสูบวี

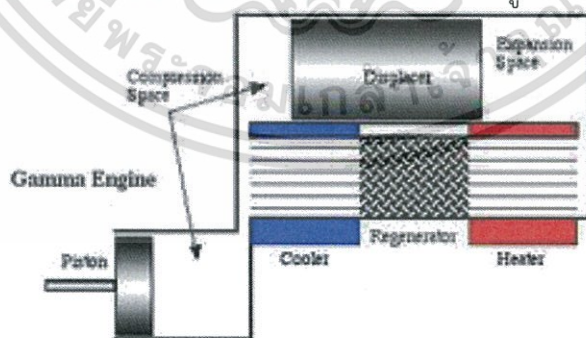
เนื่องจากเครื่องยนต์จะใช้การไหลเวียนของสารทำงานจึงต้องการอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างรวดเร็วเพื่อให้เครื่องยนต์สามารถทำงานให้เป็นไปตามวัฏจักรได้ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงมีการติดตั้งรีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะพรุนทำหน้าที่ดึงความร้อนจากสารทำงานขณะเคลื่อนจากส่วนร้อนไปส่วนเย็นและเก็บไว้ และทำหน้าที่มอบความร้อนที่เก็บไว้คืนให้สารทำงานขณะเคลื่อนที่จากส่วนเย็นไปส่วนร้อน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน

2.3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบกลไกกลศาสตร์

2.3.1.1 เครื่องยนต์แบบส่งกำลัง 1 ทิศทาง

2.3.1.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกรมม่า

เครื่องยนต์ชนิดนี้จะทำงานโดยใช้ดีสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังที่ถูกติดตั้งแยกกันคนละกระบอกสูบแต่ส่งกำลังไปยังเพลลาข้อเหวี่ยงเดียวกัน เนื่องจากลูกสูบทั้ง 2 ชนิดอยู่แยกกันและมีหน้าที่ทำงานแตกต่างกันอย่างชัดเจนทำให้กลไกชนิดแกรมม่าสามารถสร้างได้ง่ายและมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนด้วยเช่นกัน โดยความต่างเฟสที่เหมาะสมของกลไกอยู่ที่ 100 องศา

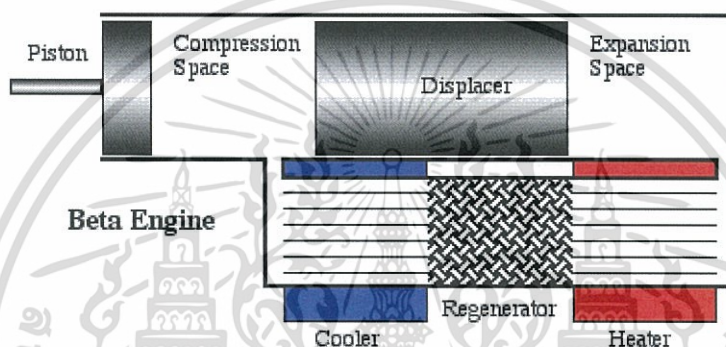


รูปที่ 2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกรมม่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.1.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า

สำหรับกลไกเบตานั้นมีหลักการการทำงานคล้ายกับกลไกแกรมมานั้นคือ ลูกสูบดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังทำงานแยกหน้าที่กันอย่างชัดเจน เพียงแต่ว่ากลไกชนิดเบตานั้นลูกสูบทั้ง 2 จะวางตัวอยู่ในกระบอกสูบเดียวกัน เครื่องยนต์จึงเป็นลักษณะ 1 กระบอกสูบโดยที่ดิสเพลสเซอร์จะวางตัวอยู่ในส่วนร้อนและลูกสูบกำลังจะวางตัวอยู่ในส่วนเย็น และจากการที่มีกระบอกสูบร่วมกันนี้ทำให้เครื่องยนต์มีอัตราการอัดตัวสูงมากอีกทั้งยังลดปริมาตรที่ไม่ถูกใช้งาน (Dead space) ทำให้เครื่องยนต์ชนิดเบต้าเป็นเครื่องยนต์ที่ทำกำลังได้สูง โดยความแตกต่างเฟสระหว่างลูกสูบทั้ง 2 ให้กำลังสูงสุดอยู่ที่ 30 องศา แต่ทว่าเนื่องจากทั้งส่วนให้ความร้อนและส่วนระบายความร้อนอยู่ต่อกันทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนโดยไม่จำเป็นที่ส่วนร้อนอีกทั้งยังทำให้อุณหภูมิส่วนเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากได้รับความร้อนจากส่วนร้อน จะทำให้งานที่ได้จากเครื่องยนต์ลดลงได้ด้วยเช่นกัน

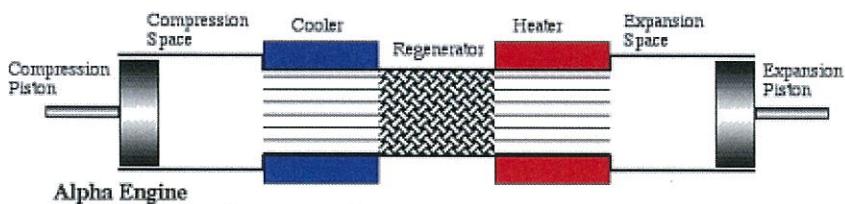


รูปที่ 2.3.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า

2.3.1.1.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

กลไกแอลฟาเป็นกลไกที่มีโครงสร้างของส่วนประกอบง่ายที่สุดนั่นคือมีลูกสูบ 2 ลูก แยกอยู่กับคนละกระบอกเช่นเดียวกับกลไกแกรมมา แต่ส่วนที่เป็นเอกลักษณ์คือ ลูกสูบทั้ง 2 จะทำหน้าที่เป็นดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลัง โดยเมื่อสารทำงานได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนทำให้สารทำงานภายในกระบอกสูบร้อนขยายตัวทำให้ดันลูกสูบด้านร้อนออกไป จากนั้นลูกสูบจะเคลื่อนที่กลับมาด้วยโมเมนตัมความเฉื่อยของเพลลาและทำหน้าที่เป็นดิสเพลสเซอร์ไล่สารทำงานไปสู่ส่วนระบายความร้อน และเมื่อสารทำงานเข้าสู่ส่วนระบายความร้อน ลูกสูบด้านเย็นจะทำหน้าที่อัดสารทำงานให้มีความดันสูงสุดก่อนจะผลักสารทำงานนี้กลับไปรับความร้อนที่กระบอกสูบร้อนจนเป็นวัฏจักรของเครื่องยนต์ โดยงานที่ได้จากกลไกแอลฟานี้เกิดจากการขยายตัวของลูกสูบร้อน กลไกแอลฟานั้นสามารถสร้างอัตราการอัดได้เทียบเท่ากับกลไกเบต้า แต่กลไกชนิดแอลฟานั้นมีขนาดเล็ก ซับซ้อนน้อยกว่า อีกทั้งส่วนด้านร้อนและด้านเย็นแยกกันอยู่คนละกระบอกเพื่อป้องกันการเกิดความร้อนสมดุลภายในเครื่องยนต์ (Heat balance) โดยความต่างเฟสของเครื่องยนต์ชนิดแอลฟาอยู่ที่ 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

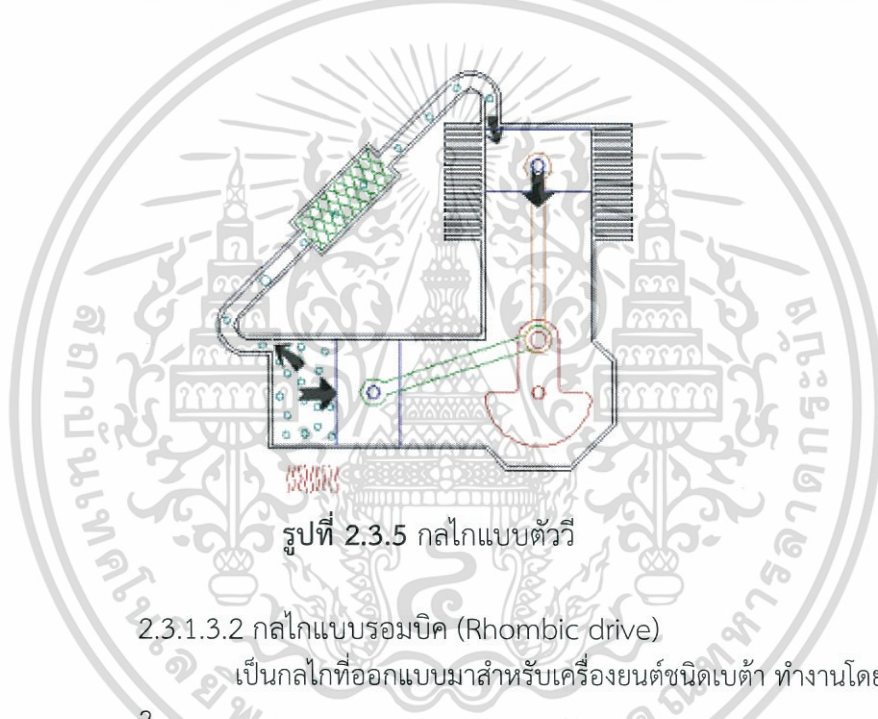
2.3.1.3 กลไกที่นิยมใช้ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงประเภทต่างๆในปัจจุบัน

2.3.1.3.1 กลไกแบบตัววี (V-engine)

เป็นกลไกที่นิยมใช้กับเครื่องยนต์ชนิดแอลฟา กระจบอกลูกสูบจะทำมุมกัน

เป็น

รูปตัววีโดยการให้และระบายความร้อนจะเกิดบริเวณท่อที่เชื่อมกันระหว่างส่วนร้อนและส่วนเย็น



รูปที่ 2.3.5 กลไกแบบตัววี

2.3.1.3.2 กลไกแบบรอมบิก (Rhombic drive)

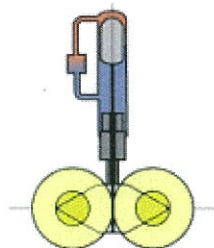
เป็นกลไกที่ออกแบบมาสำหรับเครื่องยนต์ชนิดเบต้า ทำงานโดยใช้เฟือง

2

ชุดคอคยควบคุมการเคลื่อนที่ของก้านลูกสูบที่อยู่ตรงกลางระหว่างเฟือง 2 ชุดนี้ กลไกนี้จะมีคามสมดุลมาก

เนื่องจาก แรงที่กระทำจากลูกสูบจะลงมาถึงกึ่งกลางของเครื่องยนต์อีกทั้งยังสามารถลดแรงเสียดทานจากด้านข้างได้อีก

เช่นกัน

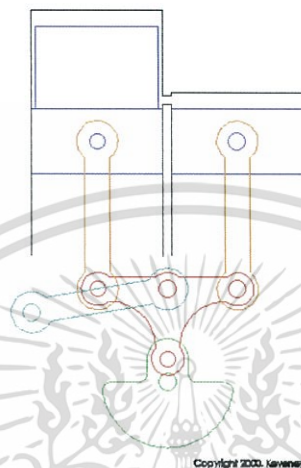


รูปที่ 2.3.6 กลไกแบบรอมบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.3.3 กลไกโรสยอร์ก (Ross Yoke mechanism)

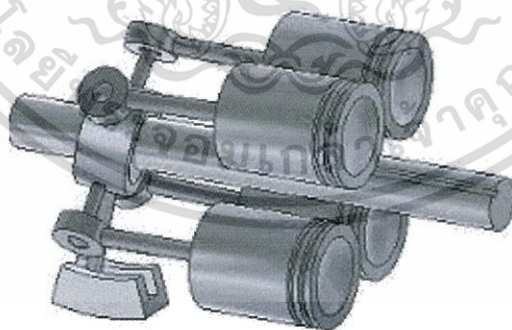
เป็นกลไกที่ใช้กับเครื่องยนต์ที่มี 2 ลูกสูบโดยกลไกประกอบด้วยชิ้นส่วน ยอร์ก(York linkage) ซึ่งต่อกับก้านลูกสูบทั้ง 2 และมีก้านร็อคเกอร์คอยประกอบการเคลื่อนที่ของกลไก จุดเด่นของกลไกนี้คือสามารถออกแบบเครื่องยนต์ให้กระบอกสูบทั้ง 2 ตั้งขนานกันได้ซึ่งจะช่วยลดทั้ง ขนาดของเครื่องยนต์และแรงเสียดทานด้านข้างจากลูกสูบ



รูปที่ 2.3.7 กลไกโรสยอร์ก

2.3.1.3.4 กลไกวobble plate (Wobble plate)

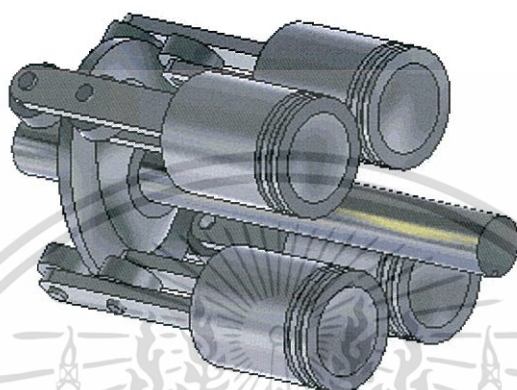
เป็นกลไกที่ใช้กับเครื่องยนต์ประเภทส่งกำลัง 2 ทิศทาง ลูกสูบทั้ง และ เพลาส่งกำลังนั้นจะตั้งขนานกันโดยการใช้ข้อต่อแบบลูกบอลเชื่อมต่อกันเข้ากับเพลาทำให้มีความอิสระในการเคลื่อนที่มากขึ้นและมีข้อเหวี่ยงแบบตัว Z ประกอบการเคลื่อนที่ของกลไกนี้



รูปที่ 2.3.8 กลไกวobble plate

2.3.1.3.5 กลไกสวอชเพลท(swash plate)

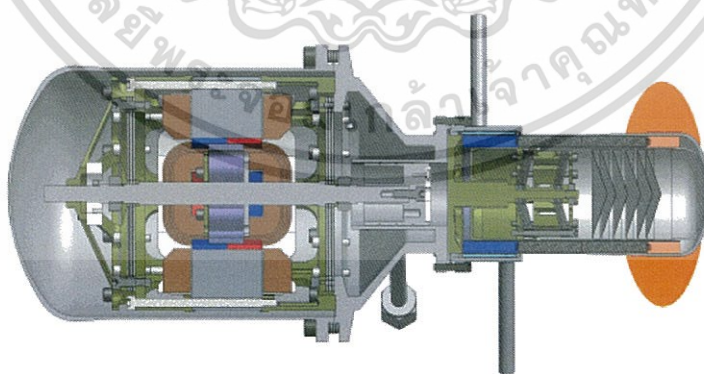
ใช้กับเครื่องยนต์ประเภทส่งกำลัง 2 ทิศทางเช่นกัน โดยกลไกจะทำงานในลักษณะเดียวกับวอชเพลท แต่จะอาศัยงานหมุนตรงกลางคอยควบคุมเฟสการเคลื่อนที่และก้านสูบจะต่อกับงานนี้ด้วยแบริ่ง การใช้กลไกสวอชเพลทนี้ เมื่อแรงมากระทำที่ลูกสูบส่งผ่านมายังเพลท แบริ่งจะช่วยประคองการเคลื่อนที่และรับแรงเสียดทานด้านข้างจากลูกสูบไว้ ทำให้ลูกสูบสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่มีแกว่งของก้านสูบ



รูปที่ 2.3.9 กลไกสวอชเพลท

2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ

กลไกชนิดนี้จะไม่มีส่วนกลไกเชื่อมต่อกับดีสเพลสเซอร์หรือลูกสูบกำลัง การทำงานของเครื่องยนต์จะอาศัยตัวสารทำงานในการส่งกำลังแทนชิ้นส่วนทางกล การเคลื่อนที่ของลูกสูบจะเป็นการเคลื่อนที่แบบสั้นโดยอาศัยสารทำงานซึ่งจะประพุดตัวเหมือนสปริงคอยควบคุมการเคลื่อนที่และส่งแรงให้กับเครื่องยนต์



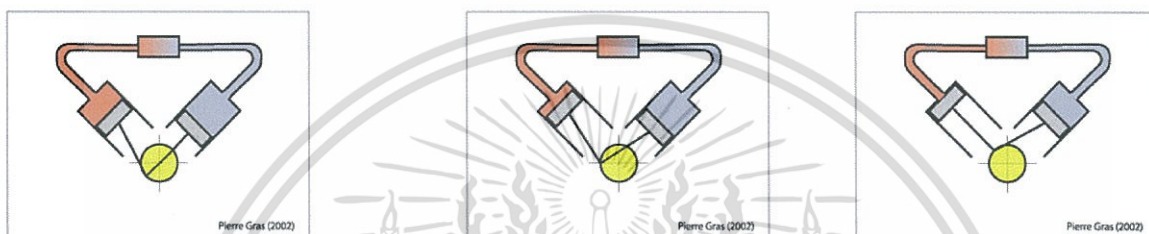
รูปที่ 2.3.10 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หลักการทำงานของเครื่องยนต์ชนิดแอลฟา

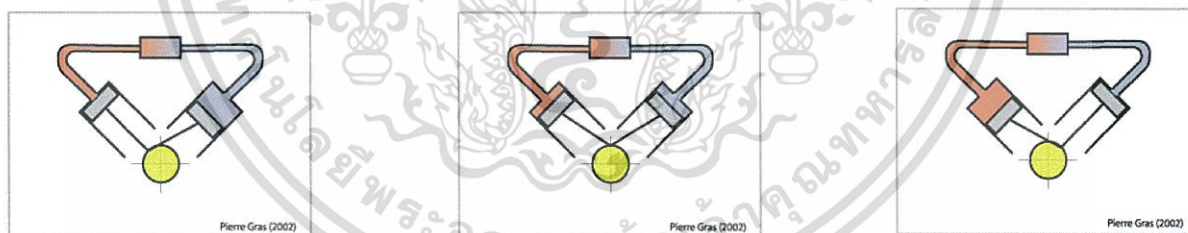
เครื่องยนต์แบบแอลฟานั้นจะมีลูกสูบ 2 ลูกสูบคือลูกสูบร้อน (Hot piston) ซึ่งจะอยู่ในส่วนที่ได้รับความร้อนของเครื่องยนต์ (Hot zone) และลูกสูบเย็น (Cold piston) ซึ่งจะอยู่ในส่วนเย็น (Cold zone) ซึ่งลูกสูบทั้ง 2 ต่างอยู่กันคนละกระบอกสูบ ซึ่งเราสามารถแสดงจังหวะการเคลื่อนที่ของลูกสูบในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1-2 กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal compression process) ลูกสูบเย็นจะอยู่ในตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (Bottom dead center) และลูกสูบร้อนจะขยายตัวไปอยู่ที่กลางกระบอกสูบร้อน



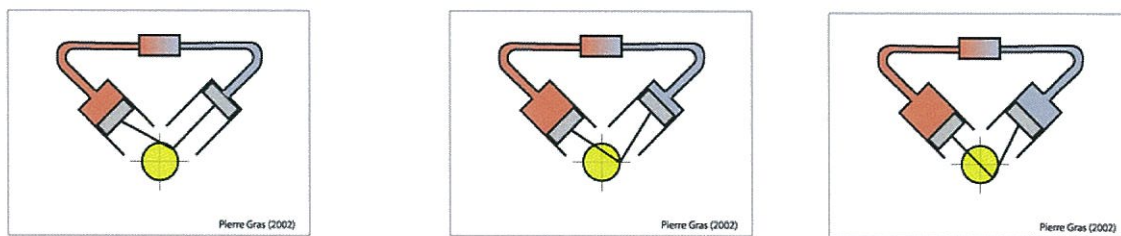
รูปที่ 2.4.1 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 1-2

ขั้นตอนที่ 2-3 กระบวนการรับความร้อนแบบปริมาตรคงที่ ลูกสูบเย็นจะเคลื่อนที่ขึ้นจากตำแหน่งเดิมก่อนหน้า โดยที่ลูกสูบร้อนจะเคลื่อนที่ลงเล็กน้อยโดยที่ยังไม่มีงานเกิดขึ้น เพียงแต่แค่รับความร้อนให้สารทำงานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น



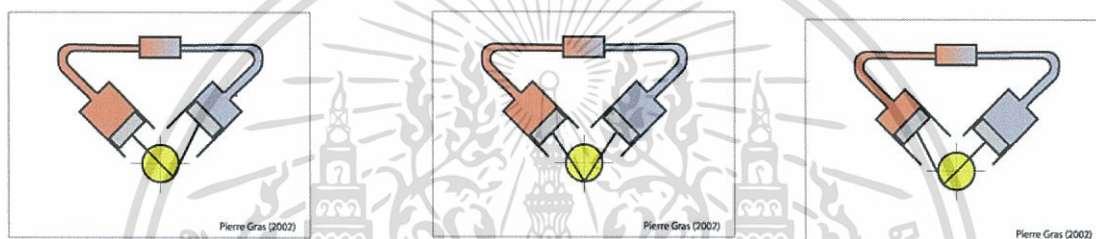
รูปที่ 2.4.2 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 2-3

ขั้นตอนที่ 3-4 กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ ขั้นตอนนี้คือขั้นตอนที่มีงานเกิดขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของลูกสูบร้อนโดยลูกสูบร้อนจะถูกสารทำงานที่มีพลังงานดันให้ลงมา ซึ่งในขณะเดียวกันลูกสูบเย็นก็จะเคลื่อนที่ลงมาเล็กน้อยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.4.3 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 3-4

ขั้นตอนที่ 4-1 กระบวนการคายความร้อนแบบปริมาตรคงที่ ขั้นตอนนี้ลูกสูบเย็นจะเคลื่อนที่กลับมาด้วยแรงเฉื่อยของเพลาค้อเหวี่ยงและผลึกสารทำงานออกจากกระบอกสูบร้อนไปยังกระบอกสูบเย็น โดยในขั้นตอนนี้เครื่องยนต์จะระบายความร้อนออกจากสารทำงานทำให้อุณหภูมิของสารทำงานลดลงแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของปริมาตร



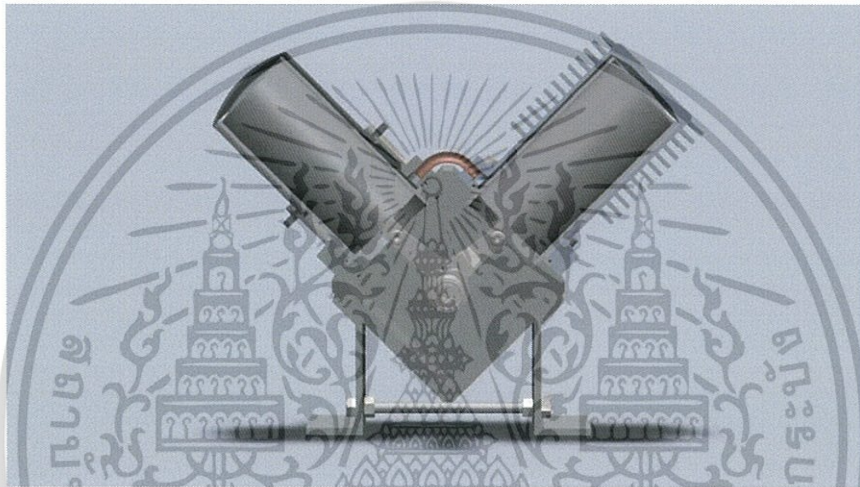
รูปที่ 2.4.4 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 4-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

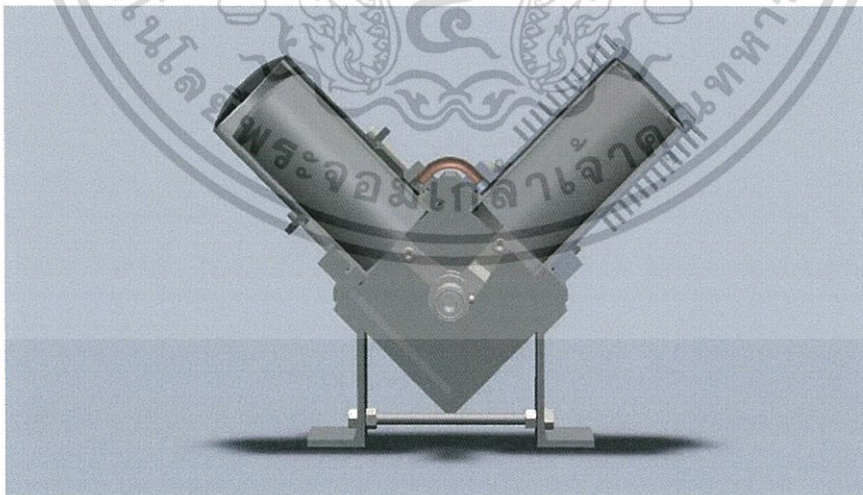
บทที่ 3

แนวคิดและการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิด V-90

จากวัตถุประสงค์เราต้องการกำลังจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มากที่สุดเราจึงเลือกแบบ D-90 ซึ่งสามารถส่งกำลังได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอื่นๆ โดยเราศึกษาจากแบบ D-90 แล้วนำมาประยุกต์เป็น V-90 เนื่องจากกระบอกสูบร้อนและกระบอกสูบเย็นของเครื่องยนต์ D-90 นั้นอยู่ใกล้กันจึงอาจทำให้เวลาให้ความร้อนที่กระบอกสูบร้อน ความร้อนจะถูกพาไปยังกระบอกสูบเย็นได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับการที่ปรับปรุงเป็น V-90 ซึ่งกระบอกสูบทั้งมีระยะห่างมากกว่า

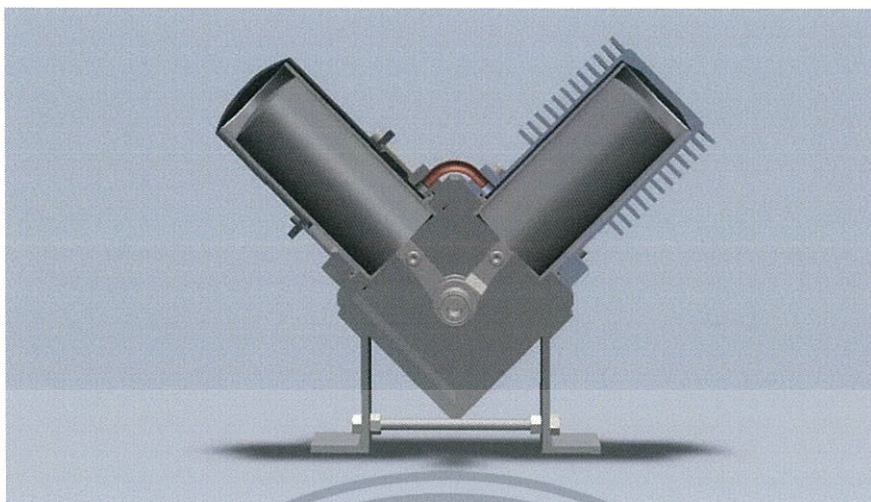


รูปที่ 3.1 ตำแหน่งของลูกสูบที่ตำแหน่ง 0 องศา

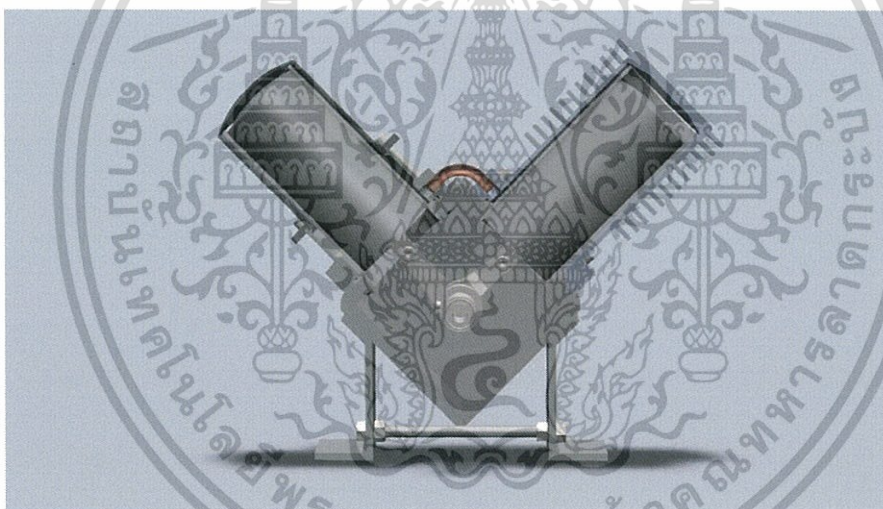


รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของลูกสูบที่ตำแหน่ง 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของลูกสูบที่ตำแหน่ง 180 องศา



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของลูกสูบที่ตำแหน่ง 270 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบ

4.1 สมมติฐานสำหรับการคำนวณในการออกแบบ

1. อากาศที่ใช้เป็นสารทำงานเป็นก๊าซอุดมคติ
2. อากาศที่ใช้เป็นสารทำงานเป็นอากาศแห้ง
3. การไหลของสารทำงานเป็นการไหลแบบสภาวะคงตัว
4. ความดันมีค่าคงที่
5. การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีไม่นำมาคำนวณ

การออกแบบจะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนสำหรับการออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน และทฤษฎีกฎี๊ดูแมนแบบปรับปรุง สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนทางกล

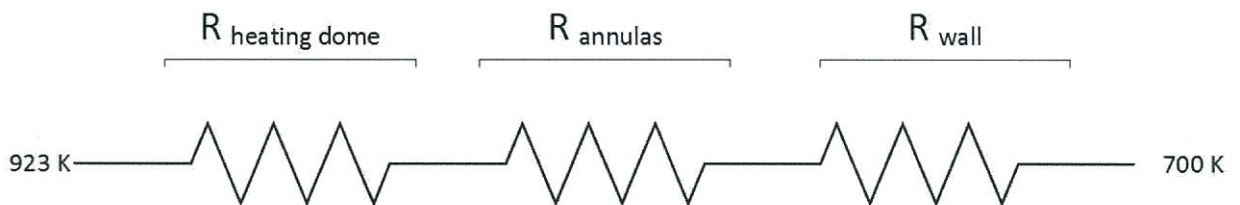
4.2 การออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger section)

4.2.1 Heater

เราเลือกใช้ Heating Dome เนื่องจากมีการออกคำนวณที่ง่ายและตรงยอดโดมยังช่วงกระจายความเค้นจุด (Local Stress) ที่เกิดบริเวณขอบอีกทั้งยังเพิ่มพื้นที่ในการรับความร้อน ในส่วนของการออกแบบ Heating Dome เราจะคิดว่าความร้อนจากภายนอกถูกส่งผ่านจากภายนอกสู่ผนัง Heating Dome โดยมีลำดับการถ่ายเทความร้อนดังนี้

1. ความร้อนจากผนังด้านนอกของ Heating Dome ถูกนำความร้อนเข้าสู่ผนังกระบอกด้านในของ Heating Dome
2. ความร้อนจากผนังด้านในของ Heating Dome ถูกพาความร้อนเข้าโดยอากาศไปยังผิวด้านนอกของกระบอกสูบร้อน
3. ความร้อนจากผนังด้านนอกของกระบอกสูบร้อนถูกนำความร้อนเข้าสู่ผนังกระบอกด้านในของกระบอกสูบร้อน

ซึ่งเราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปวงจรความร้อนได้ดังนี้



รูปที่ 4.2.1 รูปวงจรความร้อนของฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะทำการหาความยาวของผนังกระบอกสูบโดยคำนวณจากสมการข้างล่างนี้

$$\dot{Q}_{in} = \frac{T_e - T_i}{R_{cond, heating dome} + R_{conv, annulus} + R_{cond, hot cylinder}} \quad (4.1)$$

1.1 ความร้อนจากผนังด้านนอกของ Heating Dome ถูกนำความร้อนเข้าสู่ผนังกระบอกด้านในของ Heating Dome โดยมีวิธีคิดดังนี้

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \times \pi \times k \times L} = \frac{5.5363 \times 10^{-4}}{L} \quad (4.2)$$

โดย $r_2 = 0.0365 \text{ m}$, $r_1 = 0.0345 \text{ m}$, $k = 16.2 \frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{K}}$

1.2 ความร้อนจากผนังด้านในของ Heating Dome ถูกพาความร้อนไปยังผิวด้านนอกของกระบอกสูบร้อน โดยมีวิธีคิดดังนี้

คุณสมบัติต่างๆที่ใช้ในการคำนวณเราเลือกใช้ Average Temperature (T_{avg})

$$\frac{T_s + T_e}{2} = \frac{923 + 590}{2} = 756.5 \text{ K}$$

โดย $v_{avg} = 2.75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $k = 5.5435 \times 10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{K}}$, $D_o = 0.069 \text{ m}$, $D_i = 0.065 \text{ m}$

เนื่องจากอากาศไหลผ่าน Annular Tube จึงคำนวณดังนี้

$$\frac{D_i}{D_o} = 0.942$$

แล้วนำค่าที่ได้ไปเทียบกับตารางเพื่อหาค่า Nu_o

ตารางที่ 4.1 ค่า Nusselt number

TABLE 8-4-1

Nusselt number for fully developed laminar flow in an annulus with one surface isothermal and the other adiabatic (Kays and Perkins, Ref. 14)

| D_i/D_o | Nu_i | Nu_o |
|-----------|--------|--------|
| 0 | — | 3.66 |
| 0.05 | 17.46 | 4.06 |
| 0.10 | 11.56 | 4.11 |
| 0.25 | 7.37 | 4.23 |
| 0.50 | 5.74 | 4.43 |
| 1.00 | 4.86 | 4.86 |

$$Nu_o = 4.8101$$

$$D_h = D_o - D_i = 0.004 \text{ m}$$

$$h_o = \frac{kNu_o}{D_h} = \frac{4.8101 \times 5.5435 \times 10^{-2}}{0.004} = 66.66 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times \text{K}}$$

$$A_s = \pi D_o L = \pi \times 0.065 \times L$$

$$R_{conv,2} = \frac{1}{h_o A_s} = \frac{0.0735}{L}$$

1.3 ความร้อนจากผนังด้านนอกของกระบอกสูบร้อนถูกนำความร้อนเข้าสู่ผนังกระบอกด้านในของกระบอกสูบร้อน

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \times \pi \times k \times L} \quad (4.3)$$

$$= \frac{7.8637 \times 10^{-4}}{L}$$

โดย $r_2 = 0.0325 \text{ m}$, $r_1 = 0.030 \text{ m}$, $k = 16.2 \frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{K}}$

$\dot{Q}_{in} = 297 \text{ w}$ (ได้จากวัฏจักรมาคำนวณจะได้)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะได้

$$297 = \frac{923 - 590}{\frac{5.5363 \times 10^{-4}}{L} + \frac{0.0735}{L} + \frac{7.8637 \times 10^{-4}}{L}}$$

จะได้ $L = 0.067 \text{ m} = 6.7 \text{ cm}$

แต่เราจะทำการเลือกใช้ความสูงที่ 9.1 cm เพื่อให้เกิดความสมดุลกับกระบอกสูบฝั่งเย็นและเพื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนขณะทดลองจริงอาจมีค่าสูงกว่าวัฏจักรที่ได้และในอนาคตอาจมีการพัฒนาโดยการให้ความร้อนที่สูงขึ้นได้

Displacer

ในส่วนของ Heater จะมีการเกิด Shuttle Heat เกิดขึ้น ดังนั้นเราจึงทำการติดตั้ง Displacer ไว้บนลูกสูบร้อนเพื่อลดการเกิด Shuttle Heat อีกทั้งยังลด Dead space ที่กระบอกสูบร้อน โดยเราจะคำนวณหาความยาวของ Displacer จากสมการนี้

$$\dot{Q}_{sh} = hA_s(T_s - T_\infty) = \frac{0.4 \times L^2 \times k \times D \times (T_e - T_i)}{(S \times Z)} \quad (4.4)$$

โดยที่ L = ระยะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (cm)

k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W/m}^2\text{K}$)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ (cm)

S = ช่องว่างระหว่างกระบอกสูบกับดิสเพลสเซอร์ (cm)

Z = ความยาวของดิสเพลสเซอร์ (cm)

ทำการหาค่า h จากสมการ

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} Pr \quad (4.5)$$

$$= \frac{9.81 \times 1.6221 \times 10^{-3} \times (923 - 310) \times 0.069^3}{(5.3673 \times 10^{-5})^2} \times 0.6827$$

$$= 832532.2514 < 10^{12}$$

ใช้สูตร

$$Nu = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left\{ 1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right\}^{8/27}} \right]^2 \quad (4.6)$$

$$= 13.75$$

$$h = \frac{Nu k}{D}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{13.75 \times 4.7577 \times 10^{-2}}{0.071} = 9.21 \frac{W}{m^2 \times K}$$

$$\dot{Q}_{sh} = 9.21 \times \pi \times 0.071 \times 0.091 \times (923 - 310) = 118.37 \text{ watts}$$

จะแก้สมการหาค่า Z ได้เท่ากับ

$$Z = \frac{0.4 \times L^2 \times k \times D \times (T_e - T_i)}{(S \times \dot{Q}_{sh})}$$

$$Z = \frac{0.4 \times (0.025)^2 \times 4.924 \times 10^{-2} \times 0.06}{0.0005 \times 0.5475 \times 2.75 \times \frac{\pi}{4} \times (0.06^2 - 0.059^2)}$$

$$Z = 6.75 \text{ cm}$$

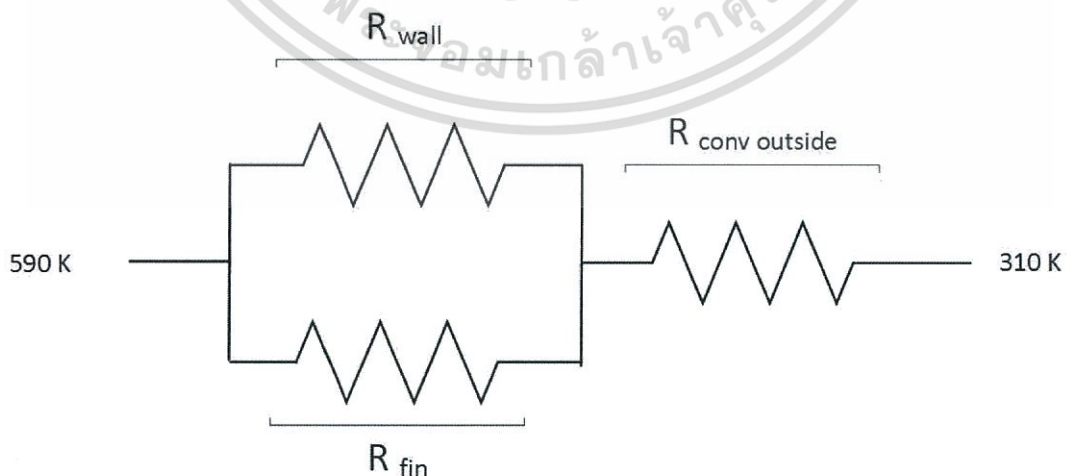
***แต่เนื่องจากเราต้องรักษาความสมดุลของตัวเครื่องยนต์เราจึงต้องออกแบบกระบอกสูบฝั่งร้อนและฝั่งเย็นมีความยาวที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเราจึงเลือกdisplacer ให้มีความสูง 12.5 cm

4.2.2 Cooler

ในส่วนของ Cooler เราเลือกใช้ฟิน เป็นตัวระบายความร้อน โดยมีอากาศภายนอกเป็นสารหล่อเย็น ดังนั้นทำให้เราไม่จำเป็นต้องเสียงานให้กับระบบทำความเย็น และช่วยลดอุณหภูมิรวมของเครื่องยนต์ด้วย โดยมีการถ่ายเทความร้อนดังนี้

1. ความร้อนจากผิวด้านในของกระบอกถูกถ่ายเทความร้อนมายังผิวด้านนอกของกระบอก
2. ความร้อนจากผิวด้านนอกของทรงกระบอกถูกถ่ายเทความร้อนมายังฟิน โดยการนำความร้อน
3. ความร้อนจากผิวด้านนอกของทรงกระบอกและฟินถูกถ่ายเทความร้อนไปสิ่งแวดล้อม

ซึ่งเราสามารถเขียนเป็นวงจรความร้อนได้ดังนี้



รูปที่ 4.2.2 รูปวงจรความร้อนของฮีทเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะทำการหาความร้อนที่ต้องขับออกจากสมการ

$$\dot{Q}_{out} = \frac{Tr - T_{\infty}}{\frac{1}{R_{cond,wall}} + \frac{1}{R_{cond,fin}} + R_{conv,outside}} \quad (4.7)$$

2.1 ความร้อนจากผิวด้านในของกระบอกถูกถ่ายเทความร้อนมายังผิวด้านนอกของกระบอก

$$\begin{aligned} R_{wall} &= \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \times \pi \times k \times L} \\ &= \frac{\ln\left(\frac{0.037}{0.0345}\right)}{2 \times \pi \times 16.2 \times 0.005} \\ &= 0.1375 \end{aligned} \quad (4.8)$$

2.2 ความร้อนจากผิวด้านนอกของทรงกระบอกถูกถ่ายเทความร้อนมายังฟิน โดยการนำความร้อน

$$\begin{aligned} R_{fin} &= \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \times \pi \times k \times L} \\ &= \frac{\ln\left(\frac{0.05}{0.037}\right)}{2 \times \pi \times 231 \times 0.003} \\ &= 0.2283 \end{aligned} \quad (4.9)$$

2.3 ความร้อนจากผิวด้านนอกของทรงกระบอกและฟินถูกถ่ายเทความร้อนไปสิ่งแวดล้อม

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_s} \quad \dots\dots 4.10$$

เราทำการคิดแบบ Natural convection อันดับแรกเราทำการหา Rayleigh number จากสูตร

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})D^3}{\nu^2} Pr \quad (4.11)$$

$$= \frac{9.81 \times 2.2222 \times 10^{-3} \times (590 - 310)0.069^3}{(3.168 \times 10^{-5})^2} \times 0.684$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1685741.96 < 10^{12}$$

$$\text{ใช้สูตร } Nu = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left\{ 1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right\}^{8/27}} \right]^2$$

$$= 16.77$$

นำค่า Nusselt number ที่ได้ไปหาค่า Heat transfer coefficient (h) จะได้

$$h = \frac{Nu k}{D}$$

$$= \frac{16.77 \times 3.71 \times 10^{-2}}{0.074}$$

$$= 8.406 \frac{W}{m^2 \times K}$$

พื้นที่ที่ถูกถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ คำนวณได้ดังนี้

$$A_s = \left[(\pi \times 0.1 \times 0.003) + \left\{ 2 \times \frac{\pi}{4} \times (0.1^2 - 0.074^2) \right\} \right] \times 12$$

$$+ (\pi \times 0.074 \times 0.005 \times 13)$$

$$= 0.1199 \text{ m}^2$$

เรานำอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถูกระบายออกนี้ไปเข้าสมการจะได้

$$\frac{310 - 590}{\frac{12}{0.1375} + \frac{13}{0.2283} + \frac{1}{(8.406 \times 0.1199)}}$$

แก้สมการออกมาจะได้ค่าความร้อนที่ต้องขับออกเท่ากับ 280.29 watts

ซึ่งน้อยกว่าความร้อนที่ป้อนเข้า 297 watts

เราเลือกขับเอาความร้อนออกเนื่องจากที่ผ่านมาการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยมีการใช้ฟินเป็นตัวระบายความร้อนโดยมีอากาศเป็นตัวพาความร้อนนั้นเมื่อคำนวณตามแบบที่เคยคำนวณแล้วนำมาทดสอบพบว่าเครื่องยนต์ระบายความร้อนไม่ทัน ทำให้เกิด Heat balance เราจึงทำการสร้างฟินที่มีการระบายความร้อนที่สูงกว่าจากการคำนวณที่ได้จากวัฏจักรแต่ต้องไม่เกินความร้อนที่ป้อนเข้าไป อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงสมดุลของเครื่องยนต์ด้วย ดังนั้น ความสูงของฮีตเตอร์และคูลเลอร์จะมีความสูงที่ใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 กระจบอกลูบ

เราจำเป็นที่จะต้องออกแบบความหนาของกระจบอกลูบเพื่อให้อสามารถรองรับความดันสูงที่สุดที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ได้จากสมการที่ (4.12)

$$\sigma_y = \frac{P_{max}d_o}{2t} \quad (4.12)$$

เมื่อ σ_y คือค่า Yield Strength ของวัสดุ
 P_{max} คือค่าความดันสูงที่สุดของเครื่องยนต์
 d_o คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของกระจบอกลูบ
 t คือความหนาของกระจบอกลูบ

ซึ่งเราสามารถคำนวณความหนาของกระจบอกลูบได้ดังนี้

$$t = \frac{P_{max}d_o}{2\sigma_y} = \frac{198.74 \times 10^3 \times 60 \times 10^{-3}}{2 \times 250 \times 10^6} = 2.385 \times 10^{-5} \text{ m} = 0.0239 \text{ mm}$$

โดยความหนาจะเลือกใช้ความหนาที่ 1 mm เพื่อความสะดวกในการออกแบบและสร้างชิ้นงาน

4.2.4 ลูกสูบ

เมื่อเราให้ความร้อนต่อวัสดุ วัสดุจะมีการขยายตัวเกิดขึ้นหรือเรียกว่า Thermal Expansion เราจึงต้องทำการคำนวณขนาดของลูกสูบเพื่อการขยายตัวของลูกสูบภายในกระจบอกลูบเมื่อได้รับความร้อนเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดจากกระจบอกลูบอีกทั้งช่วยลดการเสียดสีระหว่างลูกสูบและผนังกระจบอกลูบโดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 3\alpha\Delta T \quad (4.13)$$

$$\Delta V = 3V_0\Delta T$$

$$\begin{aligned} &= 3 \times 17.3 \times 10^{-6} \times \frac{\pi}{4} \times (59.98 \times 10^{-3})^2 \times 0.05 \times (923 - 300) \\ &= 4.5657 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ซึ่งเมื่อเราสนใจการขยายตัวตามเส้นผ่านศูนย์กลาง เราจึงทำการคิดแบบความสูงของปริมาตรลูกสูบลูกสูบมีค่าคงที่ จึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบเกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้น 0.9 mm ดังนั้นลูกสูบของเราจึงจำเป็นลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหลือ 59.1 mm

4.3 การออกแบบชิ้นส่วนกลไก

ชิ้นส่วนกลไกส่วนใหญ่รับโหลดแบบไม่คงที่ (Dynamics Load) ดังนั้นเราจึงออกแบบด้วยวิธีกู่ดแมนแบบปรับปรุง(Modified-Goodman) ในการหาค่าความปลอดภัย (safety factor) ค่าต่างๆที่จำเป็นจากวัฏจักรต้องใช้นี้

$$P_{max} = 200.84 \text{ kPa}, P_{min} = 93.559 \text{ kPa}$$

ค่าต่างๆที่จำเป็นต้องใช้จากวัสดุ stainless steel AISI 304

$$S_{ut} = 505 \text{ MPa} = 73.2 \text{ ksi}, S_y = 215 \text{ Mpa}, E = 190 \text{ Gpa}$$

ปรับค่าความแข็งแรงจากผลกระทบต่างๆเช่น อุณหภูมิ ขนาด รูปร่าง การสร้างชิ้นงาน และ สติติ โดย

$$S_e = C_{load} C_{size} C_{surf} C_{temp} C_{reliab} S'_e \quad (4.14)$$

และต้องคำนวณค่า safety factor ได้เกิน 4 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N_s = \frac{S_e S_{ut}}{(\sigma'_a S_{ut}) + (\sigma'_m S_e)} \quad (4.15)$$

4.3.1 upper part of piston pin



$$\begin{aligned} \sigma_a &= \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\frac{F_{max}}{A} - \frac{F_{min}}{A}}{2} = \frac{\frac{550.95}{\pi \times 0.0015^2} - \frac{256.66}{\pi \times 0.0015^2}}{2} \\ &= \frac{19.5 - 9.08}{2} = 5.21 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{\frac{F_{max}}{A} + \frac{F_{min}}{A}}{2} = \frac{\frac{550.95}{\pi \times 0.0015^2} + \frac{256.66}{\pi \times 0.0015^2}}{2} \\ &= \frac{19.5 + 9.08}{2} = 14.29 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S'_e = 0.5 \times S_{ut} = 0.5 \times 505 = 52.5 \text{ Mpa}$$

$$C_{load} = 0.7 \text{ for axial}$$

$$C_{size} = 1 \text{ for } d \leq 8 \text{ mm}$$

$$C_{surf} = 4.51(S_{ut})^{-0.265} = 0.866$$

$$C_{temp} = 1$$

$$C_{reliab} = 0.897 \text{ for confidence } 90\%$$

$$S_e = C_{load} C_{size} C_{surf} C_{temp} C_{reliab} S'_e$$

$$= 137.3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + \sigma_{ya}^2 - \sigma_{xa}\sigma_{ya} + 3\tau_{xya}^2} = \sigma_{ya}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + \sigma_{ym}^2 - \sigma_{xm}\sigma_{ym} + 3\tau_{xym}^2} = \sigma_{ym}$$

สมมติ $K_t = K_f = 1$

ถ้า $K_f |\sigma_{max}| < S_y$ จะทำให้ $K_f = K_{fm}$

จะได้ $K_f \left| \frac{F_{max}}{A} \right| < S_y$

$$1 \left| \frac{550.95}{\pi \times 0.0015^2} \right| < 215 \text{ MPa}$$

$$78 < 215 \text{ MPa}$$

ดังนั้น $K_f = K_{fm} = K_t = 1$

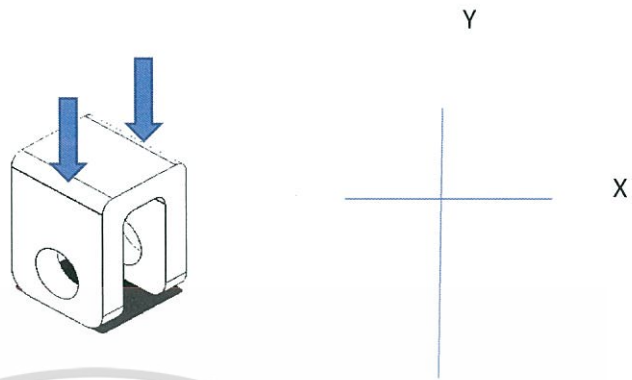
$$\sigma_a = K_f \sigma_{anom} = 1 \times 5.21 = 5.21 \text{ MPa} = \sigma'_a$$

$$\sigma_m = K_{fm} \sigma_{mnom} = 1 \times 14.29 = 14.9 \text{ MPa} = \sigma'_m$$

$$N_s = \frac{137.3 \times 10^6 \times 505 \times 10^6}{(5.21 \times 10^6 \times 505 \times 10^6) + (14.29 \times 10^6 \times 137.3 \times 10^6)} = 15.1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 lower part of piston pin



$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{\frac{F_{max}}{A} + \frac{F_{min}}{A}}{2} = \frac{\frac{550.95}{0.003 \times 0.013} + \frac{256.66}{0.003 \times 0.013}}{2}$$

$$= 5.175 \text{ Mpa}$$

$$S'_e = 0.5 \times S_{ut} = 0.5 \times 505 = 52.5 \text{ Mpa}$$

$$C_{load} = 0.7 \text{ for axial}$$

$$C_{size} = 1 \text{ for } d_{eq} \leq 8 \text{ mm}$$

$$C_{surf} = 4.51(S_{ut})^{-0.265} = 0.866$$

$$C_{temp} = 1$$

$$C_{reliab} = 0.897 \text{ for confidence } 90\%$$

$$S_e = C_{load} C_{size} C_{surf} C_{temp} C_{reliab} S'_e = 137.3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + \sigma_{ya}^2 - \sigma_{xa}\sigma_{ya} + 3\tau_{xya}^2} = \sigma_{ya}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + \sigma_{ym}^2 - \sigma_{xm}\sigma_{ym} + 3\tau_{xym}^2} = \sigma_{ym}$$

$$K_t = 1 + 2\frac{a}{c}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากรูปเป็นวงกลม $a=c$ ดังนั้น $K_t = 3$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{0.093}}{\sqrt{0.25}}} = 0.62$$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 2.24$$

ถ้า $K_f |\sigma_{max}| < S_y$ จะทำให้ $K_f = K_{fm}$

จะได้ $K_f \left| \frac{F_{max}}{A} \right| < S_y$

$$2.24 \left| \frac{550.95/2}{0.003 \times 0.013} \right| < 215 \text{ MPa}$$

$$31.6 < 215 \text{ MPa}$$

ดังนั้น $K_f = K_{fm} = 2.24$

$$\sigma_a = K_f \sigma_{anom} = 2.24 \times 1.885 = 4.22 \text{ MPa} = \sigma'_a$$

$$\sigma_m = K_{fm} \sigma_{mnom} = 2.24 \times 5.175 = 11.6 \text{ MPa} = \sigma'_m$$

$$N_s = \frac{137.3 \times 10^6 \times 505 \times 10^6}{(4.22 \times 10^6 \times 505 \times 10^6) + (11.6 \times 10^6 \times 137.3 \times 10^6)} = 18.62$$

4.3.3 Connecting rod



$$\sigma_{anom} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\frac{F_{max}}{A} - \frac{F_{min}}{A}}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 2 การศึกษาเท่านั้น ไม่ 2 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\frac{550.95}{\pi \times \frac{0.009}{2} \times 0.005} - \frac{256.66}{\pi \times \frac{0.009}{2} \times 0.005}}{2} \\
 &= 2.08 \text{ Mpa} \\
 \sigma_{mnom} &= \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{\frac{F_{max}}{A} + \frac{F_{min}}{A}}{2} \\
 &= \frac{\frac{550.95}{\pi \times \frac{0.009}{2} \times 0.005} + \frac{256.66}{\pi \times \frac{0.009}{2} \times 0.005}}{2} = 5.71 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

$$S'_e = 0.5 \times S_{ut} = 0.5 \times 505 = 252.5 \text{ Mpa}$$

$$C_{load} = 0.7 \text{ for axial}$$

$$C_{size} = 1 \text{ for } d_{eq} \leq 8 \text{ mm}$$

$$C_{surf} = 4.51(S_{ut})^{-0.265} = 0.866$$

$$C_{temp} = 1$$

$$C_{reliab} = 0.897 \text{ for confidence } 90\%$$

$$S_e = C_{load} C_{size} C_{surf} C_{temp} C_{reliab} S'_e = 137.3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + \sigma_{ya}^2 - \sigma_{xa}\sigma_{ya} + 3\tau_{xya}^2} = \sigma_{ya}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + \sigma_{ym}^2 - \sigma_{xm}\sigma_{ym} + 3\tau_{xym}^2} = \sigma_{ym}$$

$$K_t = 1 + 2 \frac{a}{c}$$

เนื่องจากรูปเป็นวงกลม $a=c$ ดังนั้น $K_t = 3$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{0.093}}{\sqrt{0.25}}} = 0.62$$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 2.24$$

ถ้า $K_f |\sigma_{max}| < S_y$ จะทำให้ $K_f = K_{fm}$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ $K_f \left| \frac{F_{max}}{A} \right| < S_y$

$$2.24 \left| \frac{550.95}{\pi \times \frac{0.009}{2} \times 0.005} \right| < 215 \text{ MPa}$$

$$33.35 < 215 \text{ MPa}$$

ดังนั้น $K_f = K_{fm} = 2.24$

$$\sigma_a = K_f \sigma_{anom} = 2.24 \times 2.08 = 4.66 \text{ MPa} = \sigma'_a$$

$$\sigma_m = K_{fm} \sigma_{mnom} = 2.24 \times 5.71 = 12.79 \text{ MPa} = \sigma'_m$$

$$N_s = \frac{137.3 \times 10^6 \times 505 \times 10^6}{(4.66 \times 10^6 \times 505 \times 10^6) + (12.79 \times 10^6 \times 137.3 \times 10^6)} = 16.87$$

4.3.4 Folk connecting rod



$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{4} = \frac{\frac{F_{max}}{A} - \frac{F_{min}}{A}}{4}$$

$$= \frac{\frac{550.95}{0.005 \times 0.015} - \frac{256.66}{0.005 \times 0.015}}{4} = 0.98 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{4} = \frac{\frac{F_{max}}{A} + \frac{F_{min}}{A}}{4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{\frac{550.95}{0.005 \times 0.015} + \frac{256.66}{0.005 \times 0.015}}{4} = 2.7 \text{ Mpa}$$

$$S'_e = 0.5 \times S_{ut} = 0.5 \times 505 = 252.5 \text{ Mpa}$$

$$C_{load} = 0.7 \text{ for axial}$$

$$C_{size} = 0.869(d_{eq})^{-0.097} = 0.71 \text{ for } 8 \text{ mm} < d_{eq} \leq 250 \text{ mm}$$

$$C_{surf} = 4.51(S_{ut})^{-0.265} = 0.866$$

$$C_{temp} = 1$$

$$C_{reliab} = 0.897 \text{ for confidence } 90\%$$

$$S_e = C_{load} C_{size} C_{surf} C_{temp} C_{reliab} S'_e = 137.3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + \sigma_{ya}^2 - \sigma_{xa}\sigma_{ya} + 3\tau_{xya}^2} = \sigma_{ya}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + \sigma_{ym}^2 - \sigma_{xm}\sigma_{ym} + 3\tau_{xym}^2} = \sigma_{ym}$$

$$K_t = 1 + 2 \frac{a}{c}$$

เนื่องจากรูปเป็นวงกลม $a=c$ ดังนั้น $K_t = 3$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{0.093}}{\sqrt{0.25}}} = 0.62$$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 2.24$$

ถ้า $K_f |\sigma_{max}| < S_y$ จะทำให้ $K_f = K_{fm}$

$$\text{จะได้ } K_f \left| \frac{F_{max}}{A} \right| < S_y$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2.24 \left| \frac{550.95/2}{0.005 \times 0.015} \right| < 215 \text{ MPa}$$

$$8.23 < 215 \text{ MPa}$$

ดังนั้น $K_f = K_{fm} = 2.24$

$$\sigma_a = K_f \sigma_{anom} = 2.24 \times 0.98 = 2.2 \text{ MPa} = \sigma'_a$$

$$\sigma_m = K_{fm} \sigma_{mnom} = 2.24 \times 2.7 = 6.05 \text{ MPa} = \sigma'_m$$

$$N_s = \frac{137.3 \times 10^6 \times 505 \times 10^6}{(2.2 \times 10^6 \times 505 \times 10^6) + (6.05 \times 10^6 \times 137.3 \times 10^6)} = 29$$

4.3.5 Flywheel

ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 3300 rpm

จะได้
$$\omega = 2\pi f = 2 \times \pi \times 55 = 345.58 \text{ rad/sec}$$

งานที่ต้องใช้เก็บไว้ในflywheel เพื่อให้เครื่องยนต์กลับมาทำงานได้เมื่อครบรอบของเครื่องยนต์หรือช่วยให้

เครื่องยนต์เริ่มทำงานได้ง่ายคือ

$$E_2 - E_1 = 2.05 \text{ J}$$

เราจะทำการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของflywheel เพื่อนำไปคำนวณหามวลของflywheel

$$\omega_2 = \frac{\omega}{2} (2 + C_s) = \frac{345.58}{2} (2 + 0.1) = 362.85 \text{ rad/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย ขอสงวนสิทธิ์ในข้อนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย ความเร็วทั้งสองทำงานที่มุม 180 องศา และ 0 องศา
จะคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยได้จากสมการ

$$I = \frac{2 \times (E_2 - E_1)}{C_s \times (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \quad (4.16)$$

$$= \frac{2 \times 2.05}{0.1 \times (362.85^2 - 328.3^2)} = 1.72 \times 10^{-3} \text{ N} - \text{m} - \text{s}^2$$

นำค่า I ไปหามวลจากสมการ

$$m = \frac{I \times 16}{d^2} = \frac{1.72 \times 10^{-3} \times 16}{0.2^2} = 1.2 \text{ kg}$$

ซึ่งเราทำการเพิ่มมวลของ *flywheel* เพิ่มในภายหลังได้ หากเครื่องยังไม่ทำงาน

4.3.6 Shaft



$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} = 403.805 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_m = F_m \times l = 403.805 \times 0.11 = 44.4 \text{ N} - \text{m}$$

$$T_a = F_a \times r = 147.145 \times 0.1 = 14.7 \text{ N} - \text{m}$$

$$T_m = F_m \times r = 403.805 \times 0.1 = 40.4 \text{ N} - \text{m}$$

$$\sigma_a = K_f \times \frac{M_a \times c}{I} = \frac{1 \times 16.2 \times 0.005}{2.34 \times 10^{-9}} = 34.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = K_{fm} \times \frac{M_m \times c}{I} = \frac{1 \times 44.4 \times 0.005}{2.34 \times 10^{-9}} = 94.9 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = K_{fs} \times \frac{T_a \times r}{J} = \frac{1 \times 14.7 \times 0.005}{9.82 \times 10^{-10}} = 74.8 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = K_{fsm} \times \frac{T_m \times r}{J} = \frac{1 \times 40.4 \times 0.005}{9.82 \times 10^{-10}} = 205.7 \text{ MPa}$$

$$\text{โดย } K_f = K_{fm} = K_{fs} = K_{fsm} = 1$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + \sigma_{ya}^2 - \sigma_{xa}\sigma_{ya} + 3\tau_{xya}^2} = \sqrt{0 + 34.6^2 - 0 + 3 \times 74.8^2}$$

$$= 37.7 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + \sigma_{ym}^2 - \sigma_{xm}\sigma_{ym} + 3\tau_{xym}^2} = \sqrt{0 + 94.9^2 - 0 + 3 \times 205.7^2}$$

$$= 98.1 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 0.5 \times S_{ut} = 0.5 \times 505 = 252.5 \text{ Mpa}$$

$$C_{load} = 1 \text{ for bending}$$

$$C_{size} = 1 \text{ for } d \leq 8\text{mm}$$

$$C_{surf} = 4.51(S_{ut})^{-0.265} = 0.866$$

$$C_{temp} = 1$$

$$C_{reliab} = 0.897 \text{ for confidence } 90\%$$

$$S_e = C_{load}C_{size}C_{surf}C_{temp}C_{reliab}S'_e = 196.14 \text{ Mpa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การสงวนนี้เพื่อคุ้มครองสิทธิในเมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิเคราะห์วัฏจักรของเครื่องยนต์

5.1 สมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์

1. เป็นกระบวนการ Regenerative อย่างสมบูรณ์แบบ
2. ความดันภายในเครื่องยนต์ ณ ขณะใดๆมีค่าเท่ากันในทุกส่วน
3. สารทำงานประพฤติตัวตามสมการแก๊สอุดมคติ
4. มวลของสารทำงานคงที่ ไม่มีการรั่วไหล
5. ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงแบบคลีนไซน์
6. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชุดแลกเปลี่ยนความร้อน
7. อุณหภูมิของกระบอกสูบ, ลูกสูบและในแต่ละส่วนของเครื่องยนต์มีค่าคงที่
8. สารทำงานอยู่ในสภาวะคงตัว
9. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่
10. ไม่มีการสูญเสียความดันเนื่องจากแรงเสียดทานในเครื่องยนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 รายละเอียดของเครื่องยนต์

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของเครื่องยนต์ต้นแบบ D 90

| ชิ้นส่วน/ตัวแปร | ค่า/ชนิด |
|-----------------------------|----------------------|
| ชนิดของเครื่องยนต์ | แอลฟา |
| สารทำงาน | อากาศ |
| รัศมีข้อเหวี่ยง | 0.85 cm |
| ระยะสโตรค | 2.4 cm |
| เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ | 5.79 cm |
| ก้านลูกสูบ | 5 cm |
| ความดันเริ่มต้น | 270 kPa |
| อุณหภูมิส่วนรับความร้อน | 923 K |
| อุณหภูมิรีเจนเนอเรเตอร์ | 590 K |
| อุณหภูมิส่วนระบายความร้อน | 350 K |
| ปริมาตรส่วนรับความร้อน | 21.2 cm ³ |
| ปริมาตรรีเจนเนอเรเตอร์ | 32.9 cm ³ |
| ปริมาตรส่วนระบายความร้อน | 12.2 cm ³ |
| ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่ | 89.6 cm ³ |
| ปริมาตรคงที่ | 92.9 cm ³ |
| ความดันเฉลี่ยของเครื่องยนต์ | - kPa |
| ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ | 3300 RPM |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

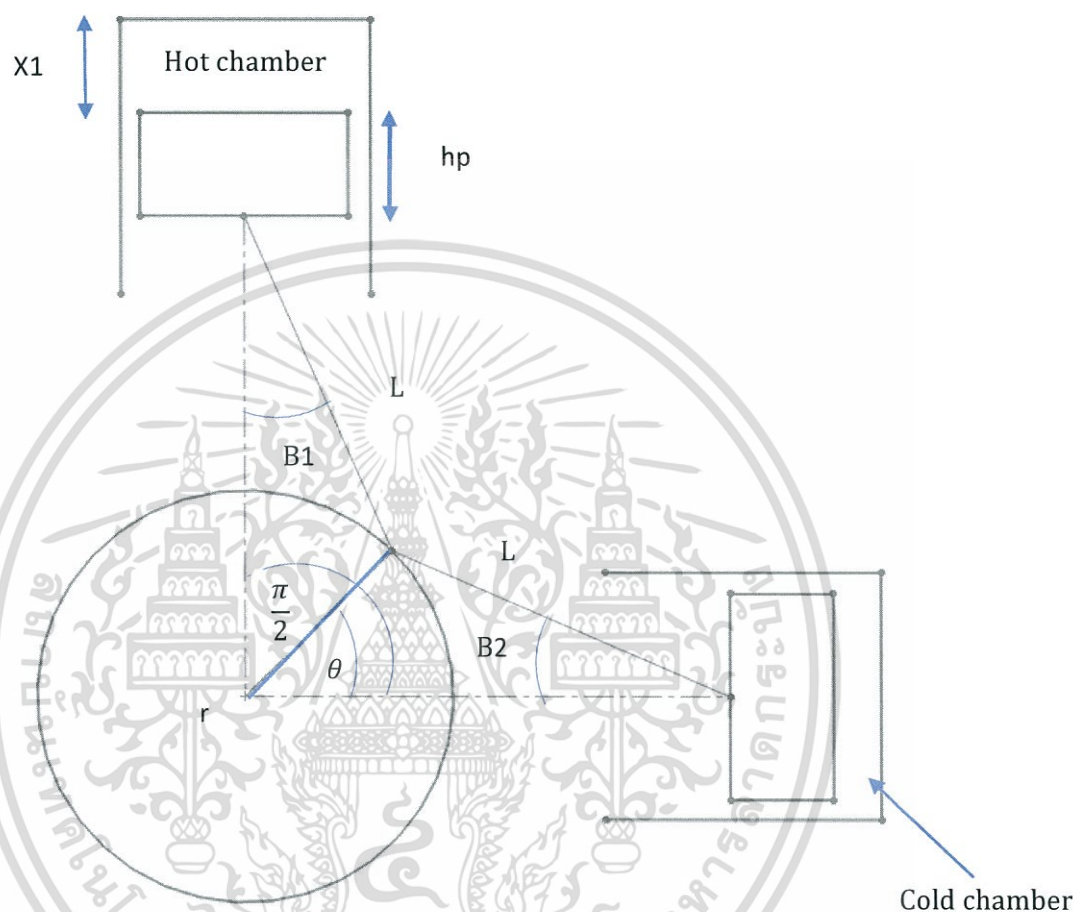
ตารางที่ 5.2 รายละเอียดของเครื่องยนต์ V

| ชิ้นส่วน/ตัวแปร | ค่า/ชนิด |
|-----------------------------|------------------------|
| ชนิดของเครื่องยนต์ | แอลฟา |
| สารทำงาน | อากาศ |
| รัศมีข้อเหวี่ยง | 1.25 cm |
| ระยะสโตรค | 2.5 cm |
| เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ | 6 cm |
| ก้านลูกสูบ | 4.5 cm |
| ความดันเริ่มต้น | 101.325 kPa |
| อุณหภูมิส่วนรับความร้อน | 923 K |
| อุณหภูมิรีเจนเนอเรเตอร์ | 590 K |
| อุณหภูมิส่วนระบายความร้อน | 350 K |
| ปริมาตรส่วนรับความร้อน | 17.082cm ³ |
| ปริมาตรรีเจนเนอเรเตอร์ | 28.982cm ³ |
| ปริมาตรส่วนระบายความร้อน | 25.943cm ³ |
| ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่ | 70.7 cm ³ |
| ปริมาตรคงที่ | 72.007 cm ³ |
| ความดันเฉลี่ยของเครื่องยนต์ | 136 kPa |
| ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ | 3300 RPM |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลไก

เราสามารถหาสมการการเคลื่อนที่ของลูกสูบได้จากแผนภาพแสดงกลไกตามรูปที่ 5.1



$$x_1 = hp + L \cos(B_1) + r \sin(\theta) \quad (5.1)$$

$$x_2 = hp + L \cos(B_2) + r \cos(\theta) \quad (5.2)$$

$$\text{โดยที่ } B_1 = \arcsin\left(\frac{r}{L} \sin \theta\right) \quad (5.3)$$

$$B_2 = \arcsin\left(\frac{r}{L} \cos \theta\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (5.4) รัคค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการข้างต้น เราจะได้สมการการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกระบอกสูบร้อน (V_e) และกระบอกสูบเย็น (V_c) ได้ตามสมการดังนี้

$$V_e = V_{de} + A_e(X1, \max - X1) \quad (5.5)$$

$$V_c = V_{dc} + A_c(X2, \max - X2) \quad (5.6)$$

เมื่อ A_e = พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบร้อน
 A_c = พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบเย็น
 $X1, \max$ = ตำแหน่งสูงสุดของลูกสูบร้อน
 $X2, \max$ = ตำแหน่งสูงสุดของลูกสูบเย็น

5.4 การวิเคราะห์แบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Analysis)

จากสมมติฐานที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อที่ 5.1 โดยการวิเคราะห์จะเริ่มจากการตั้งสมมติฐานว่ามวลในเครื่องยนต์นั้นคงที่ตลอดกระบวนการจากสมการที่ 5.7

$$M = M_e + M_h + M_r + M_k + M_c \quad (5.7)$$

และจากสมการแก๊สอุดมคติเราสามารถเปลี่ยนรูปสมการที่ 5.7 ได้เป็นสมการที่ 5.8

$$M = \frac{P V_e}{R T_h} + \frac{P V_h}{R T_h} + \frac{P V_r}{R T_r} + \frac{P V_c}{R T_k} + \frac{P V_k}{R T_k} \quad (5.8)$$

เมื่อความดัน P แต่ละจุดมีค่าเท่ากัน เราจะได้สมการระบุความดันตามสมการที่ 5.8

$$P = \frac{M R}{\left(\frac{V_e}{T_h} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_c}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} \right)} \quad (5.9)$$

โดยการแทนลงในสมการที่ 5.5 และ 5.6 ลงในสมการที่ 5.9 เราจะสามารถระบุความดันของเครื่องยนต์ ณ ตำแหน่งของลูกสูบต่างๆได้ และเราสามารถหาพลังงานสุทธิจากวัฏจักรได้จากสมการที่ 5.10 ถึง 5.12

$$W_e = \int P dV_e \quad (5.10)$$

$$W_c = \int P dV_c \quad (5.11)$$

$$W_{net} = W_e + W_c \quad (5.12)$$

ต่อมาเราจะทำการแทนค่าต่างๆที่ได้กำหนดในตารางที่ 5.1 ลงในสมการที่ 5.1 ถึง 5.10 และเนื่องจากสมการที่ใช้นั้นมีความซับซ้อนเราจึงใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ เพื่อทำการวิเคราะห์วัฏจักรของเครื่องยนต์ โดยโค้ดของโปรแกรมนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 โดยผลจากการวิเคราะห์รัศมีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่น เราได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 2 ลูกกับตำแหน่งขององศาเพลลาข้อเหวี่ยง และกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความดันตามตำแหน่งของเพลลา รวมถึงแผนภาพความดันกับปริมาตรตามรูปที่ 5.3 ถึง 5.5 จากนั้นเมื่อเราได้ผลจากการวิเคราะห์ทั้งหมดแล้วเราจึงทำการสรุปค่าต่างๆ ที่ได้ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 5.2

โค้ด MATLAB สำหรับการวิเคราะห์วัฏจักร

```
>> a=0.0125; %crank radius
>> r=0.045; %connecting rod length
>> hpiston=0.015; %piston height
>> pp=0.0125;%pin piston
>> seta=[0:360]; %crank angle
>> beta1=asind((a*sind(seta))/r);
>> Xe=hpiston+pp+r*cosd(beta1)+a*cosd(seta); %length of stroke to piston surface
>> beta2=asind((a*cosd(seta))/r);
>> Xc=hpiston+pp+r*cosd(beta2)+a*sind(seta); %length of stroke to piston surface
>> xe=r+a-(a*cosd(seta)+sqrt(r.^2-(a.^2*sind(seta).^2))); %displacement of hot piston
>> xc=r+a-(a*sind(seta)+sqrt(r.^2-(a.^2*cosd(seta).^2))); %displacement of cold piston
>> B=0.06; %Bore
>> S=0.025; %Stroke
>> plot(seta,xe,'red',seta,xc,'blue')
>> Vheater=1.7082*10^-5; %heater's volume
>> Vregen=2.8982*10^-5; %regenerator 's volume
>> Vcooler=2.5943*10^-5; %cooler 's volume
>> Ae=(pi*B.^2)/4; %Area of hot piston
>> Ac=Ae; %Area of cold piston
>> Vde=0;
>> Ve=Vde+Ae*(max(Xe)-Xe); %expansion volume
>> Vdc=0;
>> Vc=Vdc+Ac*(max(Xc)-Xc); % compression volume
>> Vtotal=Ve+Vc+Vregen+Vheater+Vcooler
>> Tmax=923; %maximum temperature
>> Tregen=590; % regenerator temperature
>> Tmin=350; % minimum temperature
>> n=((Ve/Tmax)+(Vheater/Tmax)+(Vregen/Tregen)+(Vc/Tmin)+(Vcooler/Tmin)).^-1
>> mair=1.22*10^-4; % mass of air
>> Rair=287; % air constant
>> p=mair*Rair*n; % pressure
>> plot(Vtotal,p)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

>> We=trapz(Ve,p)
>> Wc=trapz(Vc,p)
>> Wnet=trapz(Vtotal,p)
>> f=55
>> power=Wnet*f
>> eff=Wnet*100/We
>> plot(seta,Ve,'red',seta,Vc,'blue')
>> Vheater=1.7082*10^-5; %heater's volume
>> Vregen=2.8982*10^-5; %regenerator 's volume
>> Vcooler=2.5943*10^-5; %cooler 's volume
>> mairsm=1.22*10^-4; % mass of air
>> phi=90
>> Vesm=70.65*10^-6;
>> Vcsm=70.65*10^-6;
>> vesm= Vesm*(1-cosd(seta))/2;
>> vcsm=Vcsm*(1-cosd(seta-phi))/2;
>> nsm=((vesm/Tmax)+(Vheater/Tmax)+(Vregen/Tregen)+(vcsm/Tmin)+(Vcooler/Tmin)).^-1
>> psm=mairsm*Rair*nsm
>> Vtotalsm=vesm+vcsm+Vregen+Vheater+Vcooler
>> plot(Vtotalsm,psm)
>> Wesm=trapz(vesm,p); %Work get
>> Wcsm=trapz(vcsm,p); %Work give
>> Wnetsm=trapz(Vtotalsm,p); % Work net
>> f=55; %frequency of engine
>> Powersm=Wnetsm*f; %power of engine
>> plot(Vtotal,p,'red',Vtotalsm,psm,'blue')
>> plot(seta,Ve,'red',seta,Vc,'blue',seta,vesm,'yellow',seta,vcsm,'green')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ตารางค่าที่ได้จากวัฏจักร

| ค่าที่ได้จากวัฏจักร | ขนาด | หน่วย |
|---------------------------|----------|-------|
| ความดันสูงสุด(Pmax) | 200.84 | kPa |
| ความดันต่ำสุด(Pmin) | 93.559 | kPa |
| ความร้อนที่ป้อนเข้า (Qin) | 5.4203 | J |
| ความร้อนที่เอาออก (Qout) | -2.0553 | j |
| งานสุทธิของวัฏจักร | 3.3649 | J |
| ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ | 3300 | rpm |
| กำลังของเครื่องยนต์ | 185.0695 | watts |

ตารางที่ 5.4 ตารางค่าที่ได้จากวัฏจักรขมิต

| ค่าที่ได้จากวัฏจักรขมิต | ขนาด | หน่วย |
|---------------------------|----------|-------|
| ความดันสูงสุด(Pmax) | 198.74 | kPa |
| ความดันต่ำสุด(Pmin) | 93.135 | kPa |
| ความร้อนที่ป้อนเข้า (Qin) | 5.3194 | J |
| ความร้อนที่เอาออก (Qout) | -1.9563 | j |
| งานสุทธิของวัฏจักร | 3.3631 | J |
| ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ | 3300 | rpm |
| กำลังของเครื่องยนต์ | 184.9705 | watts |

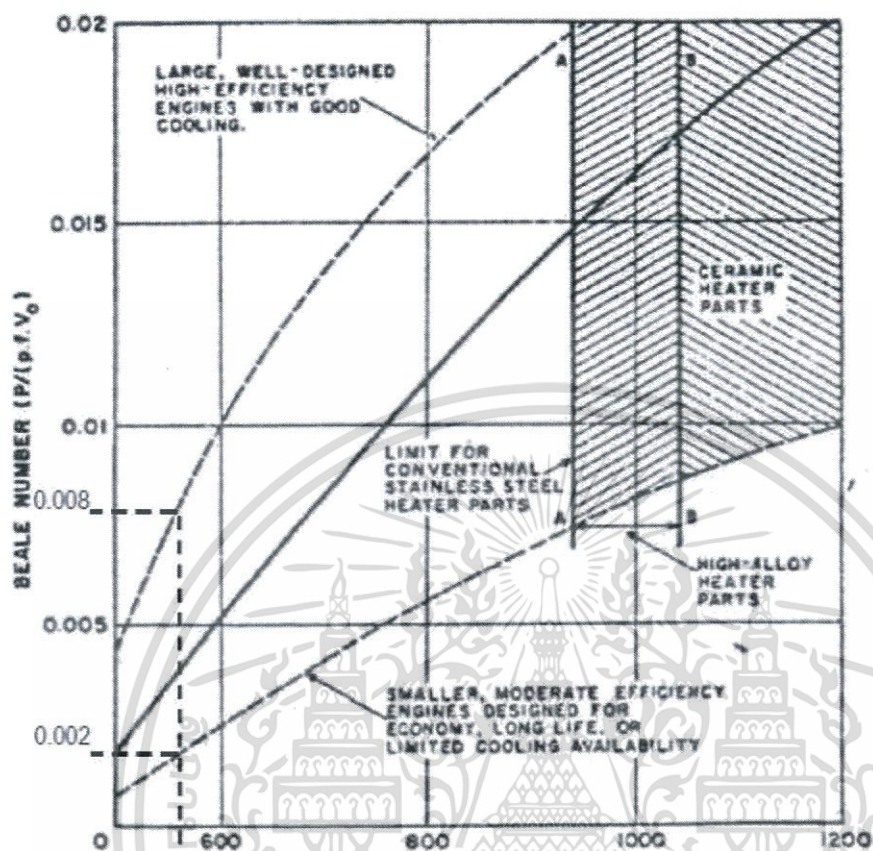
5.4 กำลังของเครื่องยนต์เชิงปฏิบัติ

กำลังของเครื่องยนต์สามารถหาได้โดยใช้หลักการ Beale Number โดยหลักการนี้ได้ทำการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขึ้นมา แล้วทำการเก็บค่าเชิงสถิติในรูปแบบแปรที่ชื่อว่า Beale Number (B_n) ทำให้กำลังที่คิดได้จากวิธีนี้มีแนวโน้มที่ได้จะได้กำลังของเครื่องยนต์เชิงปฏิบัติมากกว่าวิธี Ideal และ Schmidt โดยเราจะใช้กำลังจากวิธีนี้เป็นค่ากำลังที่เราคาดหวังว่าจะได้ ซึ่งกำลังของเครื่องยนต์สามารถคิดได้ดังนี้

$$P = B_n p f V$$

เราสามารถหาค่า B_n ได้จากกราฟที่ 5.4.1 ได้ 0.008

กราฟที่ 5.4.1 แสดงค่า B_n



จะได้

$$= 0.0145 \times 1 \times 55 \times \frac{\pi}{4} \times 5.9^2 \times 2.5 = 73.25 \text{ watts}$$

ซึ่งกำลังที่ได้คำนวณได้แต่ละวิธีจะถูกนำมาเปรียบเทียบในตารางที่ 5.3

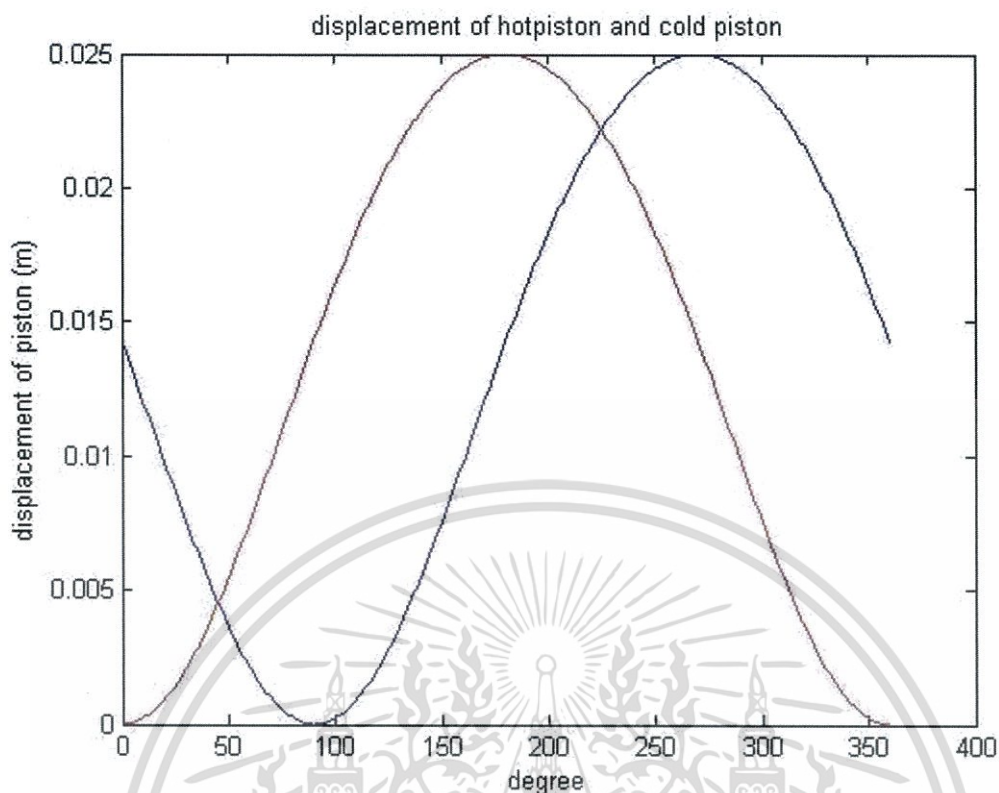
ตารางที่ 5.5 แสดงกำลังที่ได้จากวิธีต่างๆ

| วิธี | กำลังของเครื่องยนต์ | หน่วย |
|--------------|---------------------|-------|
| Ideal | 185 | W |
| Schmidt | 185 | W |
| Beale number | 73.25 | W |

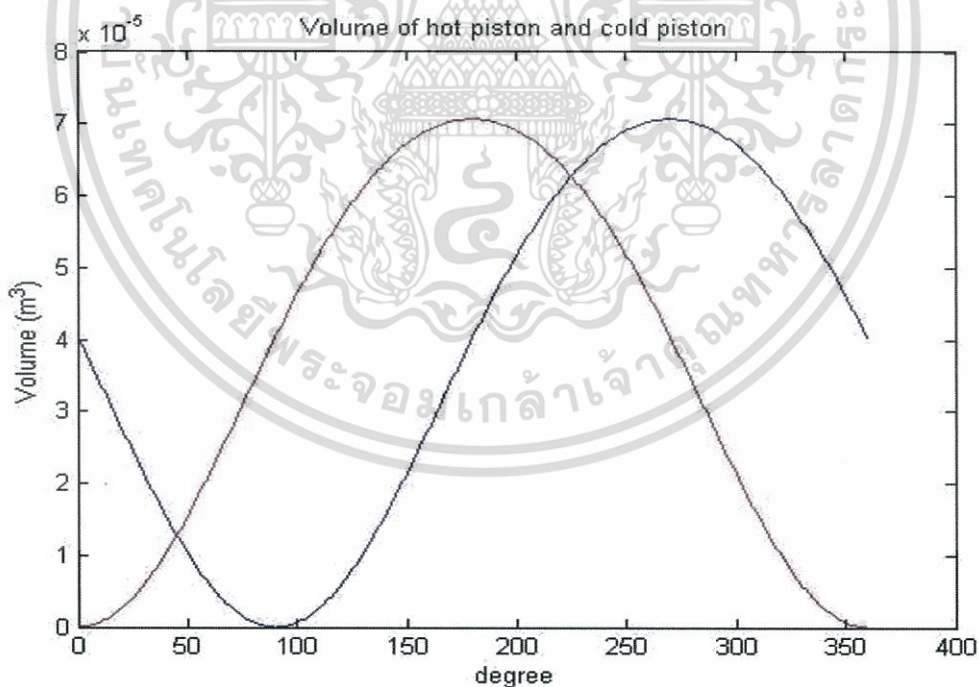
กำลังที่เราคาดว่าจะได้รับ(Expected Result) คือ 73.25 watts

ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เท่ากับ $\frac{73.25}{297} \times 100 = 25 \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

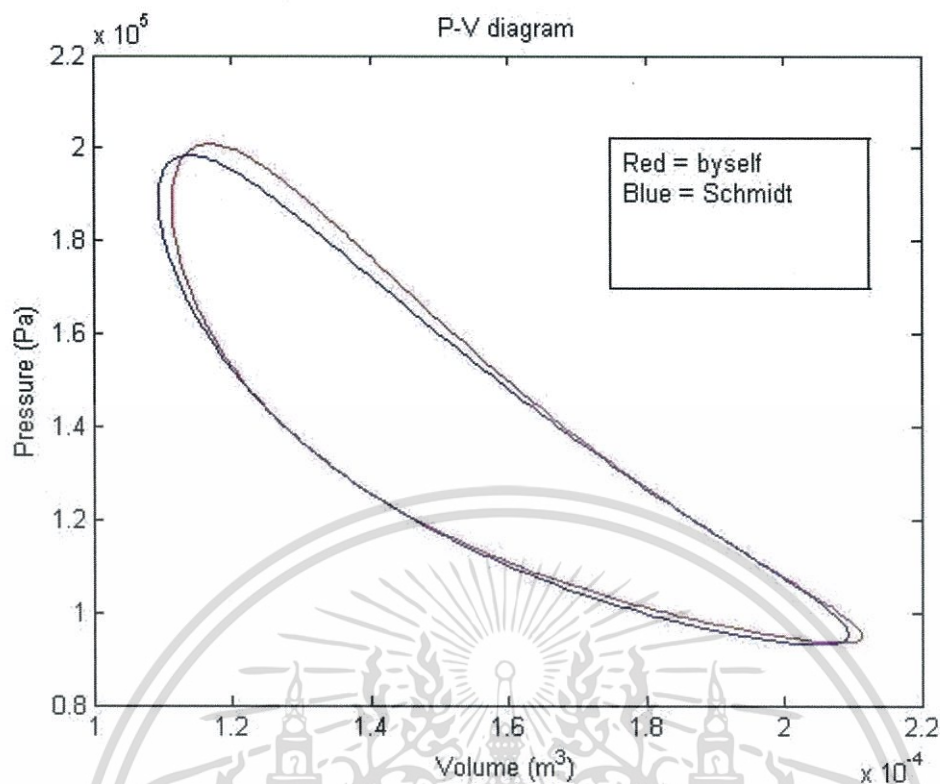


รูปที่ 5.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของลูกสูบร้อนและลูกสูบเย็น



รูปที่ 5.2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของกระบอกสูบร้อนและเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของเครื่องยนต์

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะมีค่าเท่ากับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์ซึ่งเท่ากับ $1 - \frac{T_L}{T_H} = 62.08 \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 ส่วนประกอบเครื่องยนต์

6.1 โคมรับความร้อน



รูปที่ 6.1 โคมรับความร้อน

เป็นชิ้นส่วนสำหรับรับพลังงานความร้อน จึงต้องมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการรับความร้อนที่อุณหภูมิสูงและความดัน อีกทั้งในการรับความร้อนนั้นโลหะจะมีการขยายตัว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเค้นสะสม(Residual Stress) ในวัสดุ จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงและทนต่อความล้า เนื่องจากการขยายตัวและหดตัวจากความร้อนได้ วัสดุที่ใช้จึงเลือก stainless steel AISI304 และการออกแบบรูปทรงโคมเพื่อให้มีพื้นที่รับความร้อนมากกว่าพื้นที่ทรงกระบอก อีกทั้งลักษณะของโคมจะมีความแข็งแรงต่อความดันและช่วยลดความดันสูญเสียจากการไหล

6.2 ส่วนระบายความร้อน



รูปที่ 6.2 ส่วนระบายความร้อน

เป็นชิ้นส่วนที่รับความร้อนของสารทำงานและระบายออกสู่ภายนอก ซึ่งประกอบด้วยครีบ เพื่อเพิ่มการพื้นที่ในการระบายความร้อน โดยวัสดุที่ใช้เป็น Aluminum เนื่องจากมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ครอบอกสูบ



รูปที่ 6.3 ครอบอกสูบ

ครอบอกสูบจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่มีความทนความร้อน เนื่องจากจะอยู่ด้านในโดมรับความร้อน วัสดุที่เลือกใช้เป็น stainless steel AISI 304 โดยภายในครอบอกสูบจะบรรจุลูกสูบอยู่ข้างในเพื่อให้ลูกสูบ เคลื่อนตัวภายในครอบอกสูบ ดังนั้นเราจำเป็นต้องทำการขัดผิวและใส่น้ำมันหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทาน ระหว่างครอบอกสูบและลูกสูบ

6.4 ลูกสูบ



รูปที่ 6.4.1 ลูกสูบส่วนล่าง

ลูกสูบประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ลูกสูบส่วนล่าง และลูกสูบส่วนบน โดยลูกสูบส่วนล่าง จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับครอบอกสูบ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารทำงาน และจะมี เกลียวที่ทำการประกบกับลูกสูบส่วนบน ส่วนลูกสูบส่วนบน ทำขึ้นเพื่อลดการเกิด shuttle heat อีกทั้ง ยังช่วยลด dead volume ของเครื่องยนต์ ลูกสูบส่วนบนเราจะทำการเจาะรูกลางข้างใน เพื่อลดน้ำหนัก ของลูกสูบ โดยลูกสูบส่วนบนจะมีขนาดเล็กกว่าลูกสูบส่วนล่างเล็กน้อย เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีระหว่าง ลูกสูบส่วนบนและครอบอกสูบ

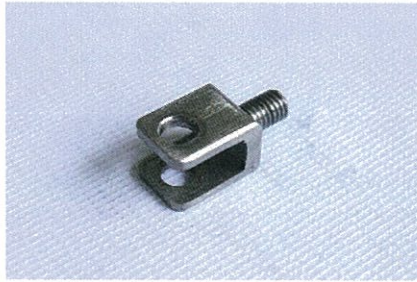
ลูกสูบทั้ง 2 ส่วน จำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่มีความทนความร้อน เนื่องจากจะอยู่ภายในครอบอกสูบ ซึ่งรับความร้อนจากโดมรับความร้อน วัสดุที่เลือกใช้เป็น stainless steel AISI 304



รูปที่ 6.4.2 ลูกสูบส่วนบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 หมุดเชื่อมลูกสูบ



รูปที่ 6.5 หมุดเชื่อมลูกสูบ

เป็นชิ้นส่วนที่ต่อกับลูกสูบส่วนล่างและconnecting rod ซึ่งทำจากวัสดุ stainless steel AISI

304

6.6 แท่งเชื่อม



รูปที่ 6.6.1 แท่งเชื่อมชนิดส้อม

รูปที่ 6.6.2 แท่งเชื่อม

เป็นชิ้นส่วนที่ต่อกับpiston pin และ crank pin เป็นตัวส่งผ่านกำลังจากเพลาคือเหวี่ยงไปยังลูกสูบ วัสดุที่ใช้คือ stainless steel AISI304

6.7 หมุดเชื่อมเพลาคือ



รูปที่ 6.7 หมุดเชื่อมเพลาคือ

เป็นตัวเชื่อมระหว่างเพลาคือเหวี่ยงทั้ง 2 ตัว ทำจากวัสดุ Stainless steel AISI 304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

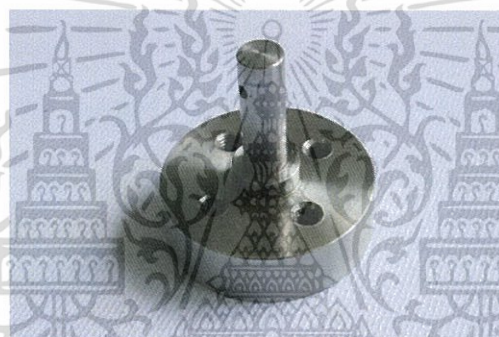
6.8 เฟลาข้อเหวี่ยง



รูปที่ 6.8 เฟลาข้อเหวี่ยง

เป็นชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกับ flywheel coupling และ crank pin ทำจากวัสดุ stainless steel AISI 304

6.9 ยอยล้อดุนกำลัง



รูปที่ 6.9 ยอยล้อดุนกำลัง

เป็นชิ้นส่วนที่เชื่อมกับเฟลาข้อเหวี่ยงและ flywheel ทำจากวัสดุ stainless steel AISI 304

6.10 ล้อดุนกำลัง

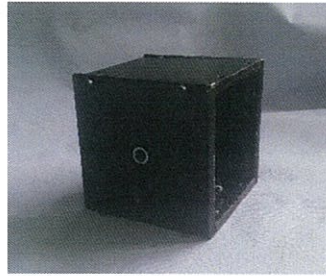


รูปที่ 6.10 ล้อดุนกำลัง

เป็นชิ้นส่วนในการกักเก็บพลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์และนำไปใช้ในจังหวะอัดตัวของเครื่องยนต์ อีกทั้งยังทำให้ลักษณะความเร็วในการทำงานของเครื่องยนต์นั้นเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.11 กล่องเครื่องยนต์



รูปที่ 6.11 กล่องเครื่องยนต์

6.12 ฐานเครื่องยนต์



รูปที่ 6.12 ฐานเครื่องยนต์

เป็นชิ้นส่วนที่รองรับน้ำหนักของตัวเครื่องทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.13 เครื่องยนต์ V-90

การประกอบเครื่องยนต์ V-90 นั้นได้แสดงตำแหน่งและการประกอบแต่ละชิ้นส่วนไว้ดังรูป

ที่ 6.13



รูปที่ 6.13 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 6.1 ตารางแสดงน้ำหนักของแต่ละชิ้นส่วนของเครื่องยนต์

| Part | Weight | Unit |
|---------------------|---------|-------|
| Flywheel | 1477 | grams |
| Cooler | 814.7 | grams |
| Cylinder 1 | 591.9 | grams |
| Cylinder 2 | 590.7 | grams |
| displacer 1 | 371.2 | grams |
| displacer 2 | 360.8 | grams |
| bottom piston 1 | 204.7 | grams |
| bottom piston 2 | 205.2 | grams |
| piston pin 1 | 12.8 | grams |
| piston pin 2 | 12.6 | grams |
| Regenerator | 718.5 | grams |
| Heating Dome | 505 | grams |
| Coupling Flywheel | 246 | grams |
| Crankshaft 1 | 117.8 | grams |
| Crankshaft 2 | 117 | grams |
| Connecting Rod | 27.5 | grams |
| Folk Connecting Rod | 50.1 | grams |
| Crank Pin | 26.4 | grams |
| Base | 1293.6 | grams |
| Plate 1 | 487.2 | grams |
| Plate 2 | 599.2 | grams |
| Plate 3 | 714.2 | grams |
| Plate 4 | 717.6 | grams |
| Plate 5 | 1069.1 | grams |
| Plate 6 | 1071.4 | grams |
| Total | 12402.2 | grams |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สมรรถนะของเครื่องยนต์

7.1 การทดสอบสมรรถนะ

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์นั้นจะทำการทดสอบเพื่อหาค่าแรงบิด, ความเร็วรอบและกำลังของเครื่องยนต์ โดยวิธีการทดสอบนั้นจะใช้ชุดทดสอบแบบโรปเบรก(Rope Brake) สำหรับการทดสอบ



รูปที่ 7.1 ชุดทดสอบแบบโรปเบรก

7.1.1 วิธีการทดสอบ

1. ทำการให้พลังงานความร้อนในอัตราคงที่ และค่อยๆ ให้แรงกระตุ้นให้เครื่องยนต์ทำงานจนกระทั่งเครื่องยนต์เริ่มทำงาน
2. ใช้เครื่องวัดรอบทำการวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ให้สังเกตค่าความเร็วจนกระทั่งความเร็วคงที่ค่าใดค่าหนึ่งซึ่งค่านั้นคือ ความเร็วรอบสูงสุดของเครื่องยนต์
3. แขนงเชือกให้คาดกับเพลาวัดแรง โดยให้ด้านที่ใส่น้ำหนักอยู่ฝั่งเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์หมุน
4. ให้ใส่ตุ้มน้ำหนักลงไปปริมาณที่ตั้งไว้แล้วทำการรอสักครู่ อ่านค่าแรงดึงเชือกที่เครื่องวัดแรงและวัดความเร็วรอบ
5. เพิ่มน้ำหนักขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละครั้งและทำการอ่านค่าตามขั้นตอนที่ 4 จนกระทั่งเครื่องยนต์หยุดทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.2 หลักการคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์

หลักการของการวัดด้วยโรปเบรกนั้นจะหาแรงบิดได้จากภาระที่เราป้อนให้กับเครื่องยนต์ซึ่งในที่นี้คือตม้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบจะนำมาคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องยนต์จะเริ่มจากการหาแรงที่กระทำกับเครื่องยนต์

$$F = (w_1 - w_2) \times g \quad (7.1)$$

| | | |
|-------|-------|--|
| เมื่อ | F | คือ แรงของเครื่องยนต์, N |
| | w_1 | คือ น้ำหนักของตม้น้ำหนักที่ให้, kg |
| | w_2 | คือ แรงดึงเชือกที่อ่านได้จากเครื่องวัด, kg |
| | g | คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ $9.81 \frac{m}{s^2}$ |

จากนั้นจึงนำแรงนี้มาคำนวณเปลี่ยนเป็นแรงบิดของเครื่องจาก

$$T = F \times r \quad (7.2)$$

| | | |
|-------|-----|------------------------------|
| เมื่อ | T | คือแรงบิดของเครื่องยนต์, N-m |
| | r | คือ รัศมีของเพลาวัด, m |

และสุดท้ายจึงคำนวณหากำลังของเครื่องยนต์

$$P = 2\pi \times T \times \frac{N}{\omega} \quad (7.3)$$

| | | |
|-------|-----|------------------------------------|
| เมื่อ | P | คือ กำลังของเครื่องยนต์, W |
| | N | คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, RPM |

7.2 ผลการทดสอบ

การทดสอบได้ใช้ก๊าซ LPG เป็นแหล่งพลังงานความร้อน โดยมีอัตราการไหลของก๊าซที่ 0.25 kg/hr และเครื่องยนต์ทำงานที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 9 นาที พบว่า เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้

7.3 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดสอบที่ได้คือเครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้

เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากการรั่วไหลของอากาศเกิดขึ้นระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ รวมถึงปริมาตรคงที่ (dead volume) มีขนาดเยอะเกินไป จึงทำให้เครื่องยนต์ไม่ทำงาน อีกทั้งเรื่องของน้ำหนักของลูกสูบ ที่มีน้ำหนักค่อนข้างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปและดำเนินการวิจัย

8.1 สรุป

การดำเนินงานไม่ได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ทั้งหมดเนื่องจากเครื่องยนต์ไม่ทำงาน แต่เราสามารถวิเคราะห์ ออกแบบ และ สร้างเครื่องยนต์ได้สำเร็จ ซึ่งกลไกของเครื่องยนต์มีความราบรื่นไม่มีปัญหาใดๆ ที่เกิดปัญหาคือการรั่วไหลของอากาศระหว่างลูกสูบและกระบอกสูบ แต่ได้ทำการแก้ไขแล้ว แต่เรื่องของ ปริมาตรตาย(dead volume) ที่มากนั้น ได้ทำการแก้ไขแล้ว แต่ยังไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร ในส่วนเรื่องของ น้ำหนักลูกสูบยังไม่ได้ทำการแก้ไข

8.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องยนต์ลูกสูบตัววีชนิดแอลฟา ขนาด 70 watts นั้น ไม่สามารถทำงานได้ แต่ในเรื่องของกลไก ที่ได้ออกแบบและสร้างมานั้นไม่มีปัญหาเกิดขึ้น เราจึงเสนอแนะให้ลดปริมาตรคงที่(dead volume) ระหว่างฮีตเตอร์กับกระบอกสูบ และคูลเลอร์กับกระบอกสูบด้วยการใส่ฝอยขัดหม้อหรือทำการทาปะเก็น เพื่อให้ผนังของกระบอกสูบมีความหนาเพิ่มขึ้นหรือทำการพันอะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มความหนาของ กระบอกสูบก็ได้เช่นเดียวกัน อีกทั้งควรออกแบบลูกสูบฝั่งร้อนและฝั่งเย็นให้มีขนาดไม่เท่ากัน และน้ำหนัก ที่เบากว่านี้ โดยการเสนอแนะใช้วัสดุเป็นอะลูมิเนียมอัลลอย ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าสแตนเลสที่ใช้จาก เดิม

บรรณานุกรม

- [1] ผศ.ดร. สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง (2554), พลังงานชีวมวลและการประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร
- [2] D.G. Thombare, S.K. Verma (2006) Technological development in the Stirling cycle engine
- [3] กลวัชร เณลิมพงศ์, ก่อกานต์ เมธาลักษณ์ และ นัทธพงศ์ ชูธนสุนทร(2556). การปรับปรุงและพัฒนาเกลียว Ross Yoke สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา
- [4] C. D.West, Principles and Applications of StirlingEngine: VAN NOSTRAND REINHOLDCOMPANY, 1986
- [5] A. Ross, Making Stirling Engines Andy Ross, 2011
- [6] A. J. G. Yunus A. Cengel, Heat and Mass Transfer; Fundamentals and Applications, 4th ed: McGraw-Hill, 2011
- [7] Willard W. Pulkrabek, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2nd ed: Upper saddle River, New Jersey, 2011



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.
แบบเขียนและขนาดส่วนประกอบต่างๆของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ต้นแบบ

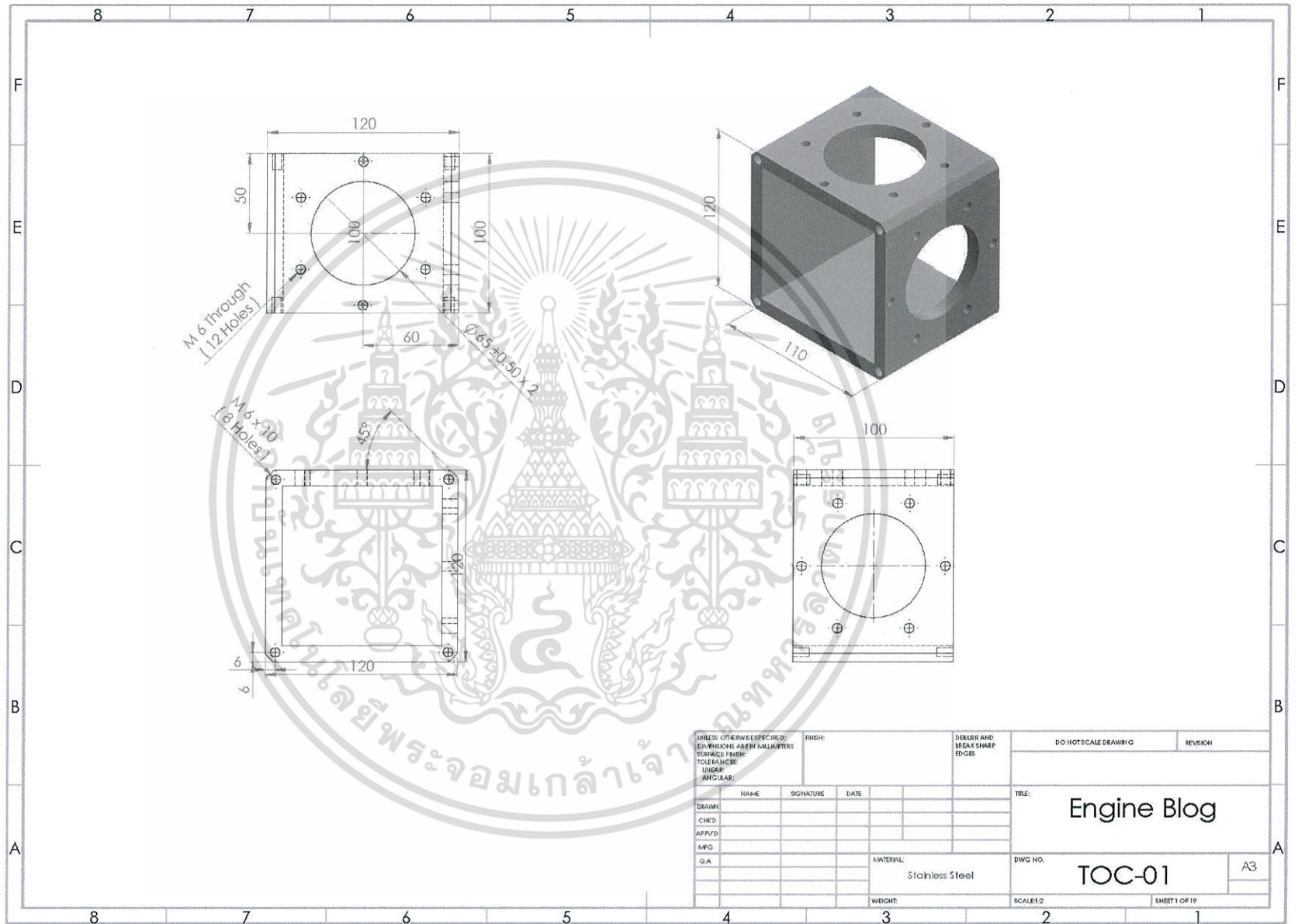
| Part no. | Name | Quantity | Mark | Material |
|----------|---------------|----------|----------|--------------------------|
| 1 | Heater | 1 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 2 | Cylinder | 2 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 3 | Regenerator | 1 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 4 | Tube | 1 | Machined | Copper |
| 5 | Cooler | 1 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 6 | Engine Blog | 1 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 7 | Engine Plate | 2 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 8 | Fly Wheel | 1 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 9 | Counterweight | 2 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 10 | Top Piston | 2 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 11 | Bottom Piston | 2 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 12 | Crank Shaft | 2 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 13 | Crank Pin | 1 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 14 | Folk Con. Rod | 1 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 15 | Con. Rod | 1 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 16 | Piston Pin. | 2 | Machined | Stainless steel AISI 304 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

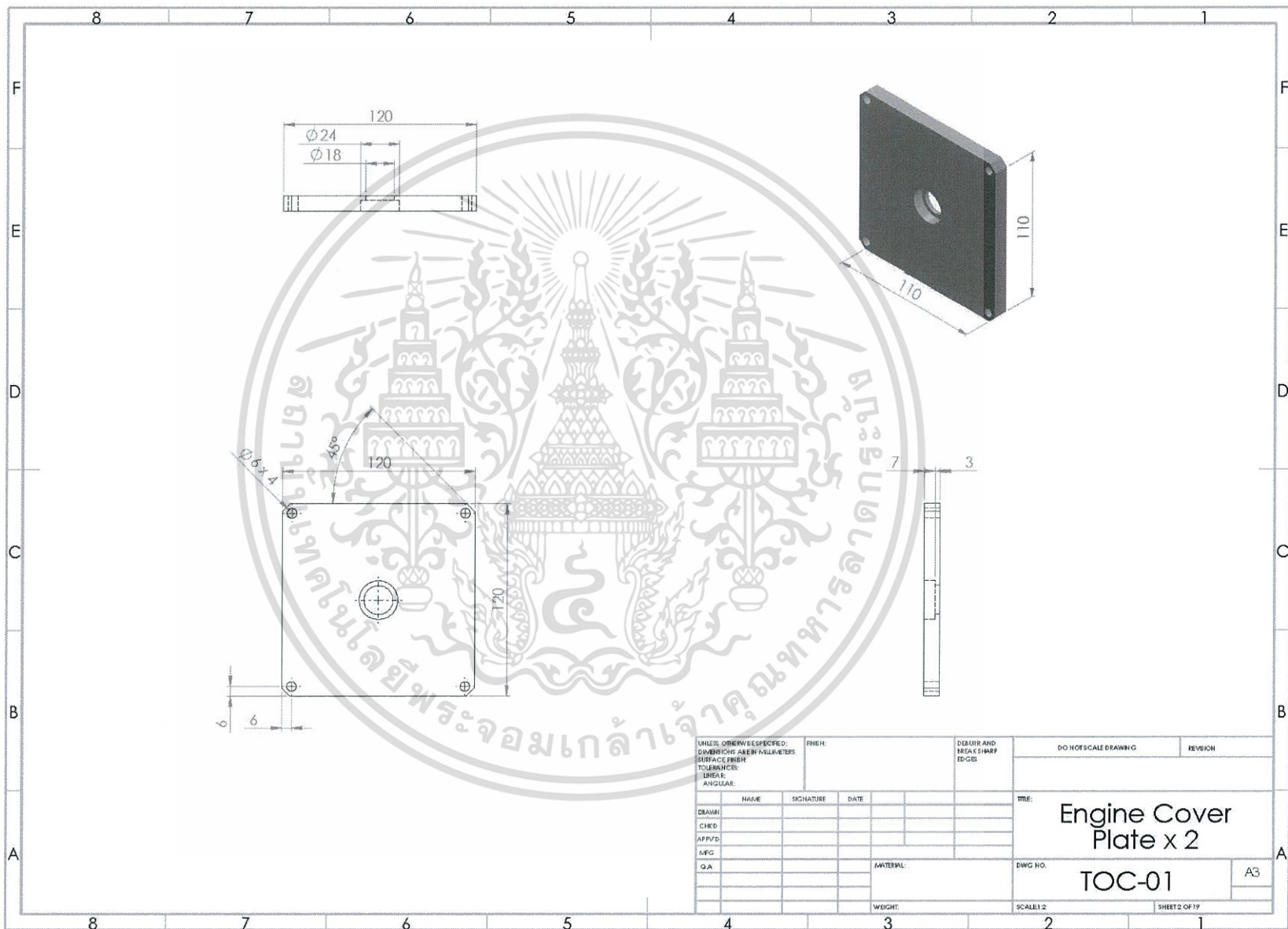
| | | | | |
|-------|-----------------------|----|----------|--------------------------|
| 17 | Flywheel Coupling | 1 | Machined | Stainless steel AISI 304 |
| 20 | 10NM11 Needle Bearing | 3 | | |
| 21 | 06NM11 Needle Bearing | 2 | | |
| 22 | 38-15 Ball Bearing | 3 | | |
| 23 | M3x0.5x12 Socket Head | 2 | | |
| 24 | M6x1x16 Socket Head | 2 | | |
| 25 | M6x1x30 Socket Head | 4 | | |
| 26 | M6x1x65 Socket Head | 4 | | |
| 27 | M6x1x20 Socket Head | 12 | | |
| 28 | M8x1.25x80 Hex | 2 | | |
| 29 | M6x1 NUT | 2 | | |
| 30 | M8x1.25 NUT | 4 | | |
| 31 | O Ring 75 mm. | 4 | | |
| Total | | 68 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.1 กล่องเครื่องยนต์

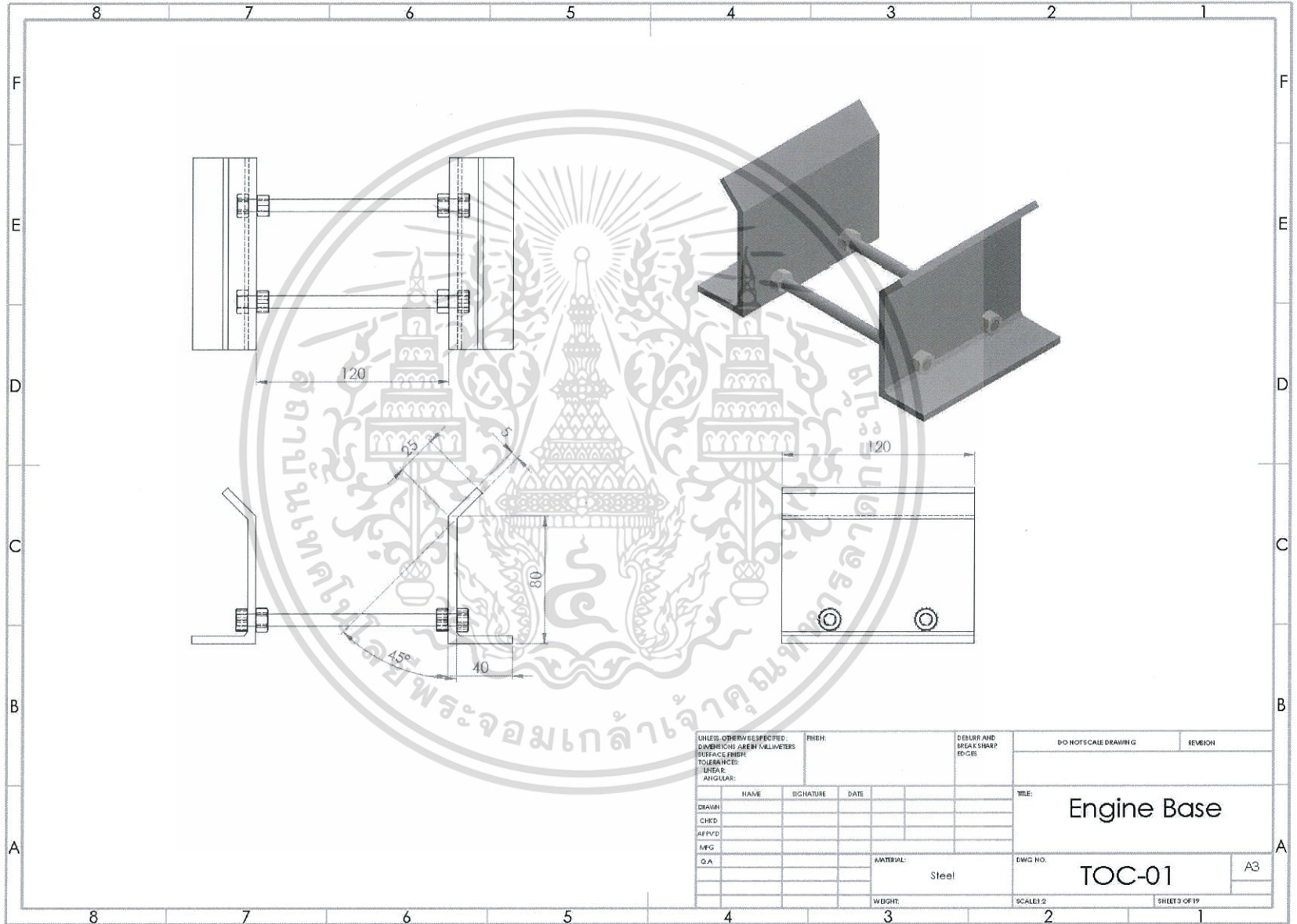


รูปที่ ก.2 ฝาปิดหน้า/หลังเครื่องยนต์

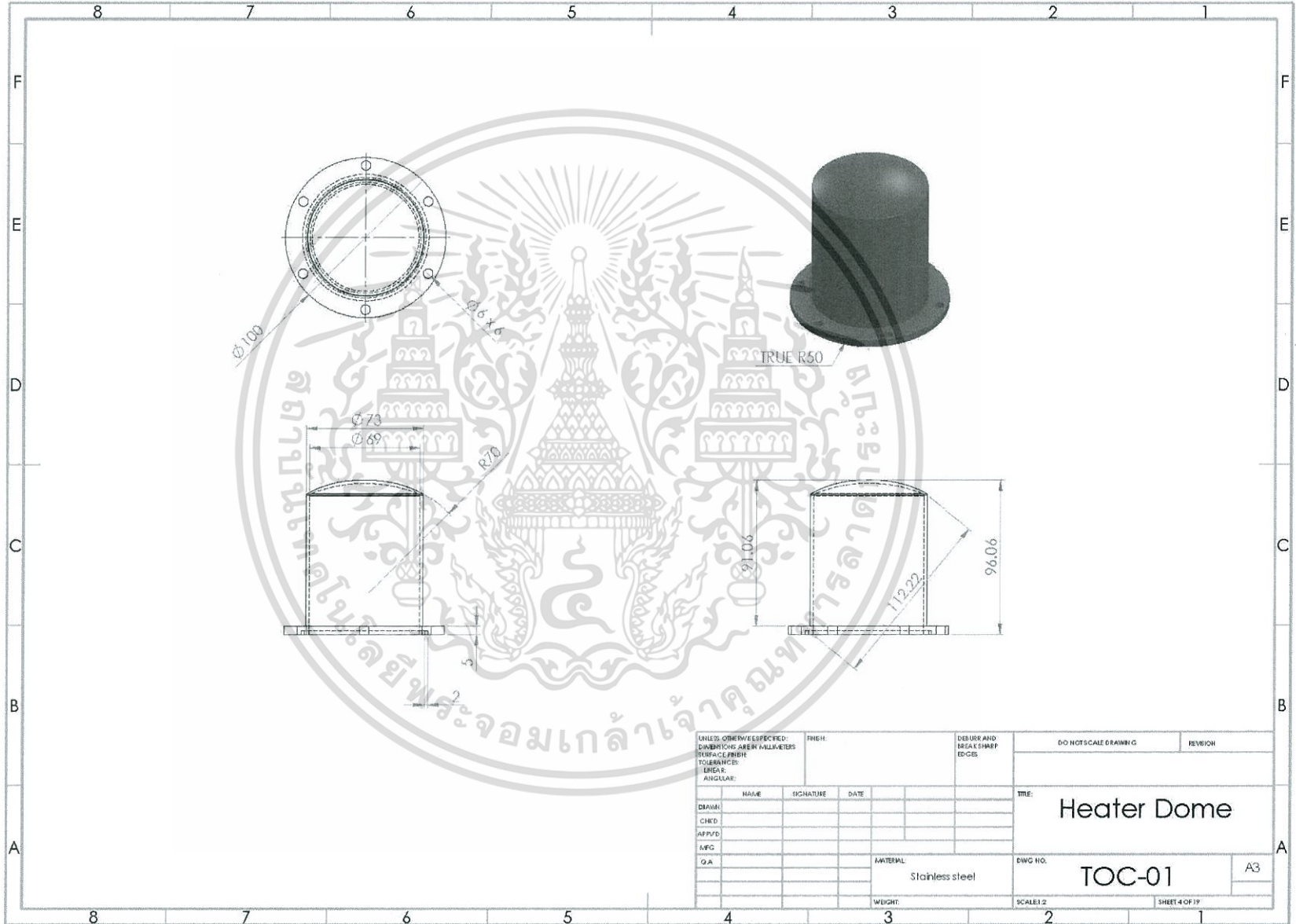


| | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|-----------|------|------------------------------|-----------|----------------------|--|---------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: | | FINISH: | | DIBURR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | | | | | | | | |
| SURFACE FINISH: | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR: | | | | | | | | | |
| ANGULAR: | | | | | | | | | |
| DRAWN | NAME | SIGNATURE | DATE | | | TITLE: | | | |
| CHEK | | | | | | Engine Cover | | | |
| APP'VD | | | | | | Plate x 2 | | | |
| MFG | | | | | | DWG NO. | | A3 | |
| QA | | | | | | TOC-01 | | | |
| | | | | | MATERIAL: | SCALE 1:2 | | SHEET 2 OF 19 | |
| | | | | | WEIGHT: | | | | |

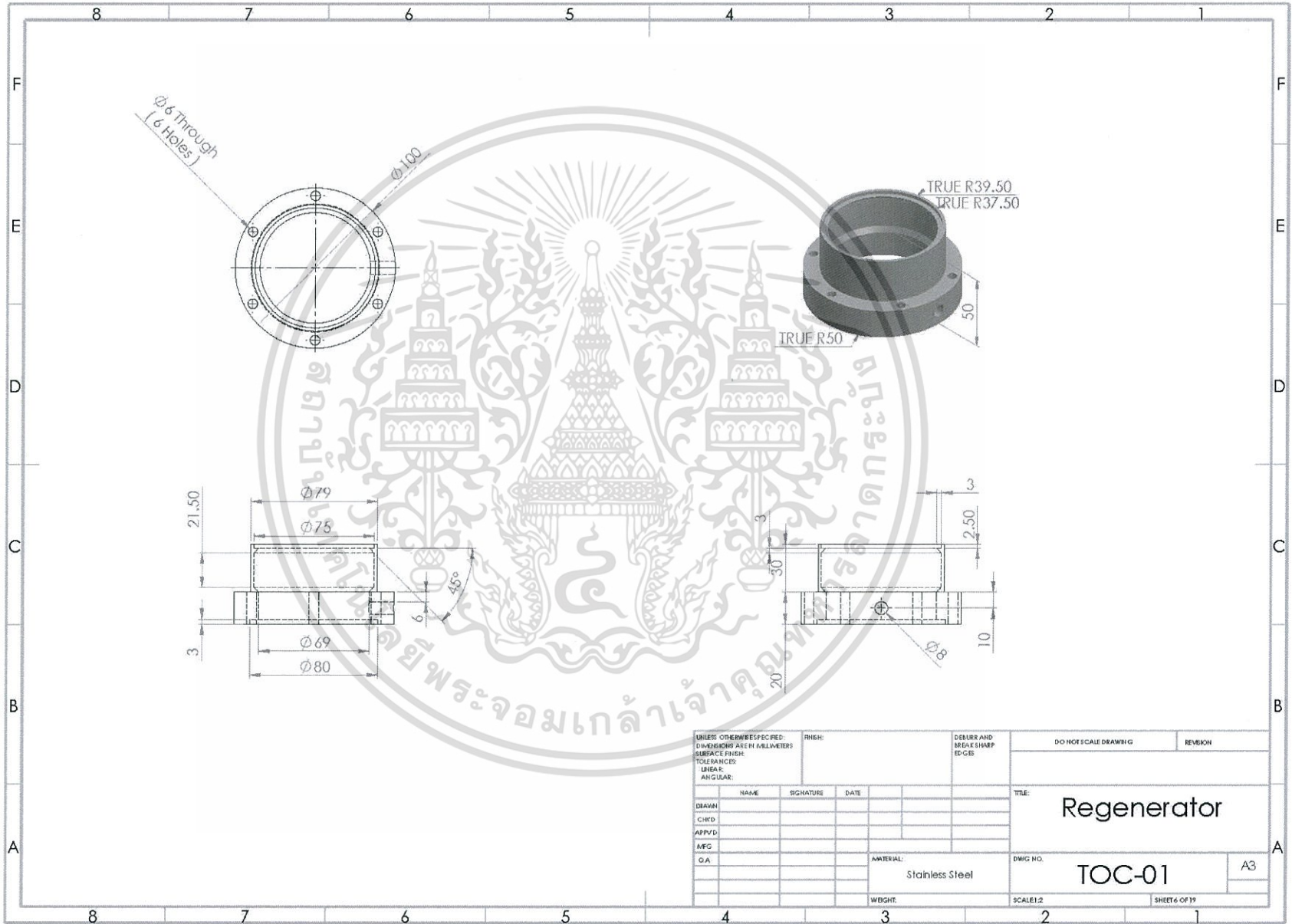
รูปที่ ก.3 ฐานเครื่องยนต์



รูปที่ ก.4 โดมรับความร้อน

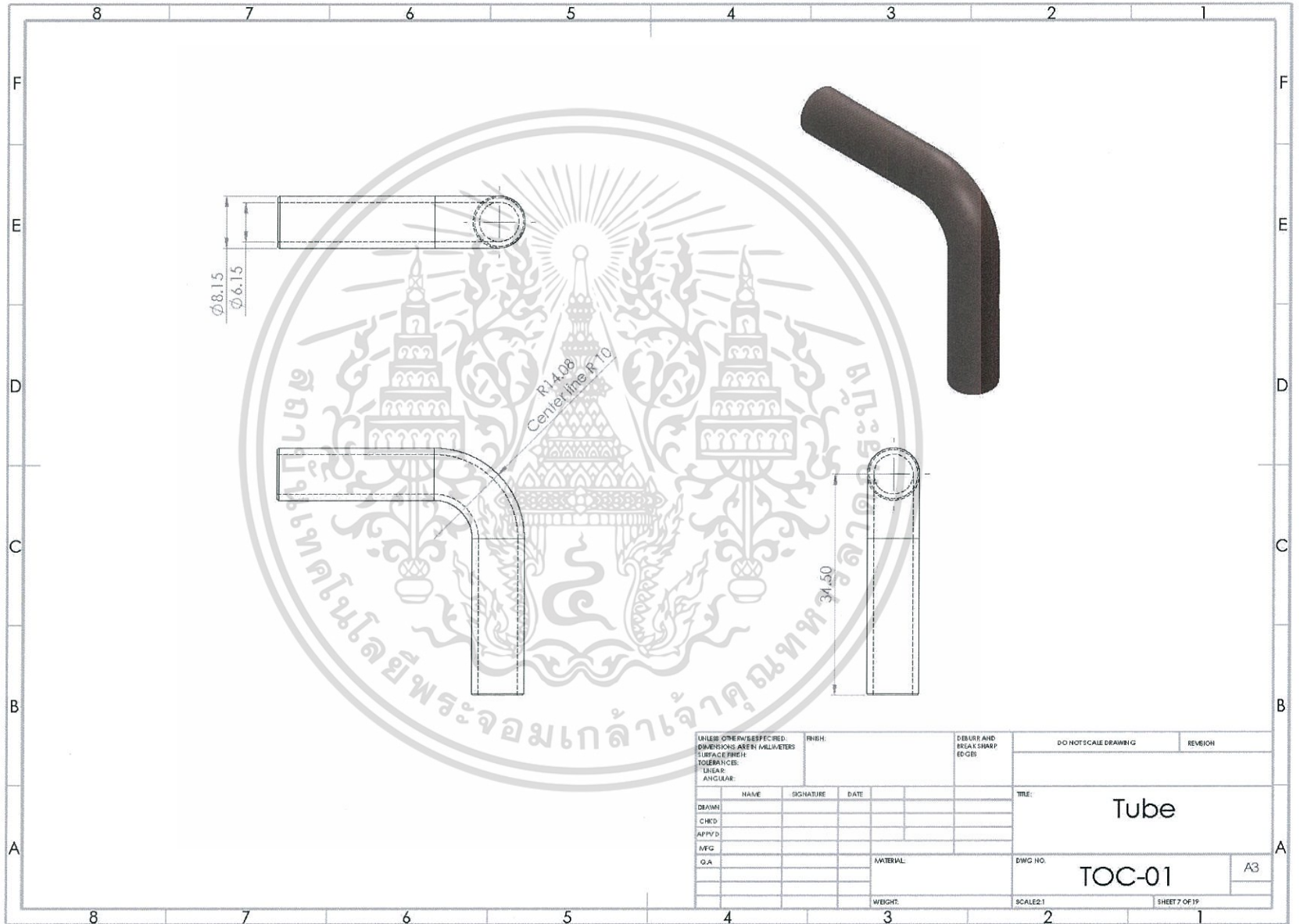


รูปที่ ก.5 รีเจนเนอเรเตอร์



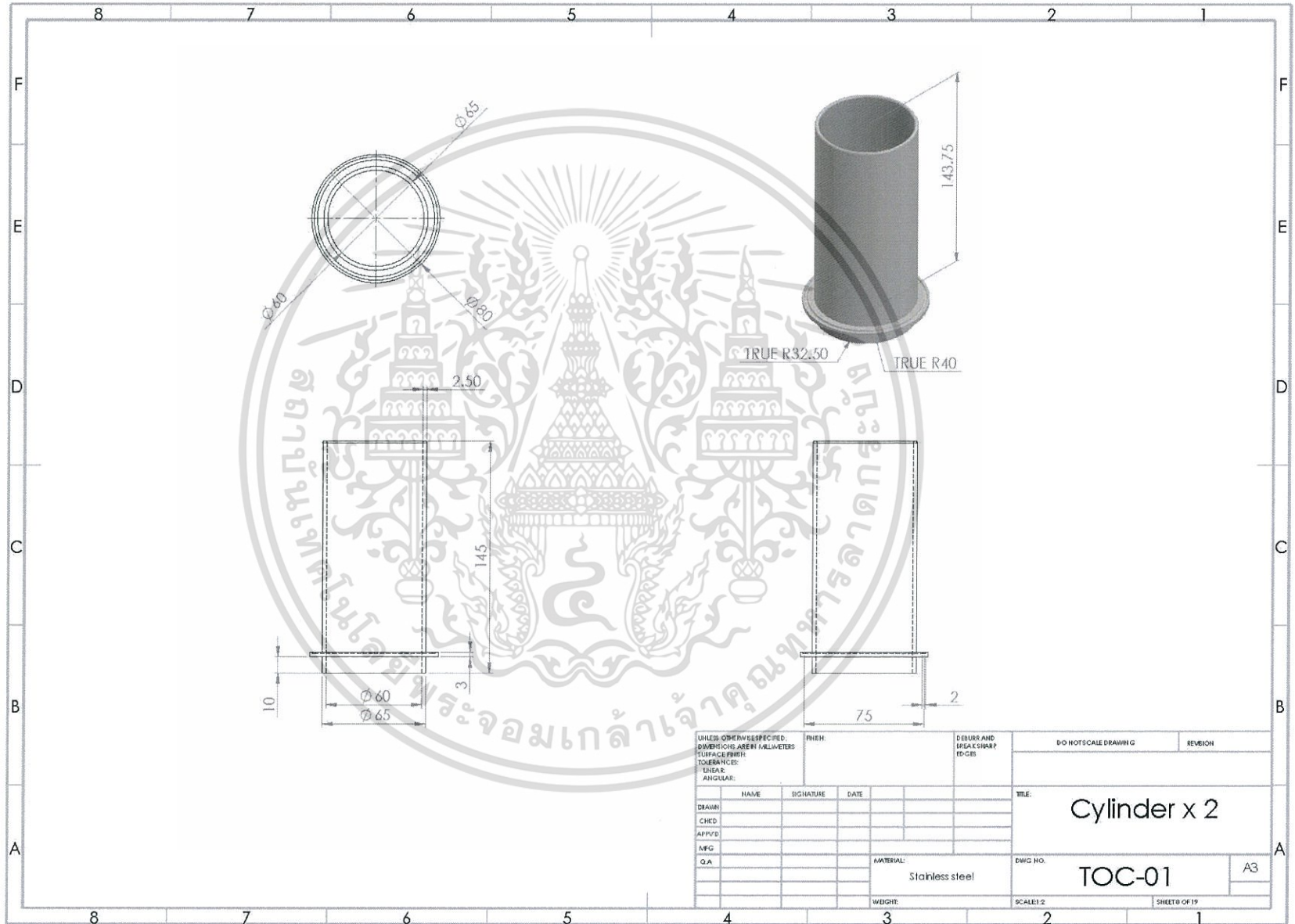
| | | | | | | |
|---|------|-----------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | FINISH: | DRAWER AND MESH SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION |
| DESIGN | NAME | SIGNATURE | DATE | | TITLE: Regenerator | |
| CHECK | | | | | | |
| APPROV. | | | | | | |
| MFG | | | | | | |
| QA | | | | MATERIAL: Stainless Steel | DWG NO. TOC-01 | A3 |
| | | | | WGHT: | SCALE: 1:2 | SHEET 6 OF 19 |

รูปที่ ก.6 ท่อทองแดง

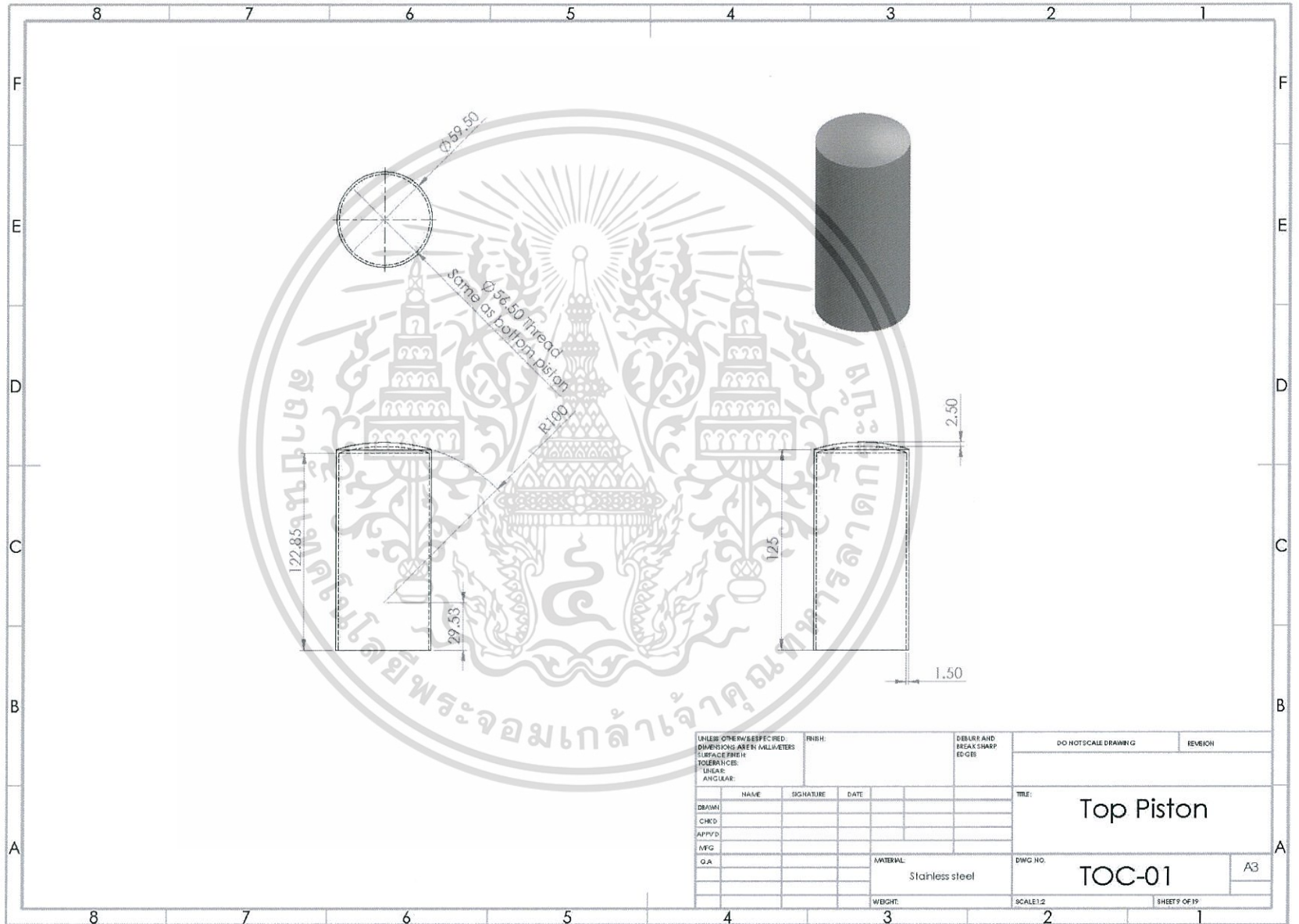


| | | | | | | | | | | |
|--|--|------|-----------|------|------------------------------------|--|----------------------|--|---------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | | FINISH: | | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH: | | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | | |
| LINEAR: | | | | | | | | | | |
| ANGULAR: | | | | | | | | | | |
| DRAWN: | | NAME | SIGNATURE | DATE | TITLE: | | Tube | | | |
| CHK'D: | | | | | | | | | | |
| APP'D: | | | | | | | | | | |
| MFG: | | | | | | | DWG NO. | | A3 | |
| Q.A. | | | | | | | TOC-01 | | | |
| | | | | | MATERIAL: | | SCALE: 1 | | SHEET 7 OF 19 | |
| | | | | | WEIGHT: | | | | | |

รูปที่ ก.7 กระบอกสูบ

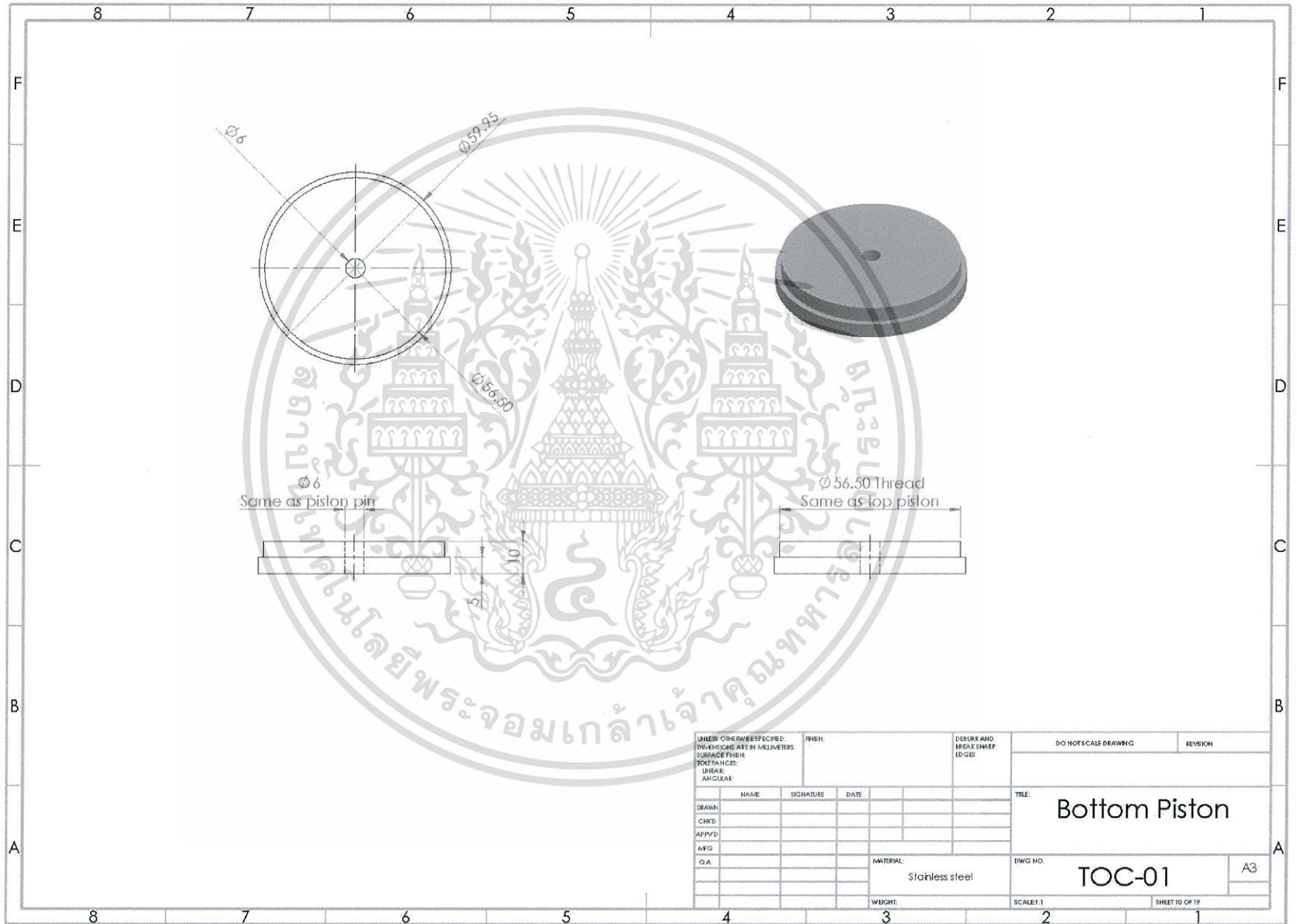


พลาสม่า 8.บ. ๗.๖



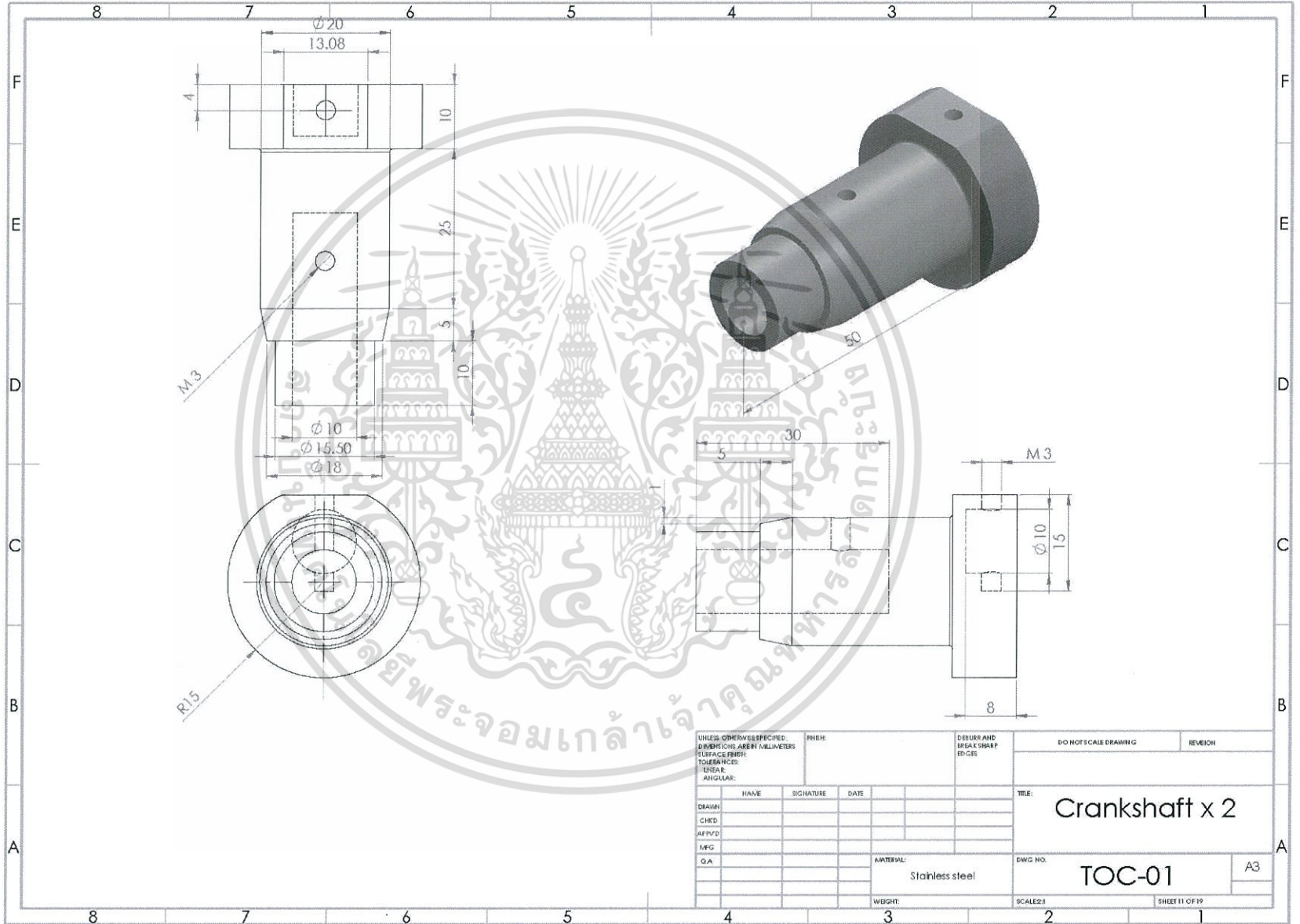
| | | | | | | |
|---|------|-----------|---------|------------------------------------|----------------------|---------------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | FINISH: | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION |
| DRAWN: | NAME | SIGNATURE | DATE | | TITLE: Top Piston | |
| CHECK'D: | | | | | | |
| APPROV'D: | | | | | | |
| MFG: | | | | | | |
| QA: | | | | | | |
| | | | | MATERIAL: Stainless steel | DWG NO. TOC-01 | A3 |
| | | | | WEIGHT: | SCALE: 1:2 | SHEET 9 OF 19 |

รูปที่ ก.9 ลูกสูบล่าง



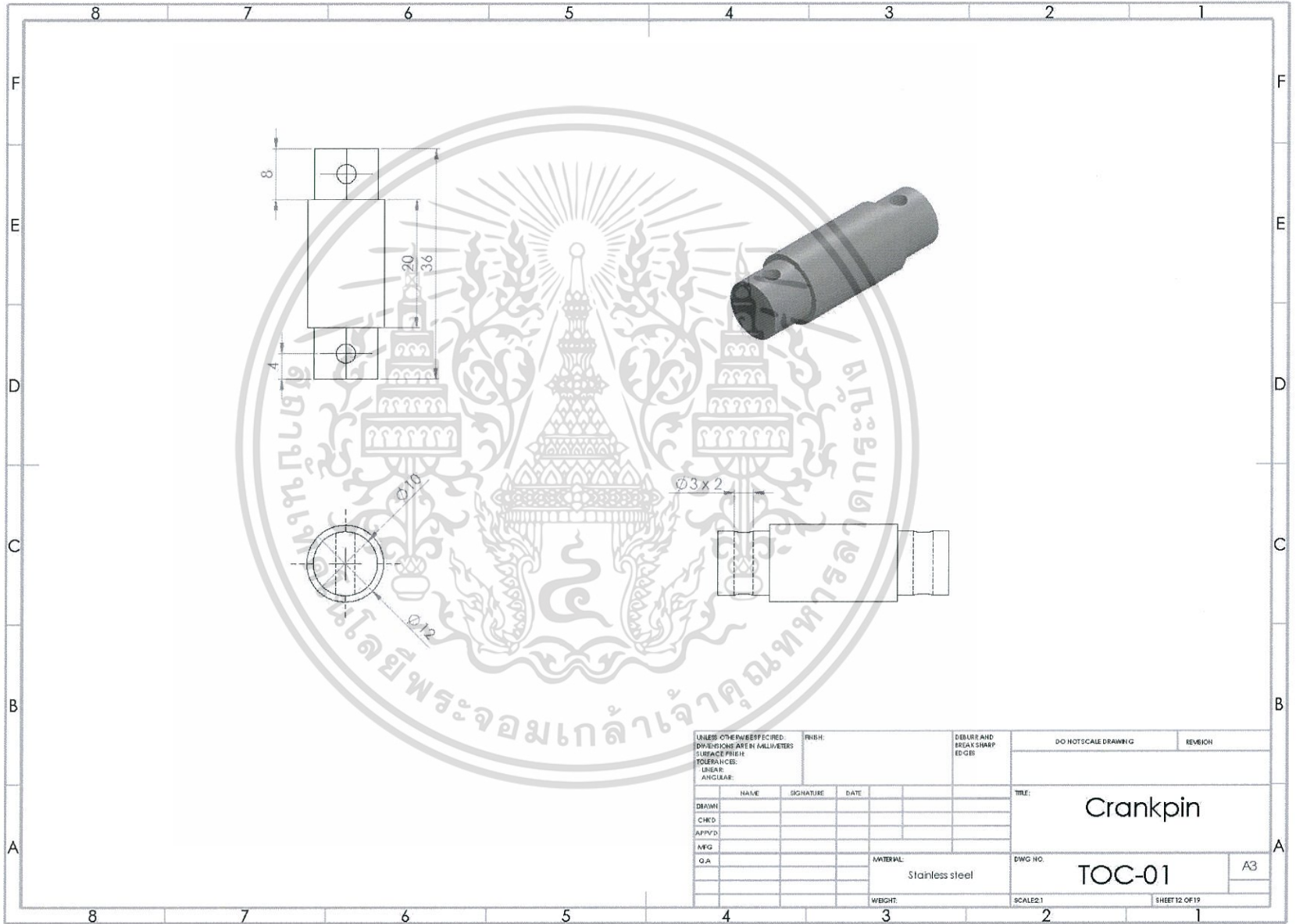
| | | | | | | | | | |
|--|------|-----------|------|------------------------------|--|---------------------------|--|----------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS. | | FINISH: | | DERRUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH: | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR: | | | | | | | | | |
| ANGULAR: | | | | | | | | | |
| DRAWN: | NAME | SIGNATURE | DATE | | | TITLE: Bottom Piston | | | |
| CHK'D: | | | | | | | | | |
| APP'VD: | | | | | | | | | |
| ENG: | | | | | | | | | |
| O.A: | | | | | | MATERIAL: Stainless steel | | DWG NO. TOC-01 | |
| | | | | | | WEIGHT: | | SCALE: 1:1 | |
| | | | | | | | | SHEET 10 OF 19 | |

รูปที่ ก.10 เฟลาข้อเหวี่ยง



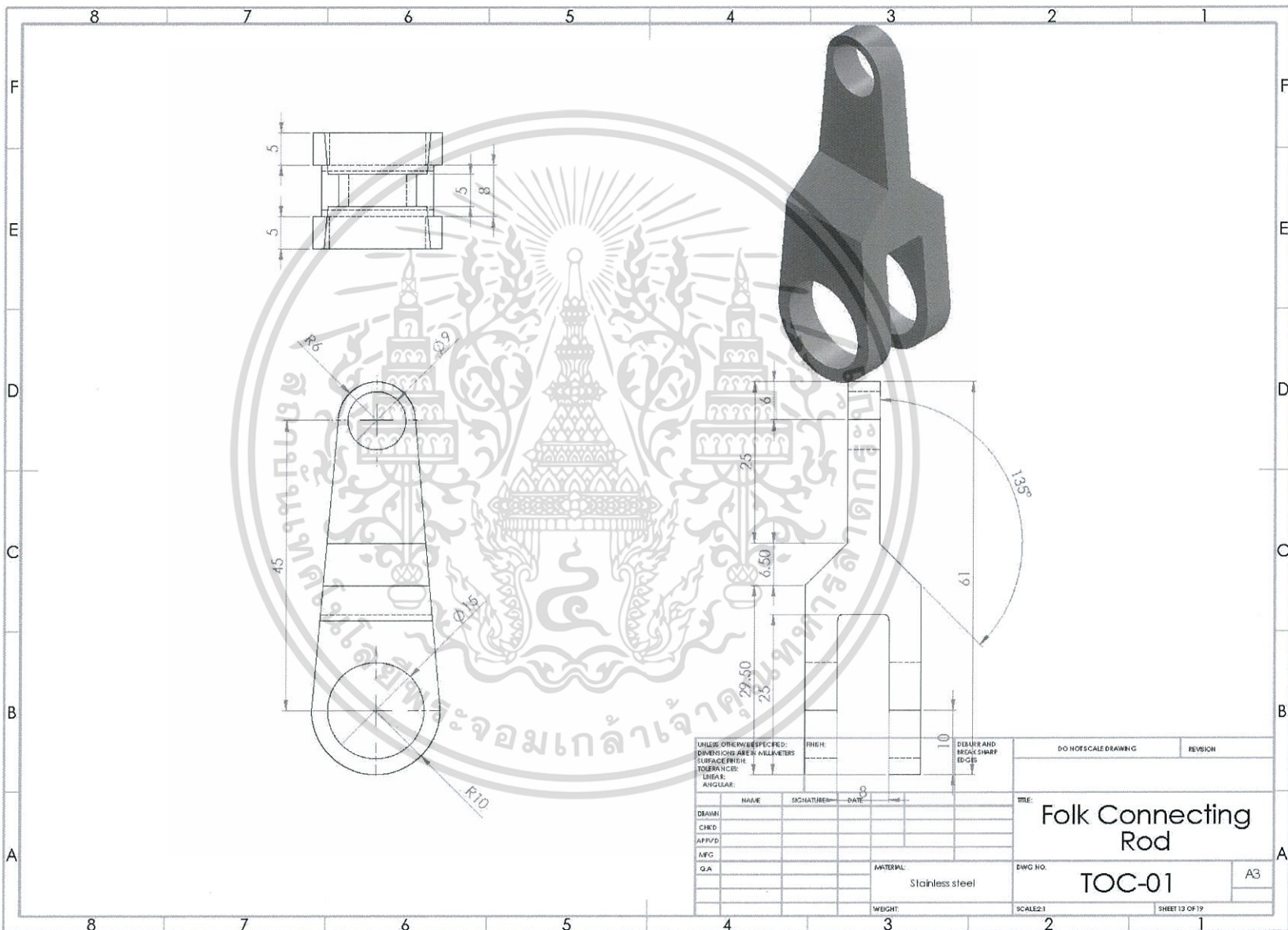
| | | | | | | | | | |
|--|------|-----------|------|--------------------------------|-----------|-----------------------|--|----------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH: | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH: | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR: | | | | | | | | | |
| ANGULAR: | | | | | | | | | |
| | HAVE | SIGNATURE | DATE | | | TITLE: Crankshaft x 2 | | | |
| DRAWN | | | | | | | | | |
| CHECKED | | | | | | | | | |
| APPROVED | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| QA | | | | | | | | | |
| | | | | | MATERIAL: | Stainless steel | | DWG NO. TOC-01 | |
| | | | | | WEIGHT: | | | SCALE: 1:1 | |
| | | | | | | | | SHEET 11 OF 19 | |

รูปที่ ก.11 หมุดเชื่อมเพลลา

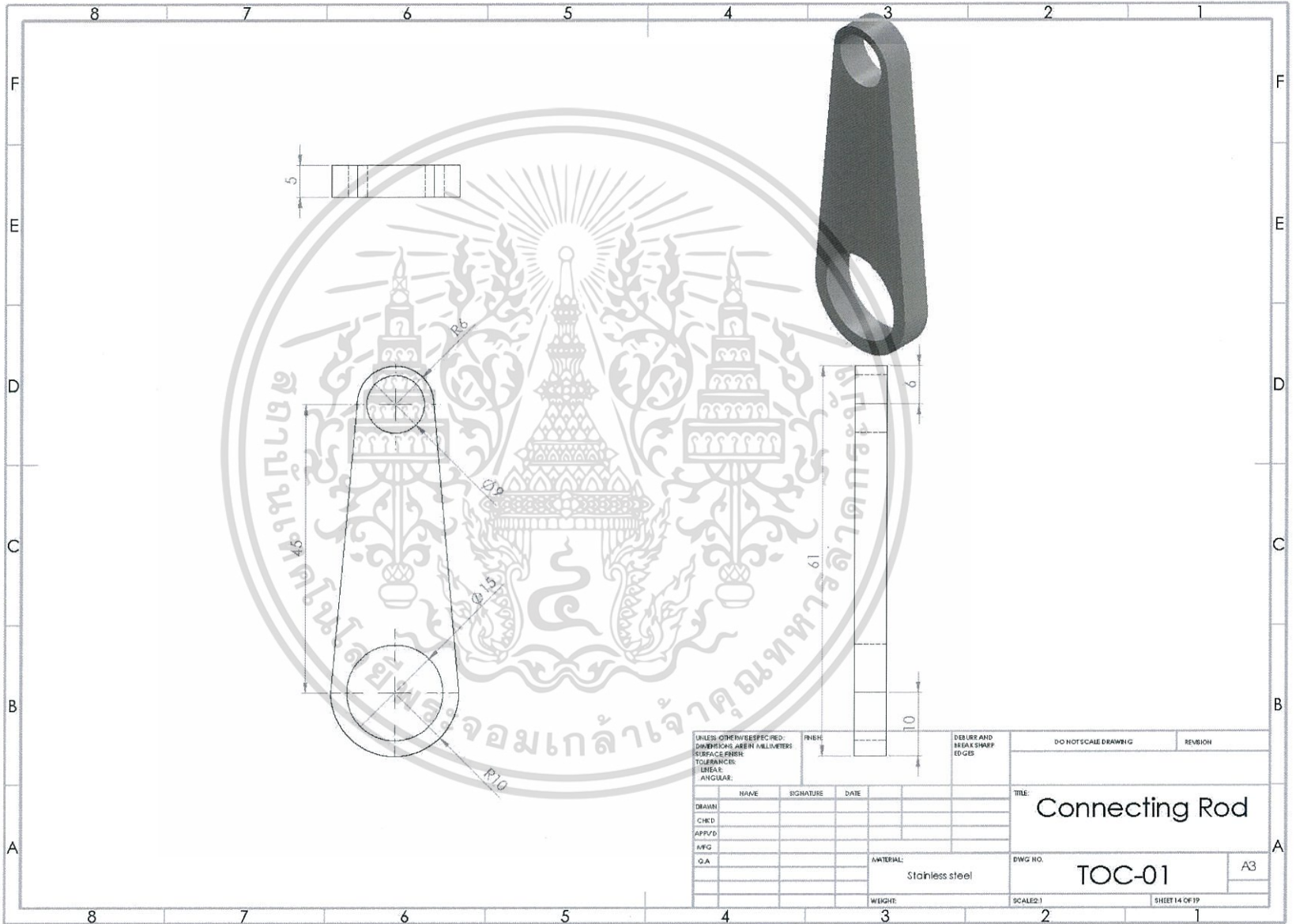


| | | | | | | |
|--|--|--|---------|------------------------------------|----------------------|----------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | FINISH: | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION |
| DRAWN: | | | | TITLE: | | Crankpin |
| CHK'D: | | | | DWG. NO. | | |
| APP'D: | | | | SCALE: 1 | | |
| MFG: | | | | SHEET 12 OF 19 | | |
| QA: | | | | A3 | | |
| MATERIAL: | | | | Stainless steel | | TOC-01 |
| WEIGHT: | | | | | | |

รูปที่ ก.12 แท่งเชื่อมรูปกลม

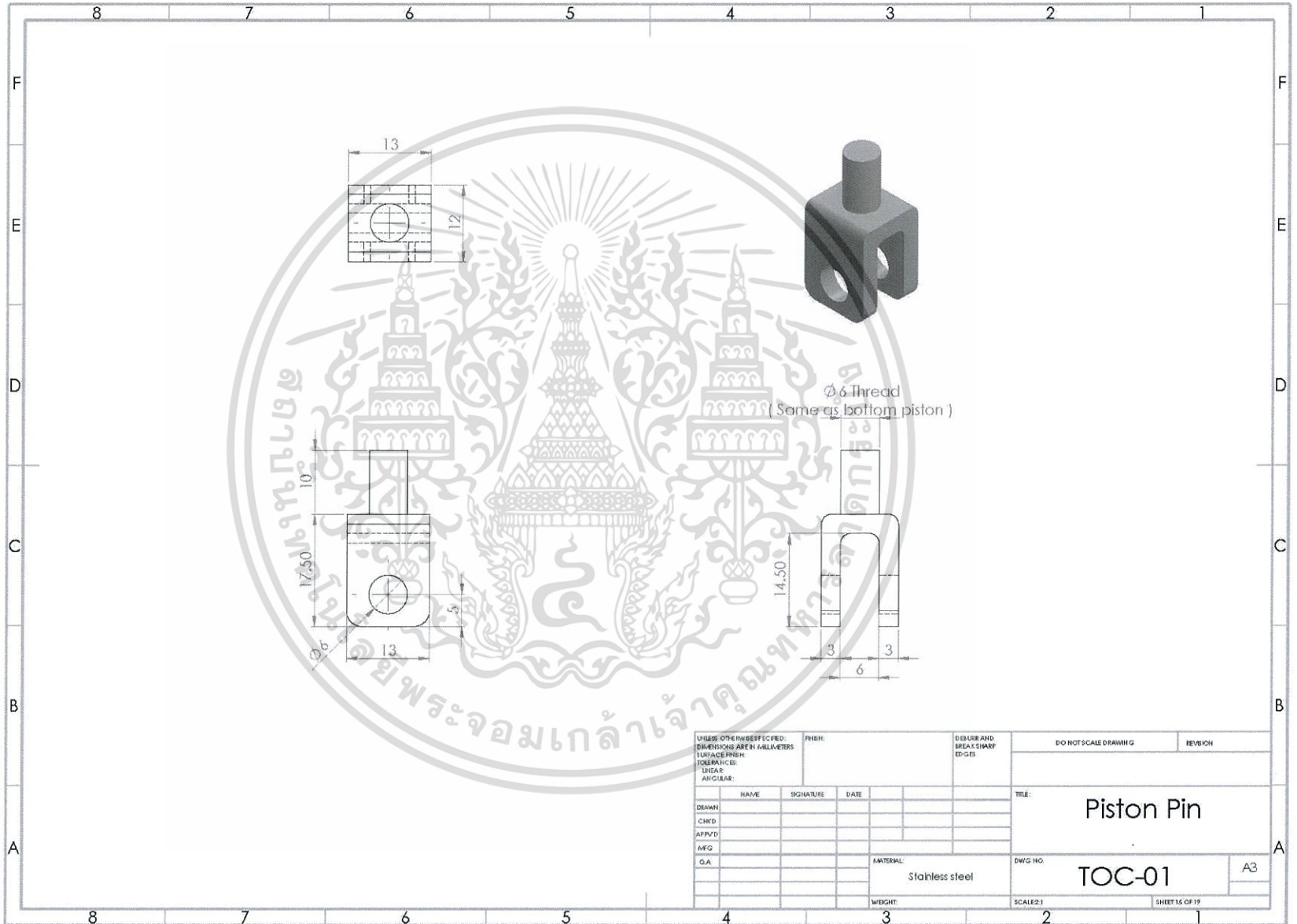


รูปที่ ก.13 แท่งเชื่อม



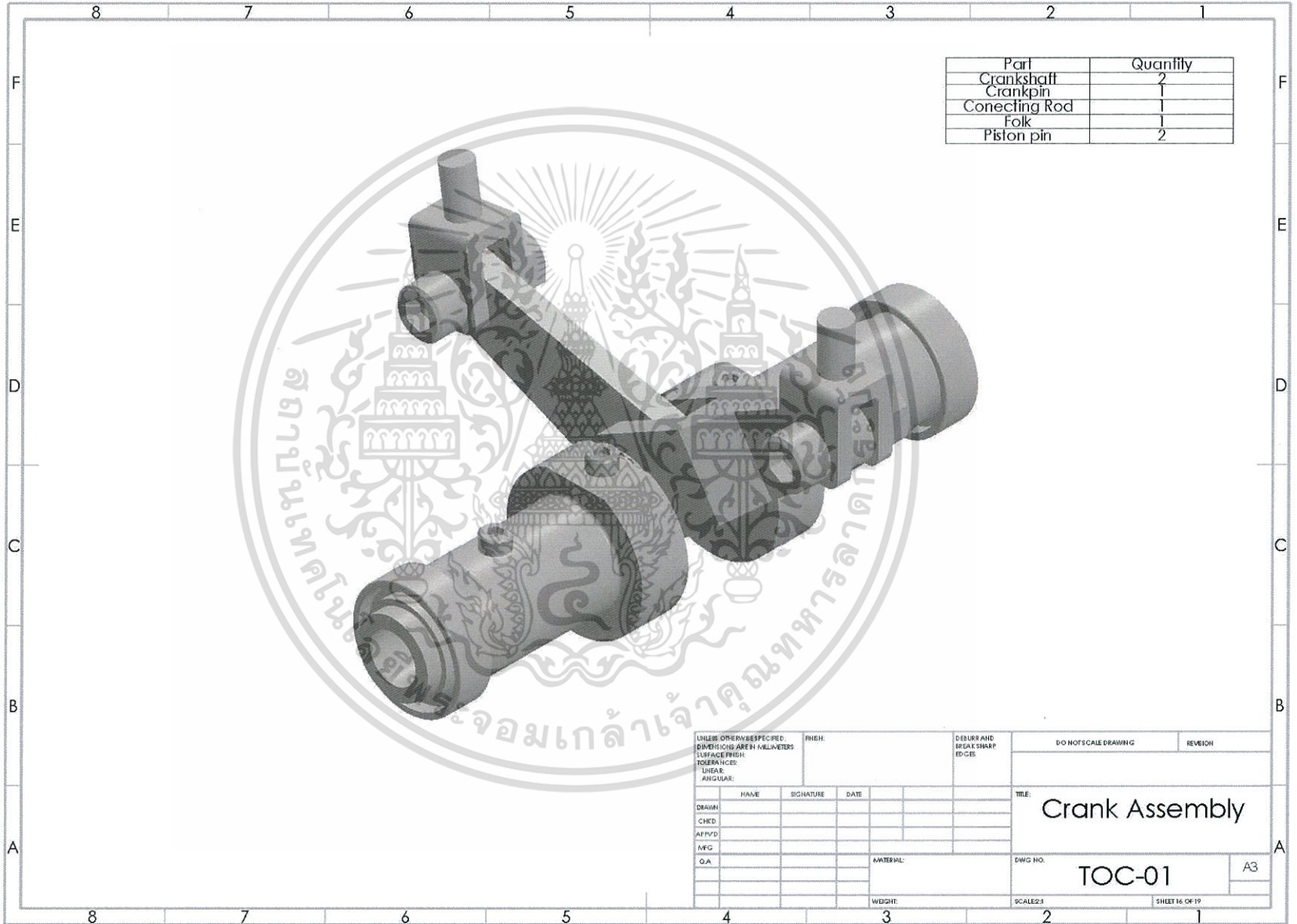
| | | | | | | | |
|--|------|-----------|------|------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | | FINISH | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION |
| DRAWN | NAME | SIGNATURE | DATE | | | TITLE | |
| CHK'D | | | | | | Connecting Rod | |
| APP'D | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | |
| Q.A | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | MATERIAL: Stainless steel | DWG NO. | TOC-01 | A3 |
| | | | | WEIGHT: | SCALE: 1: | SHEET 14 OF 19 | |

รูปที่ ก.14 หมุดลูกสูบ

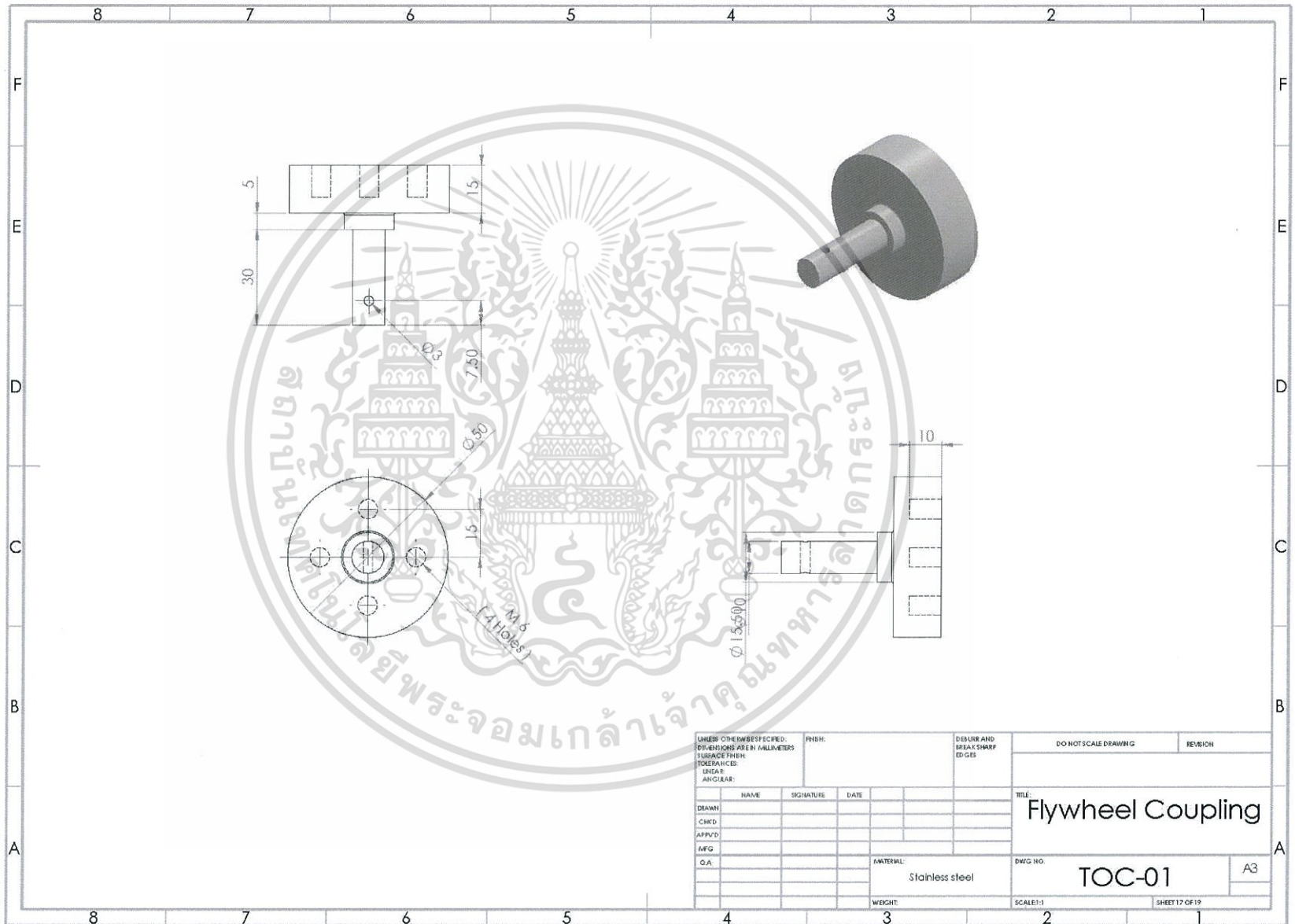


| | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|---------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|----------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | | FINISH: | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| DRAWN | | | | NAME | | SIGNATURE | | DATE | | TITLE: | |
| CHKD | | | | | | | | | | Piston Pin | |
| APPV'D | | | | | | | | | | | |
| A/FG | | | | | | | | | | | |
| Q.A | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | MATERIAL: | | DWG NO. | | A3 | |
| | | | | | | Stainless steel | | TOC-01 | | | |
| | | | | | | WEIGHT: | | SCALE: 1 | | SHEET 15 OF 19 | |

รูปที่ ก.15 ภาพประกอบของเพลาเครื่องยนต์

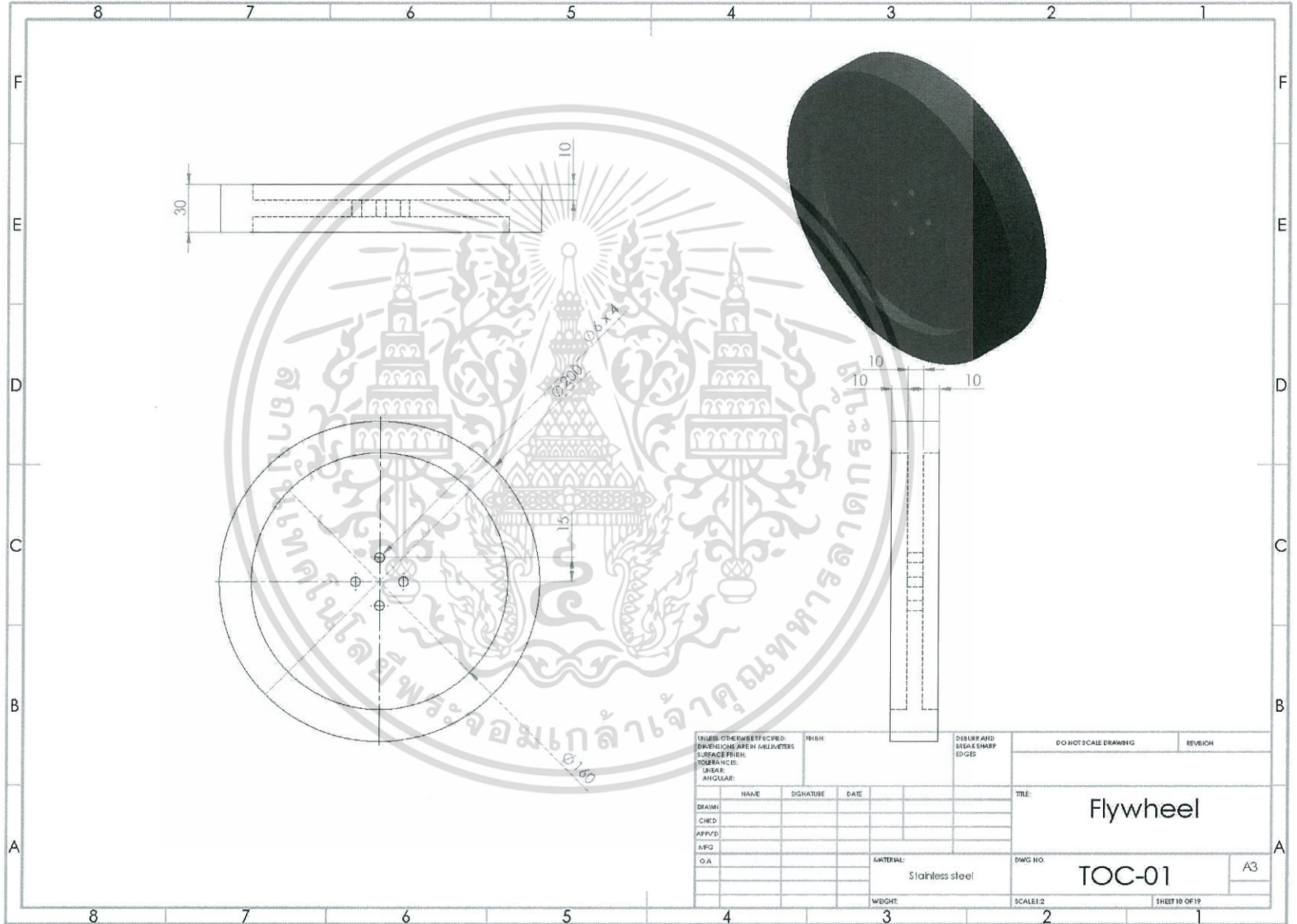


รูปที่ ก.16 ยอยล้อตุ้มกำลัง



| | | | | | | | | | | | |
|--|------|-----------|------|---------|--|------------------------------------|--|-----------------------------|--|----------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | | | FINISH: | | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | | | | | | | | | |
| DRAWN | NAME | SIGNATURE | DATE | | | | | TITLE: Flywheel Coupling | | | |
| CHECK | | | | | | | | | | | |
| APPROV'D | | | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | | | |
| Q.A. | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | MATERIAL: Stainless steel | | DWG NO. TOC-01 | | A3 | |
| | | | | | | WEIGHT: | | SCALE: 1:1 | | SHEET 17 OF 19 | |

รูปที่ ก.17 ล้อตุ้มกำลัง



รูปที่ ก.18 ภาพประกอบเครื่องยนต์

