

การพัฒนา ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

รูปแบบกระบอกสูบรูปตัววี

DESIGN AND MANUFACTURE OF AN ALPHA STIRLING ENGINE

WITH V-CYLINDER PATTERN



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND MANUFACTURE OF AN ALPHA STIRLING ENGINE

WITH V-CYLINDER PATTERN



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

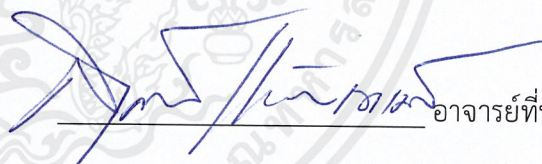
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนา ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบกระบอกสูบรูปตัววี

DESIGN AND MANUFACTURE OF AN ALPHA STIRLING ENGINE WITH V-CYLINDER PATTERN

ผู้จัดทำ

- |                             |              |          |
|-----------------------------|--------------|----------|
| 1.นายกัมปนาท ไหลงาม         | รหัสประจำตัว | 56010070 |
| 2.นายธนพล สาคร              | รหัสประจำตัว | 56010530 |
| 3.นายณะสิทธิ์ ภูศรีวงศ์วณิช | รหัสประจำตัว | 56010559 |
| 4.นายปฎิภาณ ไชยกิจ          | รหัสประจำตัว | 56010707 |

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนา ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา  
รูปแบบกระบอกสูบรูปตัววี

นายกัมปนาท	ไหลงาม	56010070
นายธนพล	สาคร	56010530
นายณะสิทธิ์	ภูศรีวงศ์วนิช	56010559
นายปฏิภาณ	ไชยกิจ	56010707
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

โครงการพัฒนา ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟารูปแบบกระบอกสูบรูปตัววีนี้ มีวัตถุประสงค์ที่จะออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้แหล่งความร้อนในการสร้างพลังงานกล เนื่องจากปัจจุบันเชื้อเพลิงฟอสซิลใกล้ที่จะหมดไป จึงเลือกใช้แหล่งความร้อนอื่นๆเป็นทางเลือกแทน และยังจัดสร้างองค์ความรู้ในการวิจัยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากฝีมือนักศึกษาที่สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบ โดยมีการออกแบบ และคำนวณ กำลัง ประสิทธิภาพและศักยภาพที่จะได้ และส่งผลิตชิ้นงานจริง โดยมีขอบเขตอุณหภูมิของกระบอกสูบด้านเท่ากับ 650 องศาเซลเซียสร้อน และกระบอกสูบด้านเย็นมีอุณหภูมิ 77 องศาเซลเซียส และใช้อากาศเป็นสารทำงานที่ความดันบรรยากาศ โดยตั้งเป้าหมายกำลังงานซึ่งได้จากการคำนวณไว้ที่ 23.7 วัตต์ แม้ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบที่สร้างไม่สามารถทำงานได้ แต่ได้ค้นพบสาเหตุที่ทำให้เครื่องยนต์ไม่ทำงาน และหาแนวทางในการแก้ไขเพื่อให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ในอนาคต อีกทั้งสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปเผยแพร่ให้แก่ผู้สนใจเพื่อสร้างประโยชน์ให้กับสังคม และเอื้อให้เกิดการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมเพื่อเป็นชื่อเสียงในนามผลงานของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## Design and Manufacture of an Alpha Stirling Engine with V-cylinder pattern

Kumpanat	Laingam	56010070
Tanapon	Sakorn	56010530
Thanasit	Poosrivongvanich	56010559
Patipan	Chaiyakit	56010707
Assoc.Prof. Dr.Sutapat Kwankaomeng		Advisor
Year 2016		

### Abstract

This project presents design, analysis, and manufacture of an Alpha Stirling engine with V-cylinder arrangement. The objective is to design and build the Stirling engine uses a heat source to generate mechanical energy. At present, fossil fuels will run out at the close. The use of other heat sources as an alternative and create knowledge in the research of the Stirling engine prototype. According to the analysis of an Alpha Stirling engine, the engine power and efficiency estimation under by using unpressurized air as working fluid , temperatures of heater and cooler surface at 923 K and 350 K , By setting the power from calculation 23.7 watts. Although the Stirling engine prototype does not work but discover the causes and identify ways to solve the problem so that the engine can be work in the future. Also can bring knowledge to publish to those interested to contribute to society and encourages the development of the industry, To be known as the contributions of Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะคำแนะนำที่ดี และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ อย่างเอาใจใส่อย่างดีเสมอมาจาก ผศ.ดร.สุตาภักดิ์ แคว้นเขาเม็ง อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้ข้อมูลที่สำคัญ ในการทำโครงการทั้งให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาต่าง ๆ เป็นพระคุณอย่างมาก

ขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความ อนุเคราะห์และดูแลลูกศิษย์ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลเป็นอย่างดี ขอขอบคุณพี่เลี้ยงจากบริษัท เอ็ม เอส แมชชีนเนอร์รี่แอนด์เซอร์วิส จำกัด ที่คอยให้คำแนะนำในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องยนต์ และขอบคุณ นัท ชัน พีท ปาล์ม เจมส์ เดย์ และตุลย์ ที่มีน้ำใจช่วยเหลือพาพวกของข้าพเจ้าไปโรงงานเพื่อส่งผลิต ชิ้นส่วน และแก้ไขชิ้นงานตลอดการทำโครงการนี้ รวมถึงรุ่นพี่และเพื่อนๆที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ที่ คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจแก่กลุ่มข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ก็คือ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ คอยให้กำลังใจ และเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้าน ซึ่งเป็นพระคุณอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกใน พระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายกัมปนาท	ไพลงาม
นายธนพล	สาคร
นายธนະสิทธิ์	ภูศรีวงศ์วัฒน์
นายปฏิภาณ	ไชยกิจ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	1
1.4 ขอบเขตการศึกษาค้นคว้า.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	4
2.1 วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle).....	4
2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling cycle).....	4
2.3 ทฤษฎีของ Schmidt.....	8
2.3.1 ขอบเขตการศึกษาค้นคว้าของทฤษฎี Schmidt.....	8
2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา.....	8
2.4 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา.....	9

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบ และวิเคราะห์เครื่องยนต์ต้นแบบ .....	13
3.1 กำลังของเครื่องยนต์เชิงปฏิบัติ Beale Number ( $B_n$ ).....	13
3.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) .....	15
3.2.1 ด้านร้อน (Heater).....	15
3.2.2 ด้านเย็น (Cooler).....	20
3.3 กลไกการทำงานของสไลเดอร์แครง (Slider-crank) .....	28
3.4 การออกแบบ Flywheel .....	29
3.5 การวิเคราะห์เครื่องยนต์ต้นแบบ .....	30
บทที่ 4 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์.....	35
4.1 โดมรับความร้อน .....	35
4.2 ฐานโดมรับความร้อน.....	35
4.3 รีเจนเนอเรเตอร์ .....	36
4.4 ส่วนระบายความร้อน .....	36
4.5 ลูกสูบด้านร้อน .....	37
4.6 ลูกสูบด้านเย็น .....	37
4.7 หมุดยึดลูกสูบด้านร้อน และด้านเย็น .....	38
4.8 ก้านลูกสูบ .....	38
4.9 สลักข้อเหวี่ยง .....	39
4.10 เพล้าข้อเหวี่ยง.....	39
4.11 ยอยล้อตุนกำลัง.....	40
4.12 ล้อตุนกำลัง .....	40

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.13 กล้องเครื่องยนต์.....	41
บทที่ 5 การทดสอบเครื่องยนต์.....	42
5.1 ชุดทดสอบเครื่องยนต์.....	42
5.1.1 ฮีตเตอร์ไฟฟ้า.....	42
5.1.2 ถังก๊าซ LPG.....	43
5.1.3 หัวเผาก๊าซ.....	43
5.1.4 ฉนวนครอบหัวเผา.....	44
5.1.5 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter).....	44
5.1.6 อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (Infrared thermometer).....	45
5.2 การทดสอบเครื่องยนต์.....	45
5.2.1 การทดสอบครั้งที่ 1.....	45
5.2.2 การทดสอบครั้งที่ 2.....	49
5.2.3 การทดสอบครั้งที่ 3.....	50
5.2.4 การทดสอบครั้งที่ 4.....	51
5.2.5 การทดสอบครั้งที่ 5.....	51
5.2.6 การทดสอบครั้งที่ 6.....	51
บทที่ 6.....	52
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก.....	54

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รายละเอียดเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา รูปแบบกระบอกสูบรูปตัววี.....	10
3.1 ตาราง $Nu_0$ สำหรับการรับความร้อนแบบวงแหวน.....	18
3.2 ค่าที่ได้จากวัฏจักร Schmidt .....	34
ก.1 ตารางแสดงชิ้นส่วนเครื่องยนต์ต้นแบบ .....	55



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน .....	4
2.1 แสดงแผนภาพ P-V และ T-S ของวัฏจักรคาร์โนต์ .....	5
2.2 ภาพแสดงลักษณะของลูกสูบในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรสเตอร์ลิง.....	7
2.3 กราฟแผนภาพ P-V และ T-S ของวัฏจักรสเตอร์ลิง.....	7
2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา.....	9
2.5 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบกระบอกสูบรูปตัววี .....	10
2.6 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 1-2 .....	11
2.7 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 2-3 .....	11
2.8 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 3-4 .....	12
2.9 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 4-1 .....	12
3.1 กราฟ Beale Number.....	13
3.2 วงจรความร้อนของกระบอกสูบด้านร้อน .....	15
3.3 วงจรความร้อนของกระบอกสูบด้านเย็น .....	21
3.4 กลไกของสไลเดอร์แครง.....	28
3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตร .....	33
3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของลูกสูบร้อน (สีฟ้า) และลูกสูบเย็น (สีแดง).....	34
4.1 โดมรับความร้อน.....	35
4.2 ฐานโดมรับความร้อน .....	35
4.3 รีเจนเนอเรเตอร์ .....	36
4.4 ส่วนระบายความร้อน.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ลูกสูบด้านร้อน.....	37
4.6 ลูกสูบด้านเย็น.....	37
4.7 หมุดยึดลูกสูบด้านร้อนและด้านเย็น.....	38
4.8 ก้านลูกสูบชนิดส้อม.....	38
4.9 ก้านลูกสูบ.....	38
4.9 เพลาค้อเหวี่ยง.....	39
4.10 สลักค้อเหวี่ยง.....	39
4.11 ขอยล้อตุนกำลัง.....	40
4.12 ล้อตุนกำลัง.....	40
4.13 กล่องเครื่องยนต์.....	41
5.1 ฮีตเตอร์ไฟฟ้า.....	42
5.2 ถังก๊าซ LPG และ วาล์วควบคุมความดันและอัตราการไหล.....	43
5.3 หัวเผาก๊าซ.....	43
5.4 ฉนวนครอบหัวเผา.....	44
5.5 เครื่องวัดอัตราการไหล.....	44
5.6 อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์.....	45
5.7 ความเสียหายบริเวณภายในของฐานโดมรับความร้อน.....	46
5.8 ความเสียหายบริเวณลูกสูบด้านร้อน.....	46
5.9 ชุดกลไกเพลาค้อเหวี่ยงก่อนการแก้ไข.....	46
5.10 กล่องเครื่องยนต์ก่อนการแก้ไข.....	47
5.11 ฐานโดมรับความร้อนหลังแก้ไข.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตี X อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 แผลบริเวณลูกสูบด้านร้อนหลังแก้ไข.....	48
5.13 ชุดกลไกเพลลาข้อเหวี่ยงหลังการแก้ไข.....	48
5.14 กล่องเครื่องยนต์หลังการแก้ไข.....	49
5.15 ลูกสูบด้านร้อนหลังจากทำการกลึงร่อง และใส่แหวน.....	50
5.16 ล้อตุ้มกำลังที่มีน้ำหนัก 2.2 กิโลกรัม.....	50
ก.1 ฐานรองโคมรับความร้อน.....	57
ก.2 ฐานรองรับส่วนระบายความร้อน.....	58
ก.3 ฝาปิดเครื่องยนต์.....	59
ก.4 ฐานเครื่องยนต์.....	60
ก.5 ฐานเครื่องยนต์.....	61
ก.6 โคมรับความร้อนส่วนบน.....	62
ก.7 โคมรับความร้อนส่วนล่าง.....	63
ก.8 ส่วนระบายความร้อน.....	64
ก.9 ท่อทองแดง.....	65
ก.10 ท่อรีเจนเนอเรเตอร์.....	66
ก.11 ฝาปิดท่อรีเจนเนอเรเตอร์.....	67
ก.12 ลูกสูบร้อนส่วนบน.....	68
ก.13 ลูกสูบร้อนส่วนกลาง.....	69
ก.14 ลูกสูบร้อนส่วนล่าง.....	70
ก.15 ลูกสูบเย็นส่วนบน.....	71
ก.16 ลูกสูบเย็นส่วนล่าง.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตัว X ภาษาอังกฤษถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.17 เพลาข้อเหวี่ยง.....	73
ก.18 สลักข้อเหวี่ยง.....	74
ก.19 ก้านลูกสูบชนิดส้อม.....	75
ก.20 ก้านลูกสูบ.....	76
ก.21 หมุดยึดลูกสูบ.....	77
ก.22 ยอยล้อตุนกำลัง.....	78
ก.23 ล้อตุนกำลัง.....	79
ก.24 ภาพประกอบเพลาคู่มือเครื่องยนต์.....	80

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้ประชาชนหลายๆที่ทั่วโลกได้ให้ความสนใจในเรื่องพลังงานทางเลือกกันมากขึ้นเนื่องจากภาวะโลกร้อนและภาวะโลกร้อนยังจะเพิ่มมากขึ้นไปเรื่อยๆ ในอนาคตดังนั้นทางผู้ศึกษาจึงได้เลือกใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่คิดค้นโดย โรเบิร์ต สเตอร์ลิง เมื่อปีค.ศ.1816 โดยเครื่องยนต์นี้อาศัยหลักการทำงานจากแหล่งอุณหภูมิที่ต่างกัน 2 แหล่งเพื่อให้ลูกสูบขับเคลื่อน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นระบบปิดไม่มีลิ้นไอดีและไอเสียดังเช่นเครื่องยนต์เบนซินหรือดีเซลซึ่งการทำงานของเครื่องยนต์นี้จะมีเสียงเงียบและไม่มีการสร้างมลพิษโดยตรงจากเครื่องยนต์ ทั้งนี้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถหาแหล่งพลังงานได้ง่ายและหลากหลาย เช่น จากถ่านหิน น้ำมัน แอลกอฮอล์ ก๊าซ ไม้และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนจะทำให้กระบวนการนี้เป็นคาร์บอนนิวทรัลเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากกระบวนการเผาไหม้นั้นพืชสามารถดูดกลับไปสังเคราะห์แสงได้ ผู้ศึกษาเล็งเห็นประโยชน์เหล่านี้จึงศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาในรูปแบบวี โดยผู้ศึกษามีเครื่องยนต์ต้นสเตอร์ลิงต้นแบบที่ไม่สามารถทำงานได้อยู่ก่อนแล้ว จึงได้นำชิ้นส่วนกลไกส่งกำลังมาใช้ และมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงชิ้นส่วนรับความร้อนและคายความร้อน เพื่อเป็นองค์ความรู้ในงานวิจัยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแก่ผู้ที่สนใจต่อไป

### 1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาเป็นเครื่องยนต์ที่ลูกสูบทั้งสองแยกจากกัน และเป็นชนิดที่ให้กำลังมากที่สุดเมื่อเทียบกับชนิดเบตาและแกมมา โดยช่วงองศาการวางลูกสูบที่ดีที่สุดอยู่ในช่วง 70 -110 องศา จากการศึกษาพบว่าความต่างเฟสที่เหมาะสมของเครื่องยนต์แอลฟา คือ 80 องศา และการลดปริมาตรตายของเครื่องยนต์ส่งผลต่อกำลังของเครื่องยนต์เช่นกัน แต่เพื่อให้ง่ายต่อการผลิต และประกอบจึงเลือกออกแบบเครื่องยนต์เพื่อลดปริมาตรตายโดยที่กระบอกสูบฝั่งร้อน และฝั่งเย็นมีเฟสต่างกัน 90 องศา

### 1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง และตัวแปรในการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
2. ออกแบบ และสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาในรูปแบบกระบอกสูบรูปตัววี
3. ทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ข้อสมมติฐานของการศึกษา

เครื่องยนต์สามารถสร้างกำลังได้น้อยกว่า 23.7 วัตต์ ตามทฤษฎีของ Schmidt เนื่องจากพลังงานเกิดการสูญเสียจากแรงเสียดทาน และปัจจัยอื่นๆ โดยกำหนดให้ลูกสูบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 59.5 มิลลิเมตร และระยะกระจัดของลูกสูบเท่ากับ 28 มิลลิเมตร โดยเริ่มต้นอากาศมีความดัน 1 บรรยากาศ

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
2. การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีของ Schmidt
3. ใช้อากาศที่ความดันบรรยากาศเป็นสารทำงาน
4. สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาแบบวี โดยใช้ชุดกลไกที่มีอยู่แล้ว

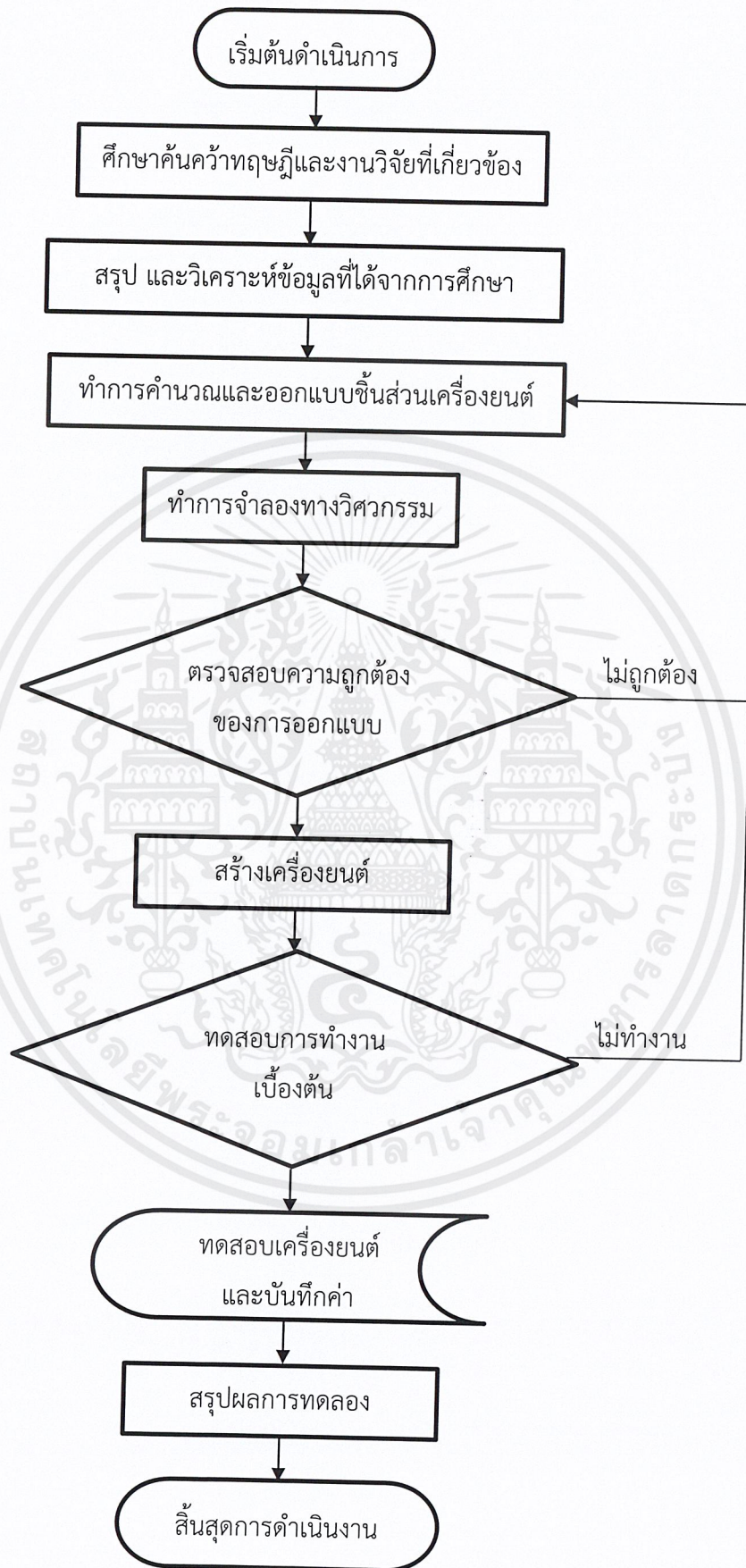
## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สามารถทำงานได้
2. ได้เข้าใจการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากการศึกษาโครงงาน
3. เครื่องยนต์ต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถเป็นแบบในการศึกษาเพื่อพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟาต่อไปได้

## 1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรวมถึงลักษณะการเคลื่อนที่และการส่งกำลังของกลไกเครื่องส่งกำลังจากหนังสือ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องรวมถึงแหล่งข้อมูลอื่นๆ
2. สรุปล และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการศึกษา
3. คำนวณ และออกแบบชิ้นส่วนเครื่องยนต์
4. ทำการจำลองทางวิศวกรรมจากเครื่องยนต์ที่ได้ทำการออกแบบมา
5. ตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบเครื่องยนต์ (หากยังไม่ถูกต้องให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 3)
6. ทำการสร้างเครื่องยนต์
7. ทำการทดสอบเบื้องต้นว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ (หากเครื่องยนต์ไม่ทำงานให้กลับไปขั้นตอนที่ 3)
8. ทำการทดสอบเครื่องยนต์และบันทึกค่า
9. สรุปลผลการทดลอง
10. สิ้นสุดการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

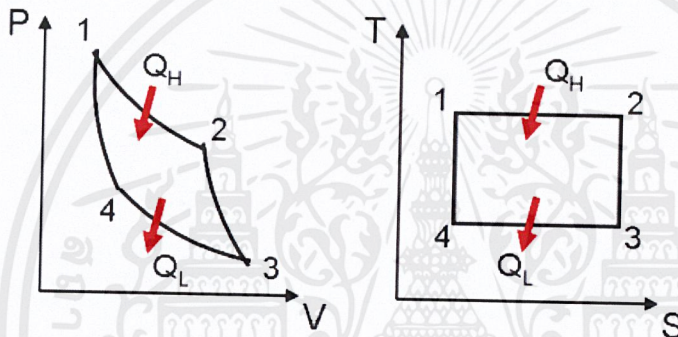
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

### 2.1 วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle)

เป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ในอุดมคติ ซึ่งวัฏจักรคาร์โนต์เป็นวัฏจักรที่ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด ซึ่งไม่มีวัฏจักรใดที่ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนเกินวัฏจักรนี้ โดยวัฏจักรคาร์โนต์นั้นประกอบด้วยกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ 4 ขั้นตอนคือ กระบวนการรับความร้อนคงที่ กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก กระบวนการคายความร้อนคงที่ และกระบวนการอัดตัวแบบไอเซนโทรปิก ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพ P-V และ T-S ของวัฏจักรคาร์โนต์

### 2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling cycle)

เป็นวัฏจักรที่ลอกเลียนแบบวัฏจักรคาร์โนต์ในบางส่วน ประกอบด้วยกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ วัฏจักรสเตอร์ลิงแต่เปลี่ยนจากกระบวนการเอนโทรปิกที่เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่แทน ทำให้วัฏจักรนี้ประกอบด้วยกระบวนการ 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1-2 กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal compression)

ในขั้นตอนนี้ความร้อนจะถูกดึงออกจากสารทำงานและระบายสู่สิ่งแวดล้อม โดยที่อุณหภูมิต่ำสุดของวัฏจักรและลูกสูบอัดสารทำงานให้มีความดันสูงโดยงานที่ใช้ในการอัดนั้นเท่ากับความร้อนที่ระบายออกจากระบบ จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในแต่จะมีการลดลงของเอนโทรปี สำหรับกระบวนการนี้เป็นดังสมการที่ 2.1 ,2.2 และ 2.3

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

$$Q_{\text{out}} = W_c = P_1 V_1 \ln\left(\frac{1}{r}\right) = RT_1 \ln\left(\frac{1}{r}\right) \quad (2.2)$$

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

เมื่อ	$T_1$ และ $T_2$	คือ อุณหภูมิของสารทำงาน ณ สถานะที่ 1 และ 2 โดยที่ $T_1 = T_2 = T_{\text{min}}$
	$P_1$ และ $P_2$	คือ ความดันของสารทำงาน ณ สถานะที่ 1 และ 2
	$V_1$ และ $V_2$	คือ ปริมาตรของสารทำงาน ณ สถานะที่ 1 และ 2
	$r$	คือ อัตราส่วนการอัด โดยที่ $r = V_1/V_2$
	$Q_{\text{out}}$	คือ ความร้อนที่ระบายออกจากระบบ
	$W_c$	คือ งานที่ใช้ในการอัด
	$S_1$ และ $S_2$	คือ เอนโทรปี ณ สถานะที่ 1 และ 2
	$R$	คือ ค่าคงที่ของอากาศ

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

ในกระบวนการนี้สารทำงานจะเคลื่อนตัวจากส่วนเย็นเพื่อไปรับความร้อนโดยมีความดัน และอุณหภูมิสูงสุดของระบบ โดยกระบวนการนี้จะมีพลังงานภายในและเอนโทรปีเพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 2.4 , 2.5 และ 2.6

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

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

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

เมื่อ	$T_3$	คือ อุณหภูมิของสารทำงาน ณ สถานะที่ 3 โดยที่ $T_3 = T_{\text{max}}$
	$P_3$	คือ ความดันของสารทำงาน ณ สถานะที่ 3 โดยที่ $P_3 = P_{\text{max}}$
	$V_3$	คือ ปริมาตรของสารทำงาน ณ สถานะที่ 3 โดยที่ $V_2 = V_3$
	$Q_{\text{in}}$	คือ ความร้อนที่ป้อนในส่วนรับความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$S_3$  คือ เอนโทรปี ณ สถานะที่ 3

ขั้นตอนที่ 3-4 กระบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal expansion process)

ในกระบวนการนี้ความร้อนจะถูกป้อนให้กับกระบอกสูบขยายตัว เมื่อสารทำงานรับความร้อนก็จะขยายตัวดันลูกสูบออก และได้งานออกมาจากระบบโดยที่อุณหภูมิคงที่เนื่องจากความร้อนทั้งหมดที่ให้ถูกเปลี่ยนเป็นงานในการขยายตัว ดังแสดงในสมการที่ 2.7 , 2.8 และ 2.9

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

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

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

เมื่อ	$T_4$	คือ อุณหภูมิของสารทำงาน ณ สถานะที่ 4 โดยที่ $T_3 = T_4 = T_{\max}$
	$P_4$	คือ ความดันของสารทำงาน ณ สถานะที่ 4
	$V_4$	คือ ปริมาตรของสารทำงาน ณ สถานะที่ 4
	$r$	คือ อัตราส่วนการอัด โดยที่ $r = V_4/V_3$
	$Q_e$	คือ งานที่ได้จากการขยายตัว
	$S_4$	คือ เอนโทรปี ณ สถานะที่ 4

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

หลังจากที่สารทำงานขยายตัวแล้วและถูกลูกสูบดันให้ไหลกลับไปสู่กระบอกสูบอัดตัว ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการระบายความร้อนออกส่วนหนึ่งก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการอัดตัว โดยจะการระบายความร้อนนี้จะเป็นเพียงการลดพลังงานภายในของระบบลงโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ดังแสดงในสมการที่ 2.10 , 2.11 และ 2.12

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

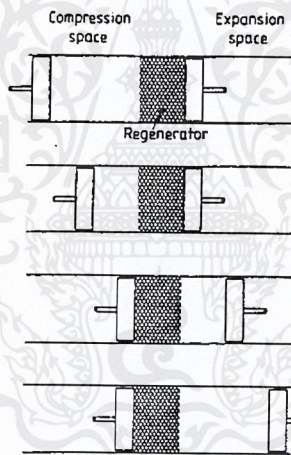
ดังนั้นเมื่อเราทำการรวมทุกขั้นตอนของวัฏจักรเราจะได้ตั้งสมการที่ 2.13 และ 2.14

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

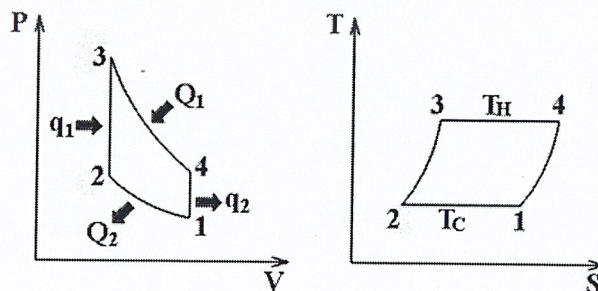
$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_c} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $W_{\text{net}}$  คือ งานสุทธิของวัฏจักร  
 $\eta_{\text{th}}$  คือ ประสิทธิภาพทางความร้อน

ซึ่งเราสามารถแสดงลักษณะขั้นตอนของแต่ละกระบวนการได้ตามรูปที่ 2.2 และในรูปที่ 2.3 นั้นได้แสดงกราฟความดันและปริมาตร กับกราฟอุณหภูมิและเอนโทรปี



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงลักษณะของลูกสูบในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรสเตอร์ลิง



รูปที่ 2.3 กราฟแผนภาพ P-V และ T-S ของวัฏจักรสเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ทฤษฎีของ Schmidt

### 2.3.1 ข้อสมมติฐานของทฤษฎี Schmidt

สมรรถนะของเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้จาก P-V diagram เมื่อปริมาตร, มวลของสารทำงานและอุณหภูมิหาได้ ดังนั้นความดันจึงสามารถคำนวณได้จากการใช้วิธีคิดแบบแก๊สอุดมคติ แสดงให้เห็นในสมการที่ 2.15

$$PV = mRT \quad (2.15)$$

ความดันเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้ตามข้อสมมติฐานดังนี้

1. ไม่มีการสูญเสียความดัน (Pressure loss) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchangers) และก็ไม่มีความแตกต่างของความดันภายใน (Internal pressure)
2. กระบวนการการขยายตัว (Expansion) และกระบวนการการอัดตัว (Compression) เป็นกระบวนการอุณหภูมิกงที่ (Isothermal)
3. สารทำงานเป็นแก๊สอุดมคติ (Ideal gas)
4. เป็น Perfect regeneration
5. ปริมาตรคงที่ของฝั่งขยายตัวยังคงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแก๊สที่ขยายตัว ( $T_E$ ) และ ปริมาตรคงที่ของฝั่งอัดตัวยังคงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแก๊สที่อัดตัว ( $T_C$ ) ตลอดวัฏจักร
6. อุณหภูมิของแก๊สในรีเจเนอเรเตอร์หาได้จากค่าเฉลี่ยจากอุณหภูมิแก๊สที่ขยายตัว ( $T_E$ ) และอุณหภูมิแก๊สที่อัดตัว ( $T_C$ )
7. ปริมาตรฝั่งขยายตัว ( $V_E$ ) และ ปริมาตรฝั่งที่อัดตัว ( $V_C$ ) เปลี่ยนเป็นแบบโคไซน์ (Sine curves)

### 2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการคำนวณรูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา ปริมาตรฝั่งขยายตัว ( $V_E$ ) จะบรรยายไว้ในสมการที่ 2.16 ซึ่งประกอบไปด้วย ปริมาตรช่วงซั๊กลูกสูบ (Swept volume) ของลูกสูบฝั่งขยายตัว ( $V_{SE}$ ) และปริมาตรศูนย์ตายบน ( $V_{DE}$ ) ภายใต้เงื่อนไขของสมมติฐานที่ 7

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + V_{DE} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรอัดตัว ( $V_C$ ) จะเห็นได้ในสมการที่ 2.17 ซึ่งประกอบไปด้วย ปริมาตรช่วงชักลูกสูบ (Swept volume) ของลูกสูบฝั่งอัดตัว ( $V_{SC}$ ) และปริมาตรศูนย์ตายบน ( $V_{DC}$ ) และมุมเฟสระหว่างลูกสูบ ( $dx$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.17

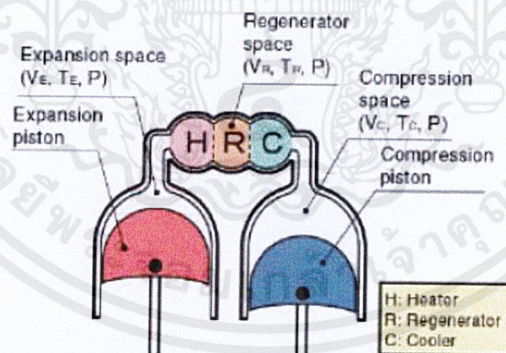
$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} \{1 - (\cos x - dx)\} + V_{DC} \quad (2.17)$$

ปริมาตรรวมทั้งหมดจะได้ดังสมการที่ 2.18

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (2.18)$$

จากข้อสมมติฐานที่ 1, 2 และ 3 มวลทั้งหมดของเครื่องยนต์ ( $m$ ) คำนวณจากการใช้ความดันเครื่องยนต์ ( $P$ ) แต่ละอุณหภูมิ ( $T$ ) แต่ละปริมาตร ( $V$ ) และค่าคงที่ของแก๊ส ( $R$ ) ดังสมการที่ 2.19

$$m = \frac{PV_E}{RT_E} + \frac{PV_R}{RT_R} + \frac{PV_C}{RT_C} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

## 2.4 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

กลไกของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาเป็นกลไกที่มีโครงสร้างของส่วนประกอบอย่างง่ายนั่นคือมีลูกสูบ 2 ลูก แยกอยู่กันคนละกระบอกเช่นเดียวกับกลไกแกมมา แต่ส่วนที่เป็นเอกลักษณ์คือ ลูกสูบทั้ง 2 จะทำหน้าที่เป็นดิสเพลสเซอร์ และลูกสูบกำลัง โดยเมื่อสารทำงานได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนทำให้สารทำงานภายในกระบอกสูบร้อนขยายตัวทำให้นดันลูกสูบด้านร้อนออกไป จากนั้นลูกสูบจะเคลื่อนที่กลับมาด้วยโมเมนตัมความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉื่อยของเพลลา และทำหน้าที่เป็นดิสเพลสเซอร์ไล่สารทำงานไปสู่ส่วนระบายความร้อน และเมื่อสารทำงานเข้าสู่ส่วนระบายความร้อน ลูกสูบด้านเย็นจะทำหน้าที่อัดสารทำงานให้มีความดันสูงสุดก่อนจะผลักดันงานนี้กลับไปรับความร้อนที่กระบอกสูบร้อนจนเป็นวัฏจักรของเครื่องยนต์ โดยงานที่ได้จากกลไกแอลฟานี้เกิดจากการขยายตัวของลูกสูบร้อน กลไกแอลฟานั้นสามารถสร้างอัตราการอัดได้เทียบเท่ากับกลไกเบตา แต่กลไกชนิดแอลฟานั้นมีขนาดเล็ก ซับซ้อนน้อยกว่า อีกทั้งส่วนด้านร้อน และด้านเย็นแยกกันอยู่คนละกระบอกเพื่อป้องกันการเกิดความร้อนสมดุลภายในเครื่องยนต์ (Heat balance)



รูปที่ 2.5 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟารูปแบบกระบอกสูบรูปตัววี

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟารูปแบบกระบอกสูบรูปตัววี

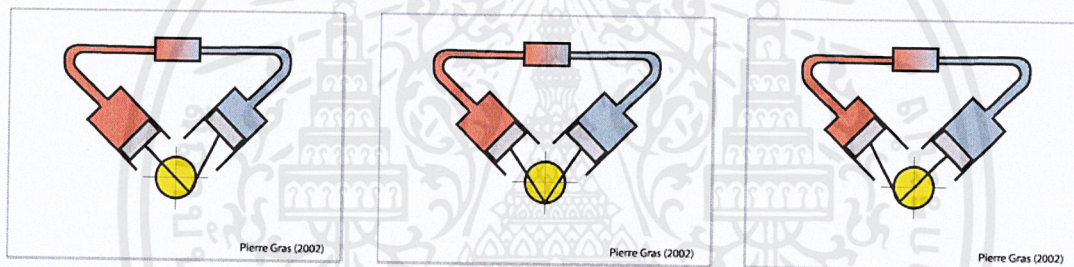
ชิ้นส่วน/ตัวแปร	ค่า/ชนิด
ชนิดของเครื่องยนต์	แอลฟา
สารทำงาน	อากาศ
รัศมีข้อเหวี่ยง	1.40 cm
ระยะสโตรก	2.8 cm
เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ	6 cm
ก้านลูกสูบ	4.5 cm
ความดันเริ่มต้น	101.325 kPa
อุณหภูมิส่วนรับความร้อน	923 K
อุณหภูมิรีเจนเนอเรเตอร์	590 K
อุณหภูมิส่วนระบายความร้อน	350 K
ปริมาตรส่วนรับความร้อน	16.7059 cm <sup>3</sup>
ปริมาตรรีเจนเนอเรเตอร์	16.4148 cm <sup>3</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรส่วนระบายความร้อน	7.60033 cm <sup>3</sup>
ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่	77.74291 cm <sup>3</sup>
ความดันเฉลี่ยของเครื่องยนต์	225596 kPa
ความเร็วรอบของเครื่องยนต์	400 RPM

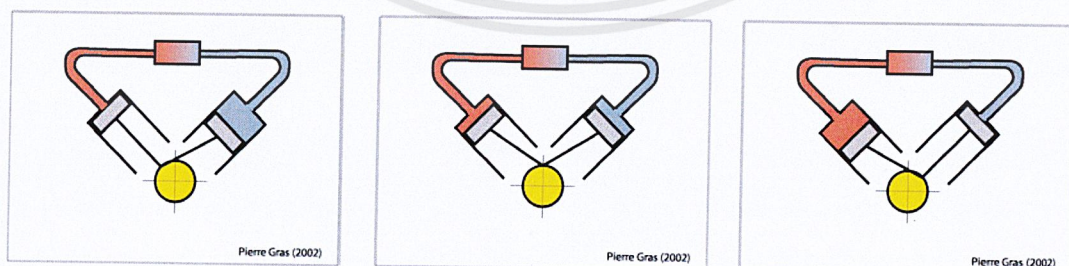
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟานี้จะสามารถแสดงจังหวะการเคลื่อนที่ของลูกสูบในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1-2 กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ ลูกสูบเย็นจะอยู่ในตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (Bottom dead center) และลูกสูบริ้อนจะขยายตัวไปอยู่ที่กลางกระบอกสูบริ้อน



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 1-2

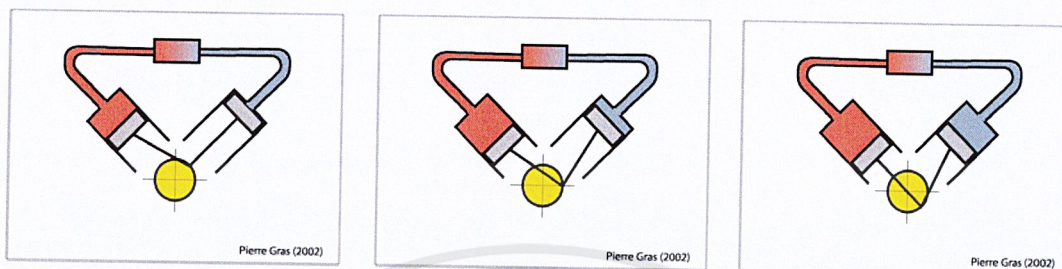
ขั้นตอนที่ 2-3 กระบวนการรับความร้อนแบบปริมาตรคงที่ ลูกสูบเย็นจะเคลื่อนที่ขึ้นจากตำแหน่งเดิมก่อนหน้า และลูกสูบริ้อนจะเคลื่อนที่ลงเล็กน้อยโดยที่ยังไม่มีงานเกิดขึ้น เพียงแต่รับความร้อนให้สารทำงานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 2-3

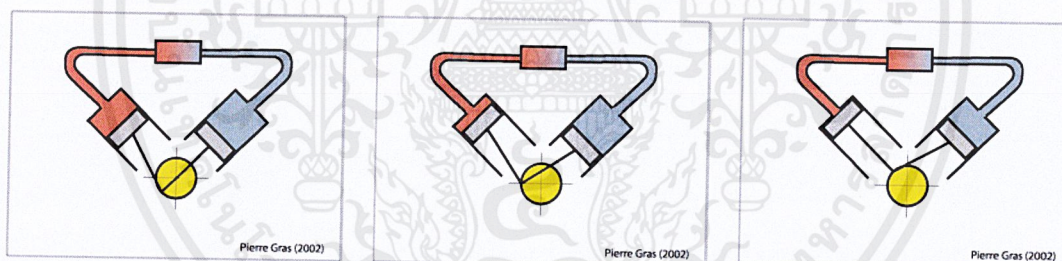
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3-4 กระบวนการขยายตัวแบบอุนหภูมิคงที่ คือขั้นตอนที่มิงงานเกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของลูกสูบร้อนโดยลูกสูบร้อนจะถูกสารทำงานที่มีพลังงานดันให้ลงมา ซึ่งในขณะเดียวกันลูกสูบเย็นก็จะเคลื่อนที่ลงมามากน้อยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 3-4

ขั้นตอนที่ 4-1 กระบวนการคายความร้อนแบบปริมาตรคงที่ ลูกสูบเย็นจะเคลื่อนที่กลับมาด้วยแรงเฉื่อยของเพลาค้อเหวี่ยงและผลึกสารทำงานออกจากกระบอกสูบร้อนไปยังกระบอกสูบเย็น โดยในขั้นตอนนี้เครื่องยนต์จะระบายความร้อนออกจากสารทำงานทำให้อุณหภูมิของสารทำงานลดลงแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของปริมาตร



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของลูกสูบในขั้นตอนที่ 4-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

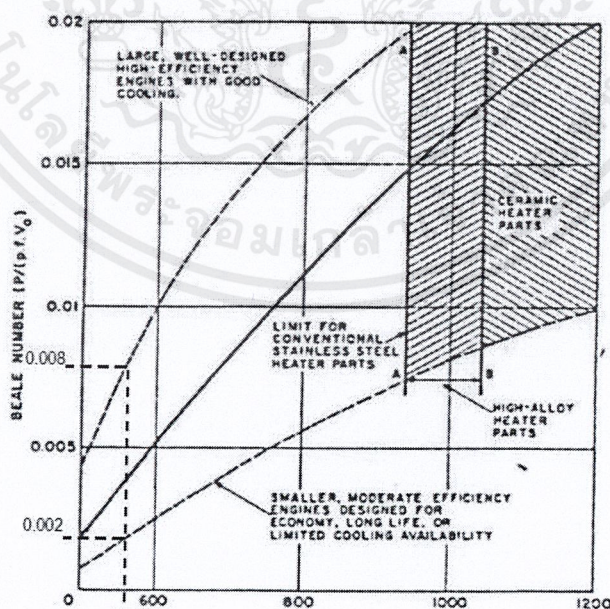
## การออกแบบ และวิเคราะห์เครื่องยนต์ต้นแบบ

### 3.1 กำลังของเครื่องยนต์เชิงปฏิบัติ Beale Number ( $B_n$ )

กำลังของเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการ Beale Number โดยหลักการนี้ได้ทำการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขึ้นมา จากนั้นทำการเก็บค่าเชิงสถิติในรูปตัวแปรที่ชื่อว่า Beale Number ( $B_n$ ) ทำให้กำลังที่คิดได้จากวิธีนี้มีแนวโน้มที่จะได้กำลังของเครื่องยนต์เชิงปฏิบัติมากกว่าจากวิธี Ideal และ Schmidt โดยจะใช้ค่าที่ได้จากวิธีนี้เป็นค่ากำลังที่คาดหวังว่าจะได้ ซึ่งกำลังของเครื่องยนต์สามารถคิดได้จากสมการที่ (4.1) ดังนี้

$$P = B_n p f V_0 \quad (3.1)$$

- โดยที่
- P คือ กำลังเครื่องยนต์
  - $B_n$  คือ ค่า Beale Number
  - p คือ ความดันเฉลี่ยต่อหนึ่งรอบ
  - f คือ รอบความถี่ หรือความเร็วเครื่องยนต์
  - $V_0$  คือ ปริมาตรการเคลื่อนที่ของลูกสูบ



รูปที่ 3.1 กราฟ Beale Number

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ Beale Number ที่อุณหภูมิ 923 องศาเซลเซียส และเลือกใช้กราฟเส้นกลางสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีประสิทธิภาพปานกลาง จะมีค่า

$$B_n \approx 0.0144$$

มีค่าความดันเฉลี่ยต่อหนึ่งรอบการทำงานเท่ากับความดันบรรยากาศ จะมีค่า

$$p = 1.01325 \text{ bar}$$

มีปริมาตรการเคลื่อนที่ของลูกสูบเท่ากับ

$$V_0 = \pi \frac{d^2}{4} s = \pi \times \frac{43.5^2}{4} \times 28 \text{ mm}^3$$

$$V_0 = 41.61275 \text{ cm}^3$$

ความถี่ของเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที จะมีค่า

$$f = 6.67 \text{ Hz}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.1

$$P = B_n p f V_0$$

$$P = 0.0144 \times 1.01325 \times 6.67 \times 41.61275$$

$$P = 4.05 \text{ Watt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 10 เปอร์เซ็นต์ จากสมการที่ 3.2

$$\eta_{th} = \frac{\text{Power}}{Q_{in}} \quad (3.2)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.2 จะได้

$$Q_{in} = \frac{4.05}{0.1} = 40.5 \text{ Watt}$$

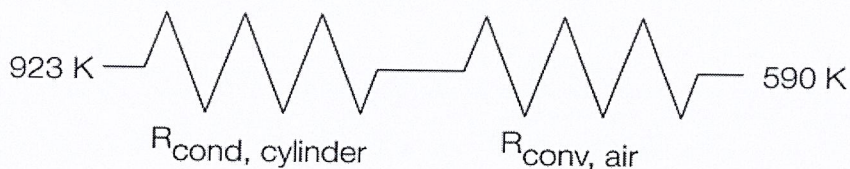
### 3.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

#### 3.2.1 ด้านร้อน (Heater)

กระบอกสูบด้านร้อนที่ใช้มีรูปทรงเป็นโดม เนื่องจากมีการออกแบบคำนวณที่ง่าย และตรงยอดโดมยังช่วยกระจายความเค้นจุด (Local stress) ที่เกิดขึ้นบริเวณขอบ อีกทั้งยังเพิ่มพื้นที่ในการรับความร้อน ในส่วนของการออกแบบกระบอกสูบด้านร้อนจะคิดว่าความร้อนจากเปลวไฟถูกส่งผ่านจากผนังกระบอกสูบด้านร้อนไปสู่อากาศซึ่งเป็นสารทำงานโดยมีลำดับการถ่ายเทความร้อนดังนี้

1. ความร้อนจากผนังด้านนอกของกระบอกสูบด้านร้อนถูกนำความร้อนเข้าสู่ผนังกระบอกด้านในของกระบอกสูบด้านร้อน โดยมีกระบอกสูบเป็นตัวต้านทานความร้อน
2. ความร้อนจากผนังด้านในของกระบอกสูบด้านร้อนถูกพาความร้อนเข้าสู่สารทำงาน โดยมีอากาศเป็นตัวต้านทานความร้อน

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปวงจรความร้อนได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 วงจรความร้อนของกระบอกสูบด้านร้อน

โดยที่ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$\dot{Q}_{in} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond,cylinder} + R_{conv,air}} \quad (3.3)$$

โดยที่  $T_1$  คือ อุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกของกระบอกสูบ  
 $T_2$  คือ อุณหภูมิของสารทำงานในกระบอกสูบ

3.2.1.1 ความร้อนจากผนังด้านนอกของกระบอกสูบด้านร้อนถูกนำความร้อนเข้าสู่ผนังด้านใน จากด้านข้างโดยมีวิธีคำนวณดังนี้

ค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$R_{cond,cylinder} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi kL} \quad (3.4)$$

โดยที่  $R$  คือ Thermal Resistance  
 $r_1$  คือ รัศมี Heating dome ด้านใน  
 $r_2$  คือ รัศมี Heating dome ด้านนอก  
 $L$  คือ ความยาวของกระบอกสูบ  
 $k$  คือ Thermal Conductivity

โดยที่ค่า  $k$  ที่ได้จากรายคุณสมบัติของ Stainless steel AISI 304 มีค่า

$$k = 24.322 \quad : \text{Stainless steel AISI 304 @923 K}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.4

$$R_{cond,cylinder} = \frac{\ln\left(\frac{47.5}{48.5}\right)}{2\pi(24.322)L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$R_{\text{cond, cylinder}} = \frac{5.756 \times 10^{-4}}{L}$$

3.2.1.2 ความร้อนจากผนังด้านในของกระบอกสูบด้านร้อน ถูกพาความร้อนเข้าสู่สารทำงาน คุณสมบัติต่างๆที่ใช้ในการคำนวณจะเลือกใช้อุณหภูมิเฉลี่ย (Average Temperature)

$$T_{\text{avg}} = \frac{T_s + T_e}{2}$$

โดยที่  $T_s$  คือ อุณหภูมิที่พื้นผิวกระบอกสูบด้านร้อน  
 $T_e$  คือ อุณหภูมิของสารทำงาน

ซึ่งเป็นการพาความร้อนแบบ Natural convection ที่เป็น Annular tube ที่  $T_{\text{avg}}$  จะได้

$$T_{\text{avg}} = \frac{923 + 590}{2} = 756.5 \text{ K}$$

ค่าความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$R_{\text{conv, air}} = \frac{1}{hA_s} \quad (3.5)$$

โดยที่  $h$  คือ heat transfer coefficient  
 $A_s$  คือ พื้นที่ในการพาความร้อน

หาค่า heat transfer coefficient ได้จากสมการที่ (3.6)

$$h = \frac{\text{Nu}_0 k}{D_h} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $Nu_o$  คือ ค่า Nusselt number ของการพาความร้อนแบบวงแหวน  
 $D_h$  คือ ค่าความต่างระหว่างเส้นรอบวงด้านนอกและด้านในของวงแหวน

โดยที่ค่า  $k$  ที่ได้จกตารางคุณสมบัติของอากาศมีค่า

$$k = 0.054816 \quad : \text{Air @ 756.5 K}$$

หาค่า  $Nu_o$  ได้จกตารางค่า Nusselt number ของการพาความร้อนแบบวงแหวน

ตารางที่ 3.1 ตาราง  $Nu_o$  สำหรับการรับความร้อนแบบวงแหวน

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

หาค่า  $Nu_o$  จกตารางที่ 3.1

$$\frac{D_i}{D_o} = \frac{40.5}{43.5} = 0.931$$

จกตารางที่ 3.1 จะได้

$$Nu_o = 4.801$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า  $D_h$  จากสมการที่ 3.7

$$D_h = D_{out} - D_{in} \quad (3.7)$$

แทนค่าในสมการที่ (3.7)

$$D_h = 0.0435 - 0.0405$$

$$D_h = 0.003 \text{ m}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.6

$$h = \frac{Nu_0 k}{D_h}$$

$$h = \frac{4.801 \times 0.054816}{0.003}$$

$$h = 87.7239$$

หาค่า  $A_s$  จาก

$$A_s = \pi DL = \pi \times 0.04045 \times L$$

$$A_s = 0.127235L$$

จากสมการที่ 3.5

$$R_{conv,air} = \frac{1}{hA_s}$$

แทนค่าลงในสมการ 3.5 จะได้

$$R_{conv,air} = \frac{1}{87.7239 \times 0.127235L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{\text{conv,air}} = \frac{0.104525536}{L}$$

ค่าความต้านทานความร้อนรวมของกระบอกสูบด้านร้อนจะเท่ากับ

$$R_{\text{total}} = R_{\text{cond,total}} + R_{\text{conv,total}}$$

$$R_{\text{total}} = \frac{5.756 \times 10^{-4}}{L} + \frac{0.104525536}{L}$$

ได้  $\dot{Q}_{\text{in}}$  จากการกำหนด ประสิทธิภาพ และกำลังที่ได้จาก Beale Number จะได้

$$\dot{Q}_{\text{in}} = 40.5 \text{ Watt}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.3 จะได้

$$\dot{Q}_{\text{in}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{total}}} = 40.5 \text{ Watt}$$

$$40.5 = \frac{923 - 590}{\frac{5.756 \times 10^{-4}}{L} + \frac{0.104525536}{L}}$$

$$L = 0.0127826 \text{ m}$$

ซึ่งค่า L ที่ได้คือความยาวของกระบอกที่น้อยที่สุดที่ทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ ฉะนั้นจึงเลือกใช้ความยาว 0.060 เมตร เพื่อเพิ่มพื้นที่รับความร้อนรองรับต่อการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอกและปัจจัยอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

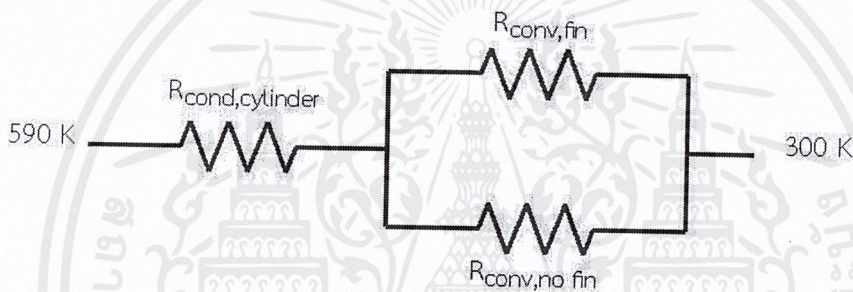
### 3.2.2 ด้านเย็น (Cooler)

ในส่วนของ Cooler เลือกใช้ครีปเป็นตัวระบายความร้อน โดยมีอากาศภายนอกเป็นสารหล่อเย็น ดังนั้นทำให้ไม่จำเป็นต้องเสียงานให้กับระบบทำความเย็น และช่วยลดอุปกรณ์รวมของเครื่องยนต์อีกด้วย โดยมี การถ่ายเทความร้อนดังนี้

1. ความร้อนจากพื้นผิวด้านในของกระบอกสูบด้านเย็นถูกนำความร้อนมายังผิวด้านนอกของ กระบอกสูบ

2. ความร้อนจากผิวด้านนอกของทรงกระบอกถูกพาความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมโดยครีปและพื้นที่ ของกระบอกสูบที่ไม่มีครีป

ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรความร้อนได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 วงจรความร้อนของกระบอกสูบด้านเย็น

โดยที่ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทคำนวณได้จากสมการที่ 3.8

$$Q_{\text{out}} = \frac{T_r - T_{\infty}}{R_{\text{total}}} \quad (3.8)$$

โดยที่  $T_r$  คือ อุณหภูมิของสารทำงานภายในกระบอกสูบด้านเย็น

$T_{\infty}$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

#### 3.2.2.1 ความร้อนจากผิวด้านในของกระบอกสูบถูกนำความร้อนมายังผิวด้านนอกของกระบอก

สูบ

ค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$R_{\text{cond, cylinder}} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi kL}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.4 จะได้

$$R_{\text{cond, cylinder}} = \frac{\ln\left(\frac{65}{60}\right)}{2\pi(186)(0.057)}$$

โดยที่ค่า k ที่ได้จากรายคุณสมบัติของ Aluminum alloy 7075 – T6 มีค่า

$$k = 186 \quad : \quad \text{Aluminum alloy 7075 – T6 @ 590 K}$$

จะได้

$$R_{\text{cond, cylinder}} = 1.2016 \times 10^{-3}$$

### 3.2.2.2 ความร้อนจากผิวด้านนอกของกระบอกสูบถูกพาความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยครีบ

ค่าความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนคำนวณได้จากสมการ 3.9

$$R_{\text{conv, fin}} = \frac{1}{hA_s} \quad (3.9)$$

จะหาพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนได้จากสมการที่ 3.10

$$A_s = 2n\pi(r_2^2 - r_1^2) \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $n$  คือ จำนวนครีบ แทนค่าลงในสมการ 3.10 จะได้

$$A_s = 2(12)\pi(0.0525^2 - 0.0325^2)$$

$$A_s = 0.1282 \text{ m}^2$$

ทำการคำนวณแบบ Natural Convection โดยหาค่า Rayleigh number จากสมการ

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} Pr \quad (3.11)$$

โดยที่	$Ra_D$	คือ Rayleigh number
	$g$	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
	$\beta$	คือ coefficient of volume expansion
	$T_s$	คือ อุณหภูมิที่ผิวระบอบกสูบ
	$T_\infty$	คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม
	$Pr$	คือ Prandtl number
	$\nu$	คือ kinematic viscosity of the fluid

ซึ่งจะหาค่า heat transfer coefficient ได้จากสมการ 3.12

$$h = \frac{Nuk}{D} \quad (3.12)$$

และเลือกใช้คุณสมบัติต่างๆที่ใช้ในการคำนวณโดยเลือกใช้อุณหภูมิเฉลี่ย

$$T_{avg} = \frac{350 - 300}{2} = 325 \text{ K}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $T_{\text{avg}} = 325 \text{ K}$  จะได้ค่าจากตารางคุณสมบัติของอากาศ

$$k = 0.027496 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$\text{Pr} = 0.72228$$

$$\nu = 1.8176 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\beta = \frac{1}{325} \text{ 1/K}$$

แทนค่าจะได้ในสมการที่ 3.11

$$\text{Ra}_D = \frac{9.81 \left( \frac{1}{325} \right) (350 - 300) 0.02^3}{(1.8176 \times 10^{-5})^2} (0.72228)$$

$$\text{Ra}_D = 2.6397 \times 10^4$$

ซึ่งถ้าค่า  $\text{Ra}_D \leq 10^{12}$  จะได้ค่า Nusselt Number จากสมการที่ 3.13

$$\text{Nu} = \left[ 0.6 + \frac{0.387 \text{Ra}_D^{1/6}}{[1 + (0.559/\text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \right]^2 \quad (3.13)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 3.13 จะได้

$$\text{Nu} = \left[ 0.6 + \frac{0.387(2.6397 \times 10^4)^{1/6}}{[1 + (0.559/(0.72228))^{9/16}]^{8/27}} \right]^2$$

$$\text{Nu} = 3.08154$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะหาค่า heat transfer coefficient ได้จากการแทนค่าในสมการที่ 3.12

$$h = \frac{Nu_k}{D}$$

$$h = \frac{Nu_k}{D} = \frac{3.08154 \times 0.027496}{0.039}$$

$$h = 4.2365012$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าความต้านทานความร้อนแทนค่าในสมการที่ 3.9

$$R_{\text{conv, fin}} = \frac{1}{hA_s}$$

$$R_{\text{conv, fin}} = \frac{1}{4.2365012 \times 0.1282}$$

$$R_{\text{conv, fin}} = 1.8412$$

3.2.2.3 ความร้อนจากผิวด้านนอกของกระบอกสูบถูกพาความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมจาก  
กระบอกสูบส่วนที่ไม่มีครีบริบ

ค่าความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 3.14

$$R_{\text{conv, no fin}} = \frac{1}{hA_s} \quad (3.14)$$

จะหาพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนที่ไม่มีครีบริบได้จากสมการที่ 3.15

$$A_s = \pi DL \quad (3.15)$$

$$A_s = \pi(0.065)(0.17 + (0.002 \times 11))$$

$$A_s = 7.96394 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $T_{avg} = 325 \text{ K}$  จะหาค่า heat transfer coefficient ได้จากสมการที่ 3.12

$$h = \frac{Nu_k}{D}$$

หาค่า Rayleigh number จากสมการที่ 3.11

$$Ra_D = \frac{9.81\left(\frac{1}{325}\right)(350 - 300)(0.039)^3}{(1.8176 \times 10^{-5})^2} (0.72228)$$

$$Ra_D = 1.9573 \times 10^5$$

และหาค่า Nusselt Number จากสมการที่ 3.13

$$Nu = \left[ 0.6 + \frac{0.387(1.9573 \times 10^5)^{1/6}}{[1 + (0.559/(0.72228))^{9/16}]^{8/27}} \right]^2$$

$$Nu = 6.00899$$

จะได้ค่า heat transfer coefficient จากการแทนค่าในสมการที่ 3.12

$$h = \frac{Nu_k}{D} = \frac{6.00899 \times 0.027496}{0.039}$$

$$h = 4.2365$$

จะได้ค่าความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 3.14

$$R_{conv, no fin} = \frac{1}{hA_s}$$

$$R_{conv, no fin} = \frac{1}{4.2365 \times 7.96394 \times 10^{-3}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{\text{conv,no fin}} = 29.6391$$

ค่าความต้านทานความร้อนรวมของกระบอกสูบด้านเย็นที่ถ่ายเทโดยครีบจะหาได้จากสมการที่ 3.16

$$\frac{1}{R_{\text{conv,total}}} = \frac{1}{R_{\text{conv,fin}}} + \frac{1}{R_{\text{conv,no fin}}} \quad (3.16)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.16 จะได้

$$\frac{1}{R_{\text{conv,total}}} = \frac{1}{1.8412} + \frac{1}{29.6391}$$

$$R_{\text{conv,total}} = 1.7335$$

เพราะฉะนั้น ค่าความต้านทานความร้อนรวมของกระบอกสูบด้านเย็นทั้งหมดจะหาได้จาก

$$R_{\text{total}} = R_{\text{cond,total}} + R_{\text{conv,total}}$$

$$R_{\text{total}} = (1.2016 \times 10^{-3}) + 1.7335$$

$$R_{\text{total}} = 1.7347$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.8 หาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเททางกระบอกสูบด้านเย็นจะมีค่า

$$\dot{Q}_{\text{out}} = \frac{T_r - T_{\infty}}{R_{\text{total}}}$$

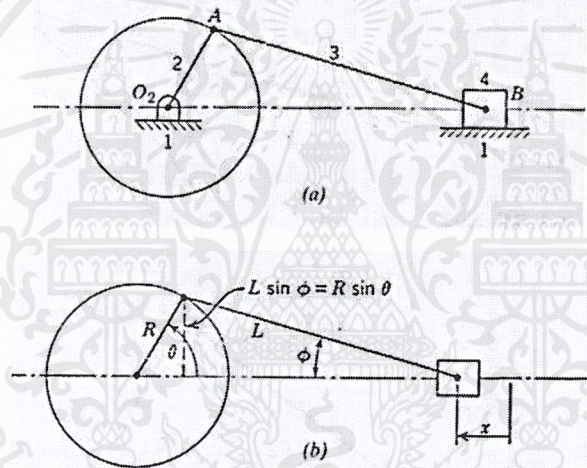
$$\dot{Q}_{\text{out}} = \frac{590 - 300}{1.7347}$$

$$\dot{Q}_{\text{out}} = 167.1759 \text{ Watt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่าความร้อนที่ต้องขับออกเท่ากับ 167.176 วัตต์ ซึ่งมากกว่าความร้อนที่ป้อนเข้ามีค่า 40.5 วัตต์จึงเลือกขับความร้อนออกมากกว่าที่นำความร้อนเข้าเนื่องจากที่ผ่านมาการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยมีการใช้ครีบบเป็นตัวระบายความร้อนโดยมีอากาศเป็นตัวพาความร้อนนั้นเมื่อคำนวณตามแบบที่เคยคำนวณแล้วนำมาทดสอบพบว่าเครื่องยนต์ระบายความร้อนไม่ทัน ทำให้เกิด Heat balance เราจึงทำการสร้างครีบบที่มีจำนวนมากๆเพื่อการระบายความร้อนที่สูงกว่า อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงสมดุลของเครื่องยนต์ด้วย ดังนั้นความสูงของ heater และ cooler จะมีความสูงที่ใกล้เคียงกัน

### 3.3 กลไกการทำงานของสไลเดอร์แคร็ง (Slider-crank)



รูปที่ 3.4 กลไกของสไลเดอร์แคร็ง

- จากรูปที่ 3.4
- Link 1 คือ fixed link (โครงเครื่อง)
  - Link 2 คือ crank
  - Link 3 คือ connecting rod
  - Link 4 คือ piston

จากรูปที่ 3.4 หาระยะ  $x$  ได้จากสมการที่ 3.17

$$x = R + L - R \cos \theta - L \cos \phi \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการที่ 3.17 จะได้

$$x = R(1 - \cos \theta) + L(1 - \cos \phi)$$

$$x = R(1 - \cos \theta) + L \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sin^2 \theta} \right] \quad (3.18)$$

### 3.4. การออกแบบ Flywheel

โดยจะคำนวณที่ความเร็วรอบการทำงานของเครื่องยนต์เท่ากับ 400 รอบต่อนาที การคำนวณขนาดของล้อช่วยแรงจะทำโดยการหาขนาดโมเมนต์ความเฉื่อยที่สะสมพลังงานไว้ระหว่างการหมุน โดยพลังงานที่ล้อช่วยแรงต้องสะสมในหนึ่งรอบวัฏจักรนั้น มีดังนี้

$$E_2 - E_1 = \frac{I}{2} (\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 + \omega_1) \quad (3.19)$$

โดยที่

$$E_2 - E_1 = 5.05683 \text{ J}$$

และ

$$C_s = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega} \quad (3.20)$$

และ

$$\omega = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} \quad (3.21)$$

จัดรูปจะได้

$$I = \frac{2(E_2 - E_1)}{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 + \omega_1)} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะได้ขนาดโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อช่วยแรงนี้เท่ากับ 0.02882 กิโลกรัมตารางเมตร ซึ่งเป็นค่าที่อย่างน้อยทำให้เพียงพอต่อการทำงาน ซึ่งในทางปฏิบัติจะนำค่าที่ได้จากการออกแบบนี้ไปใช้ทำการทดสอบปรับเปลี่ยนขนาดเนื่องการสูญเสียกำลังไปกับความเสียดทานหรือการสิ้นสະเทือนและปัจจัยอื่นๆ จนกระทั่งได้ขนาดที่เหมาะสม

### 3.5 การวิเคราะห์เครื่องยนต์ต้นแบบ

ทำการวิเคราะห์โดยแทนค่าที่ได้กำหนดในตารางที่ 2.1 ลงในสมการที่ 2.15 ถึง 2.19 และเนื่องจากสมการที่ใช้นั้นมีความซับซ้อนจึงใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณเพื่อทำการวิเคราะห์วัฏจักรของเครื่องยนต์ จากนั้นได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรของเครื่องยนต์ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของลูกสูบร้อนกับลูกสูบเย็น และจึงได้สรุปค่าที่ได้ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

โค้ด MATLAB วิเคราะห์ความดันกับปริมาตร

```
>> x=[0:360]; %crank angle
>> dx = 90; %Phase Angle
>> Th=923; %maximum temp
>> Tc=350; %min temp
>> Tr=(Th+Tc)/2; %regenerator temp
>> Rair=287; %air cons
>> Pmean = 1.013e5; %mean Pressure,ambient
>> Vde=0.00001670593; %V dead volume heater,piston
>> Vdc=0.00000480669+0.00000760033; %V dead volume cooler,piston
>> Vr=0.00000223403+0.00000763407; %regenerator's volume
>> Vesm=0.0000771171444; %Expansion Volume
>> Vcsm=0.0000771681349; %Compression Volume
>> Ve=Vesm*(1-cosd(x))/2+Vde;
>> Vc=Vcsm*(1-cosd(x-dx))/2+Vdc;
>> Vtotalsm=Ve+Vc+Vr ;
>> t=Tc/Th ; %temperature ratio
>> v=Vcsm/Vesm; %swept volume ratio
>> Xde=Vde/Vesm; %Expansion dead Volume ratio
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

>> Xdc=Vdc/Vcsm; %Compression dead Volume ratio
>> Xr=Vr/Vesm;%regenerator dead Volume ratio
>> a=atand((v*sind(dx))/(t*cosd(dx)));
>> S=t+2*t*Xde+(4*t*Xr)/(1+t)+v+2*Xdc ;
>> B = sqrt(t^2+2*t*v*cosd(dx)+v^2);
>> c = B/S;
>> p = Pmean*sqrt(S^2-B^2)/(S-B*cosd(x-a));
>> plot(Vtotalsm,p);
>> title ('P-V diagram')
>> xlabel ('Volume(mm.^3)')
>> ylabel ('Pressure(pa)')
>> Wesm=trapz(Ve,p) %work get
>> We = Pmean*Vesm*pi*c*sind(a)/(1+sqrt(1+c^2))
>> Wcsm=trapz(Vc,p) %work give
>> Wc = -Pmean*Vesm*pi*c*sind(a)*t/(1+sqrt(1+c^2))
>> Wnet=trapz(Vtotalsm,p) %work net
>> Wnet = Pmean*Vesm*pi*c*sind(a)*(1-t)/(1+sqrt(1+c^2))
>> f=400/60; %frequency of engine
>> Powersm=Wnet*f %power of engine
>> eff=Wnet*100/We

```

โค้ด MATLAB วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของลูกสูบร้อนกับลูกสูบเย็น

```

>> seta=[0:360]; %crank angle
>> a=0.014; %crank rad
>> r=0.045; %connecting rod length
>> hpiston=0.13; %piston height
>> pp=0.0125; %pin piston
>> Tmax=923; %maximum temp
>> Tregen=590; %regenerator temp

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

>> Tmin=350; %min temp
>> Rair=287; %air cons
>> Vheater=0.000053; %heater's volume
>> Vregen=0.000012; %regenerator's volume
>> Vcooler=0.000043; %cooler's volume
>> phi=90
>> 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)));
>> xc=r+a-(a*sind(seta)+sqrt(r.^2-(a.^2*cosd(seta).^2)));
>> B=0.0524; %Bore
>> S=0.06; %stroke
>> Ae=(3.14159265359*B.^2)/4; %area of hot piston
>> Ac=Ae; %area of cold piston
>> Vde=0; %Vhlost
>> Ve=Ae*(max(Xe)-Xe); %expansion V
>> Vdc=0; %Vclost
>> Vc=Ac*(max(Xc)-Xc) %compression V
>> Vrr=Vregen+Vde+Vdc
>> Vtotal=Ve+Vc+Vrr+Vheater+Vcooler
>> n=((Ve/Tmax)+(Vheater/Tmax)+(Vrr/Tregen)+(Vc/Tmin)+(Vcooler/Tmin)).^-1
>> mair=0.0001615; %mass of air
>> p=mair*Rair*n; %pressure
>> We=trapz(Ve,p);
>> Wc=trapz(Vc,p);
>> Wnet=trapz(Vtotal,p);
>> f=14.2;
>> power=Wnet*f;

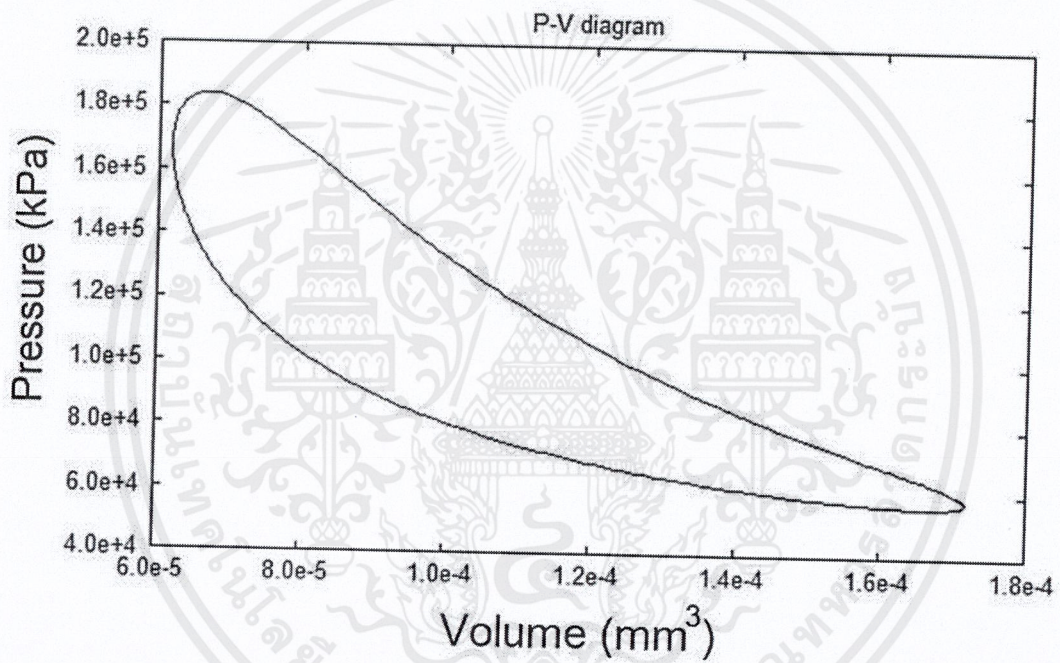
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

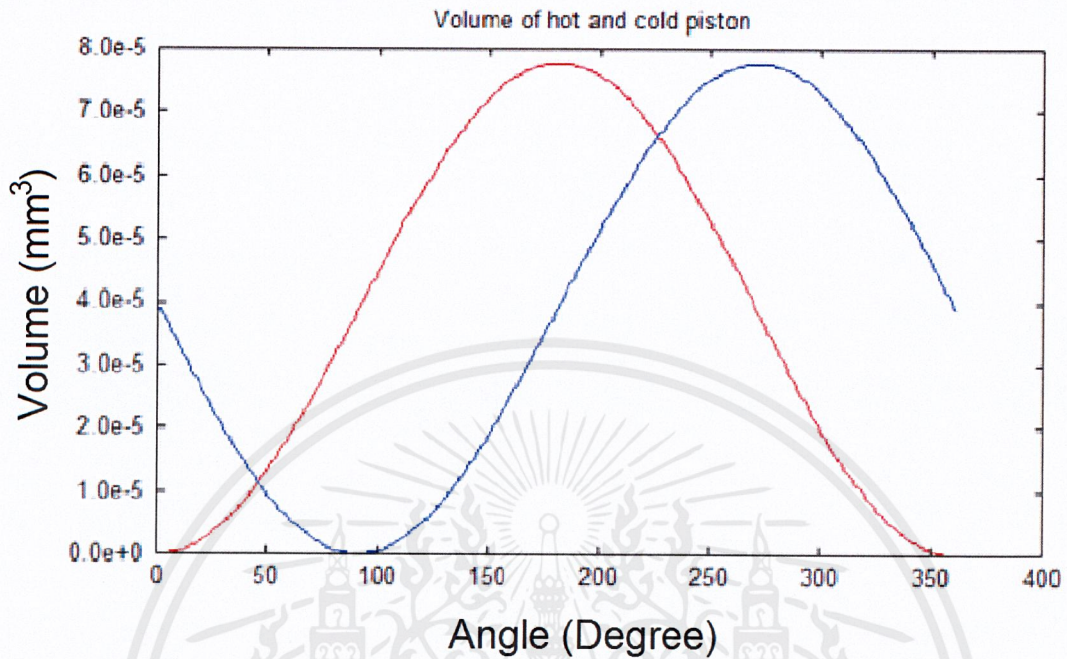
>> eff=Wnet*100/We;
>> plot(seta,xc,'r',seta,xe,'b')
>> xlabel('Angle(degree)')
>> ylabel('displacement(m)')
>> title('displacement of cold and hot piston')

```



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของลูกสูบร้อน (สีฟ้า) และลูกสูบเย็น (สีแดง)

ตารางที่ 3.2 ค่าที่ได้จากวัฏจักร Schmidt

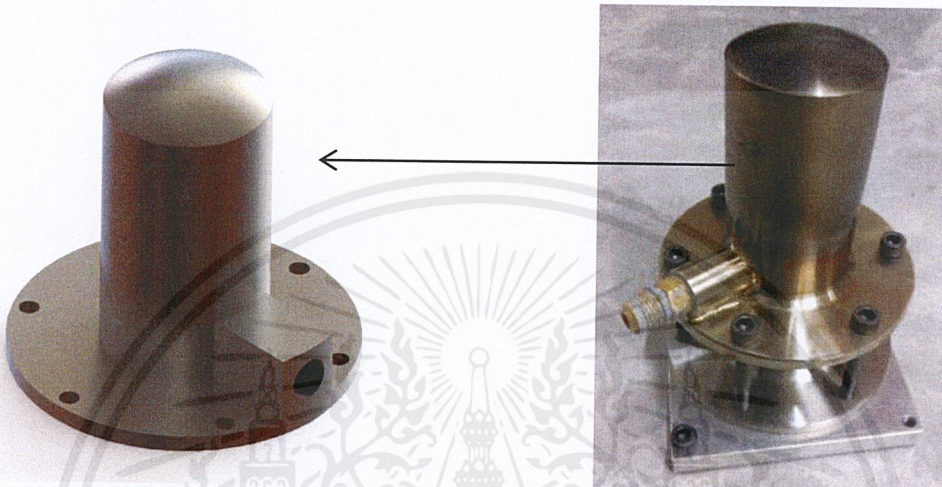
ค่าที่ได้จากวัฏจักร Schmidt	ขนาด	หน่วย
1. ความดันสูงสุด ( $P_{max}$ )	184	kPa
2. ความดันต่ำสุด ( $P_{min}$ )	55.8	kPa
3. ความร้อนที่ป้อนเข้า ( $Q_{in}$ )	6.63	J
4. ความร้อนที่เอาออก ( $Q_{out}$ )	-2.51	J
5. งานสุทธิของวัฏจักร ( $W_{net}$ )	3.56	J
6. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์	400	RPM
7. กำลังของเครื่องยนต์	23.7	Watts
8. ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์	62.1	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ส่วนประกอบของเครื่องยนต์

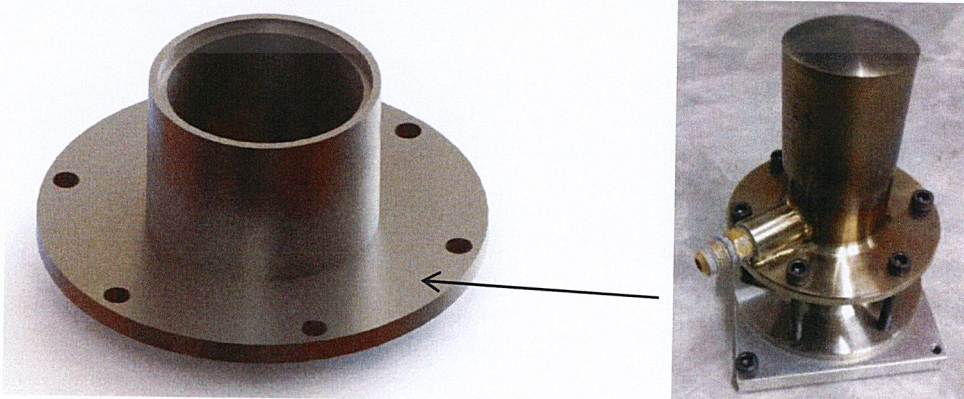
### 4.1 โดมรับความร้อน



รูปที่ 4.1 โดมรับความร้อน

จากรูปที่ 4.1 โดมรับความร้อนเป็นชิ้นส่วนสำหรับรับพลังงานความร้อนจึงต้องมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการรับความร้อนที่ความดันสูงและอุณหภูมิสูง ซึ่งในการรับความร้อนที่อุณหภูมิสูงโลหะจะมีการขยายตัวซึ่งจะส่งผลให้ในวัสดุเกิดความเค้นสะสม (Residual Stress) จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรง รวมถึงทนต่อความล้าเนื่องจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้ดี ดังนั้นวัสดุที่ใช้จึงเลือก Stainless Steel โดยได้ทำการออกแบบเป็นรูปทรงโดมเพื่อให้มีพื้นที่รับความร้อนมากกว่าพื้นที่ทรงกระบอก อีกทั้งมีความแข็งแรงทนต่อความดันและช่วยลดการสูญเสียความดันจากการไหล

### 4.2 ฐานโดมรับความร้อน



รูปที่ 4.2 ฐานโดมรับความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 ฐานโดมรับความร้อนนี้ผลิตโดยใช้วัสดุ Stainless Steel ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนที่รองรับน้ำหนักของโดมรับความร้อน

### 4.3 รีเจนเนอเรเตอร์



รูปที่ 4.3 รีเจนเนอเรเตอร์

จากรูปที่ 4.3 รีเจนเนอเรเตอร์นี้ผลิตโดยใช้ทองเหลือง โดยที่ภายในรีเจนเนอเรเตอร์มีเส้นลวดจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสขณะที่สารทำงานถูกส่งผ่านทำให้สามารถเก็บความร้อนไว้ได้ชั่วคราว โดยเส้นลวดเหล่านี้จะดูดกลืนความร้อนอย่างรวดเร็ว และส่งต่อสารทำงานไปยังส่วนระบายความร้อน

### 4.4 ส่วนระบายความร้อน



รูปที่ 4.4 ส่วนระบายความร้อน

จากรูปที่ 4.4 ส่วนระบายความร้อนเป็นชิ้นส่วนที่รับความร้อนของสารทำงานและระบายออกสู่ภายนอก อาศัยการระบายความร้อนด้วยครีบกัมจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อน โดยวัสดุที่ใช้เป็น Aluminum Alloys 7075-T6 (SN) เนื่องจากมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

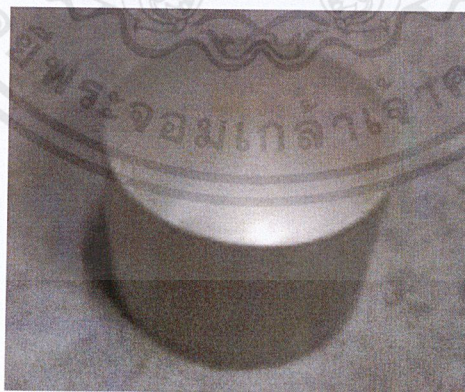
#### 4.5 ลูกสูบด้านร้อน



รูปที่ 4.5 ลูกสูบด้านร้อน

จากรูปที่ 4.5 ลูกสูบด้านร้อนส่วนล่างจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับโดมรับความร้อนเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารทำงาน และลดการเกิด shuttle heat อีกทั้งยังช่วยลด dead volume ของเครื่องยนต์ ลูกสูบด้านร้อนจะกลวงข้างใน เพื่อลดน้ำหนักของลูกสูบ โดยลูกสูบด้านร้อนส่วนบนจะมีขนาดเล็กกว่าลูกสูบด้านร้อนส่วนล่างเล็กน้อย เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสี และมีช่องว่างในการเคลื่อนที่ของสารทำงานระหว่างลูกสูบด้านร้อนส่วนบนและโดมรับความร้อน โดยลูกสูบด้านร้อน จำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุที่มีความทนความร้อน เนื่องจากจะอยู่ภายในโดมรับความร้อนซึ่งรับความร้อนมาโดยตรง ดังนั้นจึงเลือกใช้วัสดุ Stainless Steel

#### 4.6 ลูกสูบด้านเย็น

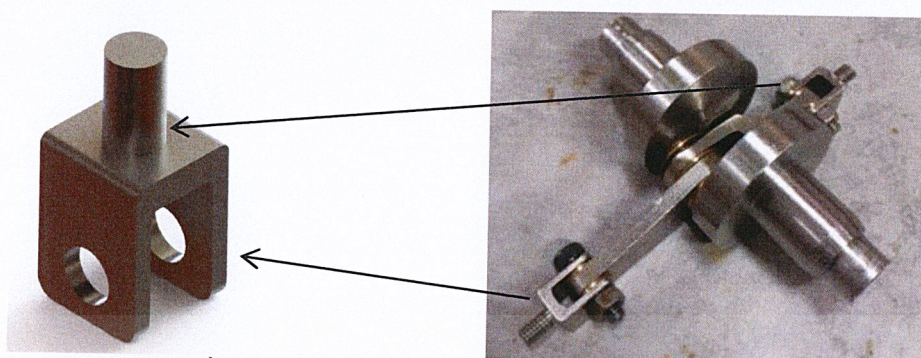


รูปที่ 4.6 ลูกสูบด้านเย็น

จากรูปที่ 4.6 ลูกสูบด้านเย็นนี้ผลิตโดยใช้วัสดุ Aluminum Alloys 7075-T6 (SN) ซึ่งเป็นวัสดุเดียวกันกับส่วนระบายความร้อน โดยจะคล้ายกับลูกสูบด้านร้อนเช่น ข้างในจะกลวงเพื่อลดน้ำหนักลูกสูบเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

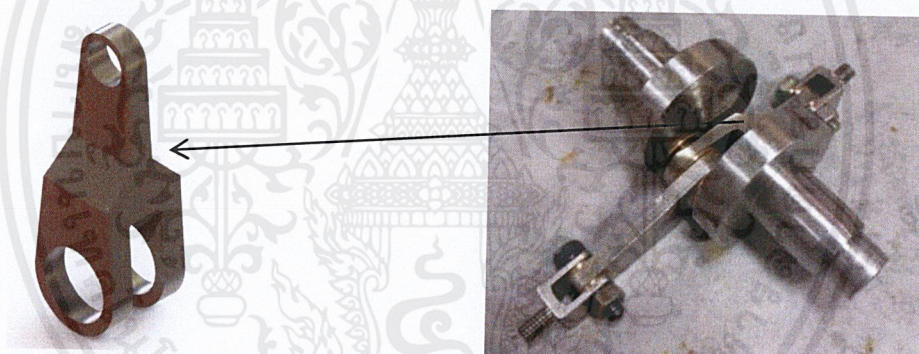
#### 4.7 หมุดยึดลูกสูบด้านร้อนและด้านเย็น



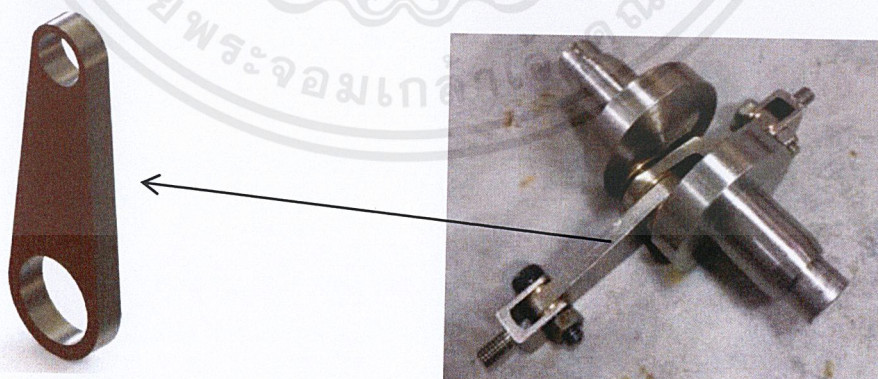
รูปที่ 4.7 หมุดยึดลูกสูบด้านร้อนและด้านเย็น

จากรูปที่ 4.7 หมุดยึดลูกสูบนี้อผลิตโดยใช้วัสดุ Stainless Steel ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนที่ยึดต่อกับลูกสูบด้านร้อน ลูกสูบด้านเย็น และก้านลูกสูบ

#### 4.8 ก้านลูกสูบ



รูปที่ 4.8 ก้านลูกสูบชนิดส้อม

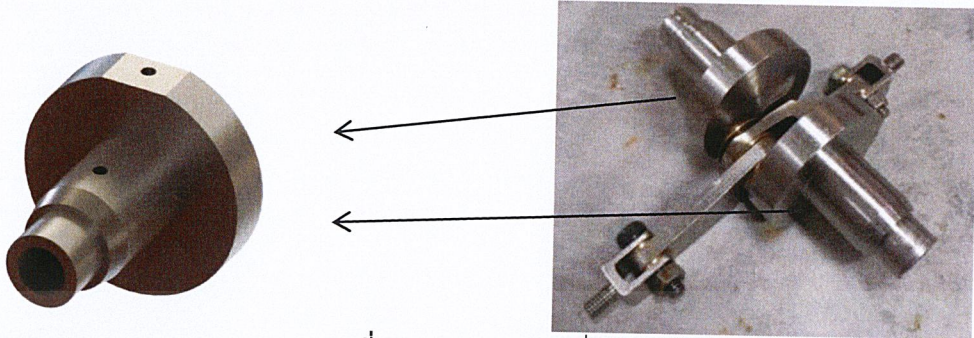


รูปที่ 4.9 ก้านลูกสูบ

จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ก้านลูกสูบทั้งสองชิ้นนี้ผลิตโดยใช้วัสดุ Stainless Steel เป็นชิ้นส่วนที่ยึดต่อกับหมุดยึดลูกสูบ และสลักข้อเหวี่ยง ซึ่งก้านลูกสูบทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านกำลังจากเพลาคอเหวี่ยงไปยังลูกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

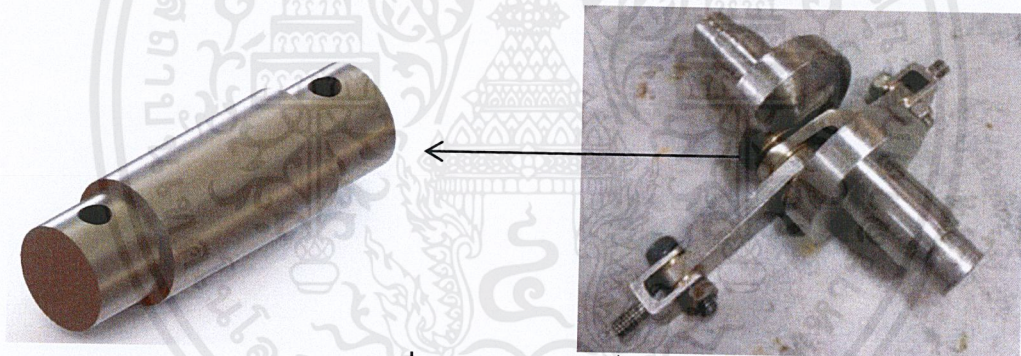
## 4.9 เฟลาข้อเหวี่ยง



รูปที่ 4.10 เฟลาข้อเหวี่ยง

จากรูปที่ 4.10 เฟลาข้อเหวี่ยงนี้ผลิตโดยใช้วัสดุ Stainless Steel ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนที่ยึดต่อกับขอยล้อตุนกำลัง และสลักข้อเหวี่ยง

## 4.10 สลักข้อเหวี่ยง



รูปที่ 4.11 สลักข้อเหวี่ยง

จากรูปที่ 4.11 สลักข้อเหวี่ยงนี้ผลิตโดยใช้วัสดุ Stainless Steel ทำหน้าที่เป็นตัวยึดต่อระหว่างเฟลาข้อเหวี่ยงทั้ง 2 ชิ้น

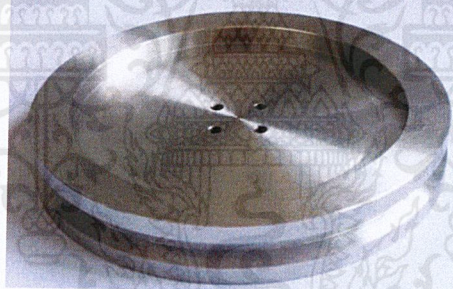
#### 4.11 ยอยล้อยึดตัวก้ำกึ่ง



รูปที่ 4.12 ยอยล้อยึดตัวก้ำกึ่ง

จากรูปที่ 4.12 ยอยล้อยึดตัวก้ำกึ่งนี้ผลิตโดยใช้วัสดุ Stainless Steel ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนที่ยึดต่อระหว่างเพลาค้อนเหวี่ยง และล้อยึดตัวก้ำกึ่ง

#### 4.12 ล้อยึดตัวก้ำกึ่ง

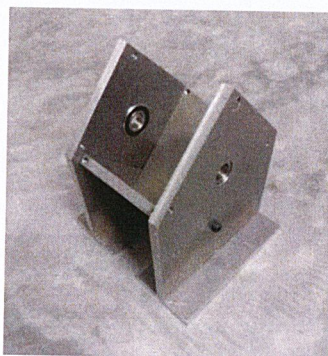


รูปที่ 4.13 ล้อยึดตัวก้ำกึ่ง

จากรูปที่ 4.13 ล้อยึดตัวก้ำกึ่งนี้ผลิตโดยใช้วัสดุ Stainless Steel ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนในการกักเก็บพลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์และนำไปใช้ในจังหวะอัดตัวของเครื่องยนต์ อีกทั้งยังทำให้ลักษณะความเร็วในการทำงานของเครื่องยนต์นั้นเสถียร

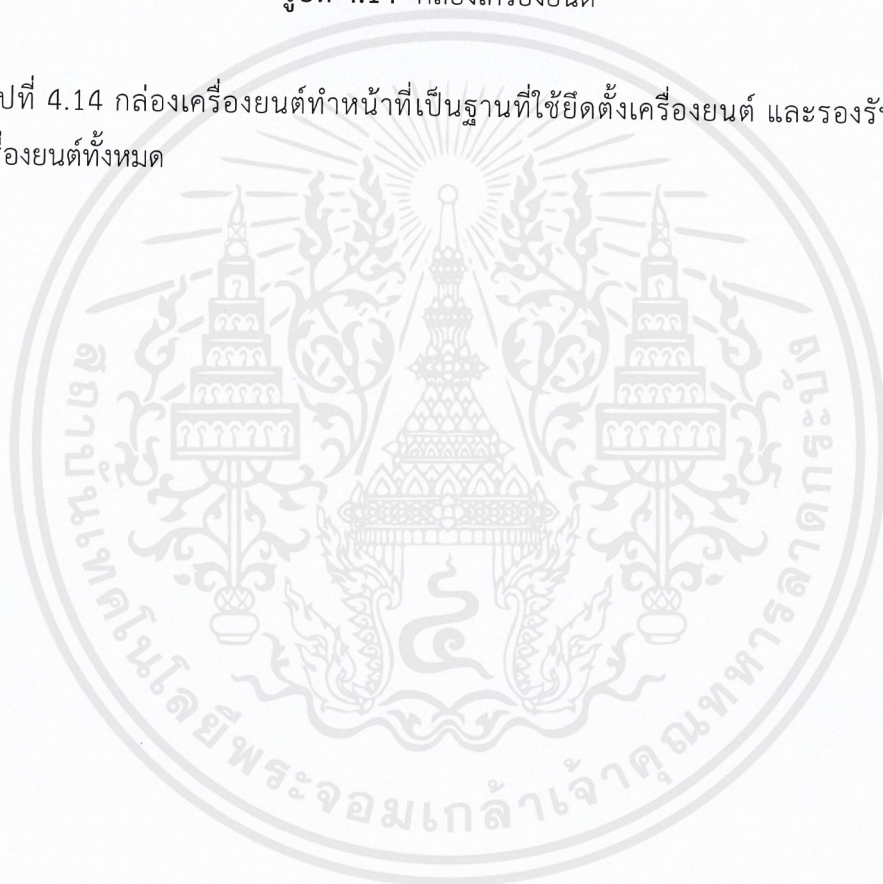
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.13 กล่องเครื่องยนต์



รูปที่ 4.14 กล่องเครื่องยนต์

จากรูปที่ 4.14 กล่องเครื่องยนต์ทำหน้าที่เป็นฐานที่ใช้ยึดตั้งเครื่องยนต์ และรองรับน้ำหนักของชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

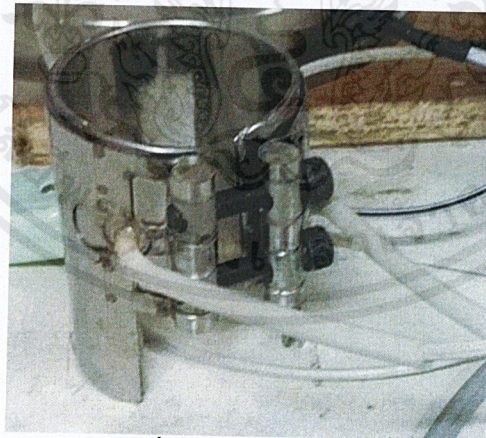
## บทที่ 5

### การทดสอบเครื่องยนต์

การทดสอบเครื่องยนต์จะต้องมีอุปกรณ์ในการให้ความร้อนเนื่องจากเครื่องยนต์สตอร์ลิงนี้เป็นระบบปิด มีหลักการทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิที่แตกต่างกันจากสองแหล่งโดยสารทำงานจะรับความร้อนที่ฝั่งรับความร้อนแล้วส่งไปยังรีเจเนอเรเตอร์เพื่อกักเก็บความร้อนในบางส่วนแล้วส่งต่อไปยังฝั่งระบายความร้อนเพื่อทำการระบายความร้อน หลังจากนั้นจะถูกส่งกลับไปฝั่งรับความร้อนโดยผ่านรีเจเนอเรเตอร์ และส่งกำลังไปขับเคลื่อนล้อตุ่นกำลังโดยล้อตุ่นกำลังจะต้องมีขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจะหมุนวนเป็นวัฏจักรเช่นนี้หากเครื่องยนต์ทำงาน และในเบื้องต้นจะตั้งสมมติฐานการทดสอบเครื่องยนต์จากการระบายความร้อนในเรื่องความคลาดเคลื่อนจากที่คำนวณมา และล้อตุ่นกำลังอาจจะมีคลาดเคลื่อนเนื่องจากการส่งกำลังไปมีการสูญเสียพลังงานจากแรงเสียดทาน ซึ่งหากเครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้จะทำการช่วยในเรื่องการระบายความร้อนโดยใช้น้ำหรือน้ำแข็งช่วยในฝั่งระบายความร้อน หรือในส่วนของล้อตุ่นกำลังจะทำการเปลี่ยนล้อตุ่นกำลังให้มีขนาดเล็กลง

#### 5.1 ชุดทดสอบเครื่องยนต์

##### 5.1.1 ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

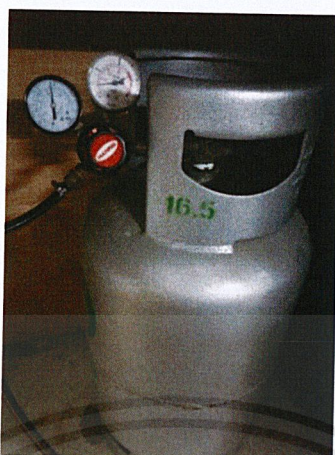


รูปที่ 5.1 ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.1 แสดงอุปกรณ์ให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดไฟฟ้า และมีการหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอก แต่ในการทดสอบอุปกรณ์ ขดลวดที่อยู่ภายในฮีตเตอร์ไฟฟ้าไม่สามารถทนต่อการให้ความร้อนเป็นเวลานานได้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าจึงเกิดการเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 ถังก๊าซ LPG



รูปที่ 5.2 ถังก๊าซแอลพีจี (LPG) และวาล์วควบคุมความดันและอัตราการไหล

จากรูปที่ 5.2 ใช้ควบคุมปริมาณก๊าซแอลพีจี (LPG) ที่ไหลออกจากหัวเผาโดยปรับอัตราการไหลของก๊าซจากวาล์วควบคุม

### 5.1.3 หัวเผาก๊าซ



รูปที่ 5.3 หัวเผาก๊าซ

จากรูปที่ 5.3 หัวเผาก๊าซใช้ในการให้ความร้อน ควบคุมโดยการเปิดปิดก๊าซแอลพีจี (LPG)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.1.4 ฉนวนครอบหัวเผา



รูปที่ 5.4 ฉนวนครอบหัวเผา

จากรูปที่ 5.4 ฉนวนครอบหัวเผาเป็นอุปกรณ์ที่หุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอก ใช้ครอบบริเวณโคมรับความร้อนเพื่อควบคุมขอบเขตของเปลวเพลิง

#### 5.1.5 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)



รูปที่ 5.5 เครื่องวัดอัตราการไหล

จากรูปที่ 5.5 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อวัด และอ่านค่าอัตราการไหลของก๊าซ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.6 อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (Infrared thermometer)



รูปที่ 5.6 อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

รูปที่ 5.6 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ยิงรังสีอินฟราเรดเพื่อวัดอุณหภูมิที่พื้นผิว โดยค่าที่อ่านได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของรังสีอินฟราเรดทั้งสองจุด

## 5.2 การทดสอบเครื่องยนต์

### 5.2.1 การทดสอบครั้งที่ 1

กำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี (LPG) มีค่าเท่ากับ 0.23 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน 7 นาที

1. ผลการทดสอบ : ที่พื้นผิวโดมรับความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส เครื่องยนต์เกิดการติดขัด และไม่สามารถทำงานได้จากนั้นจึงหยุดให้ความร้อน เมื่อได้ทำการตรวจสอบสาเหตุการติดขัดพบว่า ลูกสูบมีการขยายตัว นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการเสียดสีกันระหว่างผิวลูกสูบฝั่งรับความร้อน และผิวภายในของฐานโดมรับความร้อนขณะลูกสูบเคลื่อนที่ทำให้เกิดความเสียหายเป็นรอยนูน นอกจากนี้ในขณะที่ทำการทดสอบเครื่องยนต์มีการสั่นและมีเสียงเกิดขึ้นตลอดการทดสอบ เมื่อตรวจสอบเพิ่มเติมพบว่าชุดกลไกหลายชิ้นสวมไม่พอดีกันจึงเกิดการสั่น และไม่สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในการขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

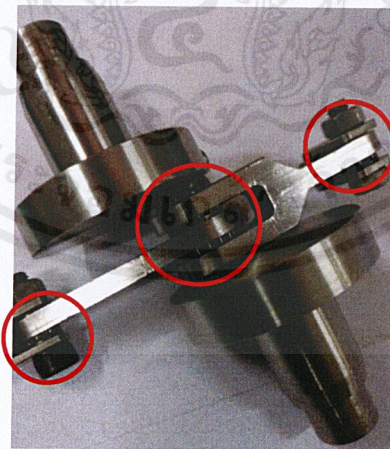


รูปที่ 5.7 ความเสียหายบริเวณภายในของฐานโคมรับความร้อน



รูปที่ 5.8 ความเสียหายบริเวณลูกสูบฝั่งรับความร้อน

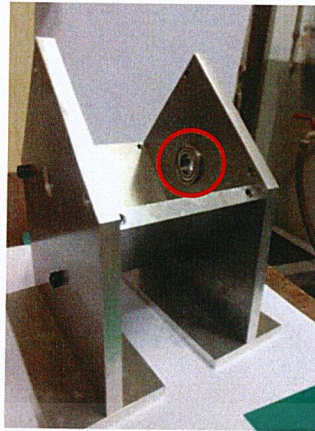
จากรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ในวงกลมแสดงบริเวณการเกิดความเสียหายเป็นรอยนูนจากการเสียดสีและขยายตัวจากความร้อน



รูปที่ 5.9 ชุดกลไกเพลลาข้อเหวี่ยงก่อนการแก้ไข

จากรูปที่ 5.9 ในวงกลมแสดงให้เห็นถึงช่องว่างของแต่ละชิ้นส่วนในชุดกลไกเพลลาข้อเหวี่ยง ซึ่งเป็นสาเหตุของการสั่น และสูญเสียพลังงานในการขับเคลื่อน

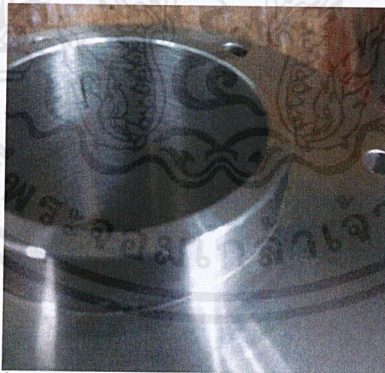
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กล่องเครื่องยนต์ก่อนการแก้ไข

จากรูปที่ 5.10 ในวงกลมแสดงให้เห็นถึงบริเวณลูกปืนเพลลาที่ได้ติดตั้งเข้าไปที่กล่องเครื่องยนต์ แต่เนื่องจากลูกปืนเพลลาที่ได้ติดตั้งเข้าไปที่กล่องเครื่องยนต์ทั้งสองฝั่งนั้นมีจุดศูนย์กลางไม่ตรงกันทำให้เครื่องยนต์เกิดการสั่นสะเทือน

2. การแก้ปัญหา : ทำการแก้ไขโดยการกลึงล้างที่ผิวลูกสูบฝั่งรับความร้อนและผิวภายในของฐานโดมรับความร้อนเพื่อลบรอยจากความเสียหายให้ผิวเรียบในทั้งสองส่วน และเพื่อลดรัศมีภายนอกของลูกสูบเพื่อเพิ่มช่องว่างสำหรับรองรับการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ในส่วนของชุดกลไกทำการแก้ไขโดยใส่แหวนรองเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวในทิศที่ไม่มีแรงส่งของก้านสูบ และสั่งผลิตสลักข้อเหวี่ยงชิ้นใหม่เนื่องจากมีขนาดที่เล็กเกินไปไม่สามารถแก้ไขได้ และตั้งศูนย์ลูกปืนเพลลาเพื่อให้จุดศูนย์กลางของทั้งสองด้านตรงกัน



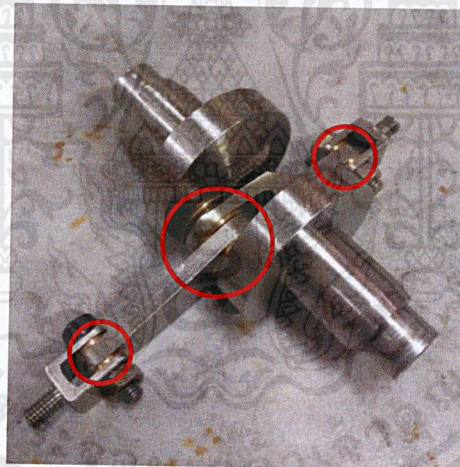
รูปที่ 5.11 ฐานโดมรับความร้อนหลังแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ความเสียหายบริเวณลูกสูบด้านร้อนหลังแก้ไข

จากรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 ได้แสดงรูปภายหลังจากการนำฐานโคมรับความร้อน และลูกสูบด้านร้อนไปแก้ไขโดยการกลึงล้างผิวเพื่อลบรอยนูน เพื่อที่จะทำให้ไม่เกิดการขีดในขณะที่ลูกสูบฝั่งรับความร้อนเคลื่อนที่และลัดรีซีมของลูกสูบที่เกิดการขยายตัว นอกจากนี้ยังเป็นการเผื่อระยะในการขยายตัวของชิ้นส่วนเมื่อได้รับความร้อน เนื่องจากการแก้ไขในครั้งนี้ได้ทำการกลึงผิวของทั้งสองชิ้นส่วนเพื่อให้ผิวเรียบจึงทำให้มีช่องว่างข้างละ 0.04 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.13 ชุดกลไกเพลาล้อเหวี่ยงหลังการแก้ไข

จากรูปที่ 5.13 ภายในวงกลมได้แสดงส่วนที่ได้ทำการแก้ไขโดยใส่แหวนรองป้องกันการขยับเคลื่อนของชิ้นส่วนในทิศที่ไม่ได้มีการส่งแรงของชุดกลไก ในส่วนสลักข้อเหวี่ยงได้ทำการผลิตขึ้นมาใหม่เพื่อสวมให้พอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กล่องเครื่องยนต์หลังการแก้ไข

จากรูปที่ 5.14 ในวงกลมแสดงถึงบริเวณที่ได้ทำการแก้ไขโดยการขยายรู และใส่ลูกปืนเพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกใหญ่ขึ้น โดยให้จุดศูนย์กลางของทั้งสองฝั่งตรงกันเพื่อลดการสั่นของเพลลาข้อเหวี่ยง

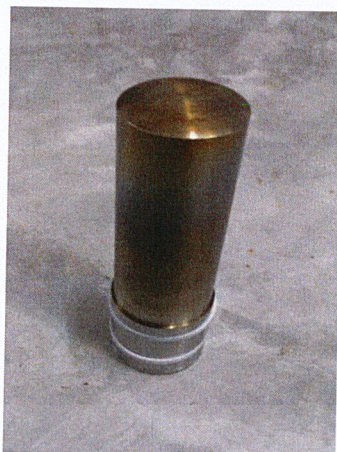
#### 5.2.2 การทดสอบครั้งที่ 2

ใช้ลูกสูบด้านร้อนฐานโตมรับความร้อน ชุดกลไก และกล่องเครื่องยนต์ที่แก้ไขมาแล้วมาประกอบจากนั้นจึงทำการทดสอบ

กำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี (LPG) มีค่าเท่ากับ 0.23 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน 7 นาที ในการทดสอบครั้งนี้หยุดให้ความร้อนก่อนกำหนดที่เวลา 4 นาที เนื่องจากล้อยุนกำลังไม่มีแรงต้านของอากาศ

1. ผลการทดสอบ : ที่พื้นผิวโตมรับความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้ เมื่อทำการตรวจสอบพบว่ามีการรั่วไหลของอากาศจากช่องว่างระหว่างลูกสูบฝั่งรับความร้อนและภายในของฐานโตมรับความร้อน เนื่องจากการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการทดสอบครั้งที่ 1 ทำให้เกิดช่องว่างมากเกินไปอากาศจึงไหลออกได้

2. การแก้ปัญหา : ในขั้นต้นได้คิดที่จะทำการออกแบบและสั่งผลิตลูกสูบชิ้นใหม่ แต่เนื่องจากงบประมาณและระยะเวลาในการผลิตมีไม่เพียงพอ จึงทำการแก้ไขโดยการกลึงลูกสูบฝั่งรับความร้อนให้เป็นร่องเพื่อสวมแหวน จะแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ลูกสูบฝั่งรับความร้อนเมื่อสวมแหวน

จากรูปที่ 5.15 แสดงรูปหลังจากนำไปแก้ไขโดยการกลึงร่องแล้วจึงสวมแหวนที่ทำมาจากวัสดุที่เรียกว่า เทฟลอน(Teflon) หรือพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน(PTFE) ทำให้การเคลื่อนที่ของลูกสูบด้านร้อนลื่นขึ้น และป้องกันไม่ให้ผิวของลูกสูบด้านร้อนไปสัมผัสกับฐานโดมรับความร้อน รวมไปถึงเพื่อลดการรั่วไหลของอากาศ

### 5.2.3 การทดสอบครั้งที่ 3

นำลูกสูบฝั่งรับความร้อนที่ได้ทำการสวมแหวนมาประกอบพร้อมตรวจเช็คการรั่วไหลของอากาศ พบว่าไม่มีอากาศรั่วไหลจากนั้นจึงทำการทดสอบ กำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี (LPG) มีค่าเท่ากับ 0.23 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน 7 นาที

1. ผลการทดสอบ : ที่พื้นผิวโดมรับความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้ คาดว่าการใช้ล้อยูนก้ำลั้งที่มีน้ำหนักเท่ากับ 3.3 กิโลกรัมหนักเกินไป ทำให้อากาศมีก้ำลั้งไม่เพียงพอที่จะผลักล้อยูนก้ำลั้งให้หมุนได้ในรอบต่อไป

2. การแก้ปัญหา : เปลี่ยนไปใช้ล้อยูนก้ำลั้งที่มีน้ำหนัก 2.2 กิโลกรัมดังแสดงรูปในที่ 5.16 ในการทดสอบครั้งต่อไป



รูปที่ 5.16 ล้อยูนก้ำลั้งที่มีน้ำหนัก 2.2 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.2.4 การทดสอบครั้งที่ 4

ทำการเปลี่ยนล้อยูนกำลัง โดยเปลี่ยนเป็นล้อยูนกำลังที่มีน้ำหนัก 2.2 กิโลกรัมแทนล้อยูนกำลังที่มีน้ำหนัก 3.3 กิโลกรัมจากนั้นจึงทำการทดสอบ กำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี (LPG) มีค่าเท่ากับ 0.23 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน 7 นาที

1. ผลการทดสอบ : ที่พื้นผิวโคมรับความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้ จากที่ได้ทำการเปลี่ยนล้อยูนกำลังมาแล้ว จึงสรุปว่าปัญหาไม่ได้เกิดจากน้ำหนักของล้อยูนกำลังที่มีน้ำหนัก 3.3 กิโลกรัม และคาดว่า การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนระบายความร้อนมีไม่เพียงพอ

2. การแก้ปัญหา : ในการทดสอบเครื่องยนต์ครั้งต่อไปจะใช้น้ำแข็งวางบนส่วนระบายความร้อน เพื่อช่วยในการระบายความร้อน

#### 5.2.5 การทดสอบครั้งที่ 5

อัตราการไหลของก๊าซ LPG 0.23 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เวลาที่ให้ความร้อน 7 นาที โดยใช้ล้อยูนกำลังที่มีน้ำหนัก 3.3 กิโลกรัม และทดลองนำน้ำแข็งมาวางบนส่วนระบายความร้อนเพื่อช่วยในการระบายความร้อน

1. ผลการทดสอบ : ที่พื้นผิวโคมรับความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้ จึงสรุปว่าการระบายความร้อนโดยการใช้น้ำแข็งช่วยไม่เพียงพอที่จะทำให้อากาศมีกำลังมากพอที่จะผลักล้อยูนกำลังที่มีน้ำหนัก 3.3 กิโลกรัมหมุนในรอบต่อไปได้

2. การแก้ปัญหา : ในการทดสอบเครื่องยนต์ครั้งต่อไปจะใช้น้ำแข็งช่วยในส่วนระบายความร้อนเช่นเดิม แต่เปลี่ยนไปใช้ล้อยูนกำลังที่มีน้ำหนัก 2.2 กิโลกรัม

#### 5.2.6 การทดสอบครั้งที่ 6

อัตราการไหลของก๊าซ LPG 0.23 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เวลาที่ให้ความร้อน 7 นาที โดยใช้ล้อยูนกำลังที่มีน้ำหนัก 2.2 กิโลกรัม และนำน้ำแข็งมาวางบนส่วนระบายความร้อนเพื่อช่วยในการระบายความร้อน

1. ผลการทดสอบ : อุณหภูมิพื้นผิว 650 องศาเซลเซียส เครื่องยนต์ไม่ทำงาน แม้ว่าจะแก้ปัญหาไปแล้วก็ตาม แต่ก็ยังไม่สามารถทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้ จึงได้วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น เครื่องยนต์มีการสั่นเล็กน้อย มีเสียงกระแทกตลอดการทดลอง เป็นต้น

2. การแก้ปัญหา : เมื่อตรวจสอบเบื้องต้นในแต่ละชิ้นส่วนพบว่า มีความเป็นไปได้ที่เสียงกระแทกในขณะที่ทำการทดสอบเครื่องยนต์นั้นเกิดจากขอยล้อยูนกำลังยึดต่อระหว่างล้อยูนกำลังกับเพลลาข้อเหวี่ยงไม่มั่นคง

## สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการนี้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและออกแบบเพื่อพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา ระบายความร้อนด้วยตัวนำที่มีอยู่แล้ว ในขั้นตอนแรกของการทำโครงการเรื่องนี้ได้ทำการตรวจสอบเครื่องยนต์ที่มีอยู่แล้ว พบว่าเครื่องยนต์ที่มีอยู่แล้วไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ครบรอบวัฏจักรเพราะความสูงของกระบอกสูบน้อยกว่าความยาวของลูกสูบเมื่อเทียบกับก้านลูกสูบ และพบว่ามีปริมาตรตาย (Dead volume) ที่มากเกินไปทำให้อากาศสามารถอัดตัวได้น้อย และที่ชุดด้านรับความร้อนมีส่วนประกอบคือโดมรับความร้อน ระบายความร้อนภายใน และลูกสูบซึ่งมีถึงสามส่วน ซึ่งหมายความว่าการถ่ายเทความร้อนนั้นต้องผ่านตัวต้านทานถึงสามตัว จึงทำให้มีประสิทธิภาพการรับความร้อนต่ำ ระยะห่างระหว่างกระบอกสูบและลูกสูบมีมากเกินไปทำให้อากาศรั่วไหลออกมา จึงไม่เป็นระบบปิด นอกจากนี้กล่องเครื่องยนต์รวมไปถึงฐานประกอบกันได้ไม่พอดี หลังจากพบปัญหาข้างต้นนี้แล้วจึงได้คิดหาทางการแก้ไขด้วยการออกแบบ และส่งผลผลิตในส่วนของโดมรับความร้อน ลูกสูบด้านร้อน รีเจนเนอเรเตอร์ กล่องเครื่องยนต์ ลูกสูบด้านเย็น และฝั่งระบายความร้อนขึ้นมาโดยอาศัยชุดกลไกที่มีอยู่แล้วมาใช้เพื่อลดต้นทุนในการผลิตมาเป็นตัวหลักของการออกแบบเพื่อให้ทุกชิ้นส่วนสามารถนำมาประกอบเข้ากันได้พอดี จากนั้นจึงประกอบ และทดสอบเครื่องยนต์ ซึ่งการทดสอบเครื่องยนต์ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 ผลจากการทดสอบคือเครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้ แต่ได้ตรวจพบสาเหตุสำคัญที่เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้หลายสาเหตุ ซึ่งจะกล่าวไว้ในข้อเสนอแนะ

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้ และมีเสียงดังขณะทดสอบ จึงแนะนำให้ออกแบบชุดกลไกที่แข็งแรงและเหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์เนื่องจากการแก้ไขที่ได้ทำมานั้นไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างสมบูรณ์ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่ต้องใช้ความประณีต และแม่นยำในการผลิตสูงจึงควรควบคุมการผลิตชิ้นงานให้ได้มาตรฐาน ในส่วนการยึดต่อแต่ละชิ้นส่วนควรจะให้มีการยึดกันอย่างแข็งแรงพอดีไม่หลวมเกินไปและไม่แน่นเกินไปเพื่อลดการสูญเสียกำลัง และลดการสั่นสะเทือน รวมถึงควรออกแบบให้มีอัตราส่วนปริมาตรกวาดที่เหมาะสมโดยการเพิ่มปริมาตรกวาดของด้านร้อน อีกทั้งการทำชุดช่วยในการระบายความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการระบายความร้อนให้กับเครื่องยนต์

## บรรณานุกรม

- [1] วิสันต์ อรุณพิพัฒน์, สุพัฒน์ หวลถนอม และ สุวิจิษฐ์ จุฑิม, Design and Analysis V-type Alpha Stirling Engine, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
- [2] Koichi Hirata, Schmidt Theory for Stirling Engines, National Maritime Research Institute
- [3] G. Walker, Stirling engines: Clarendon press, Oxford, 1980
- [4] Charles F. Reinholtz and Hamilton H. mabie, Mechanisms and Dynamics of Machinery. 4th ed: Virginia Polytechnic Institute and State University
- [5] Bancha Kongtragool and Somchai Wongwises, Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator, 2005
- [6] L.S. Scollo , P.E. Valdez , S.R. Santamarina, M.R. Chini , J.H. Baron , Twin cylinder alpha stirling engine combined model and prototype redesign, 2012
- [7] Pascal Puech and Victoria Tishkova, Thermodynamic analysis of a Stirling engine including regenerator dead volume, 2015



ภาคผนวก ก.

แบบเขียนและขนาดส่วนประกอบของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

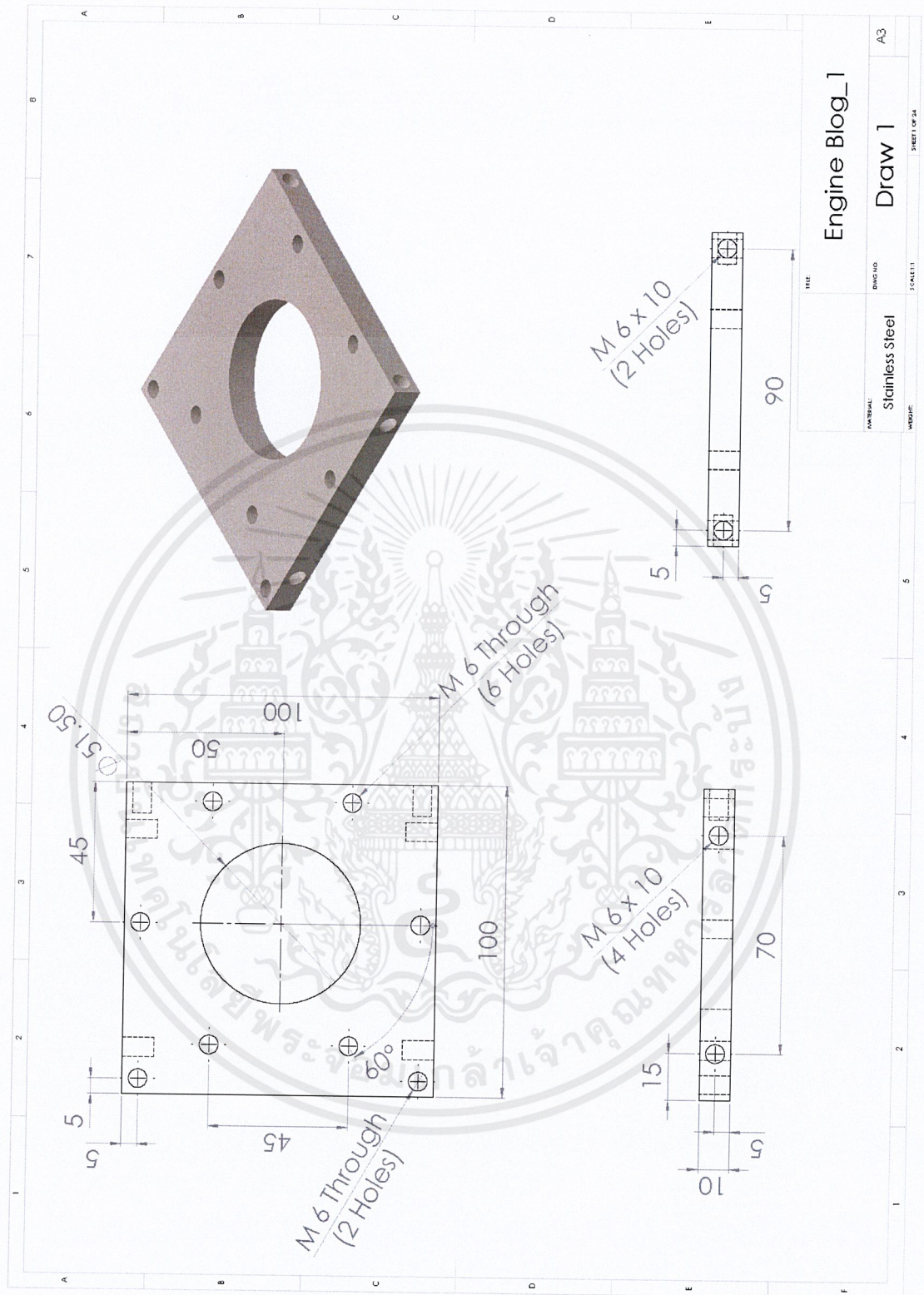
ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงชิ้นส่วนเครื่องยนต์ต้นแบบ

Part no.	Name	Quantity	Mark	Material
1	Engine Blog 1	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
2	Engine Blog 2	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
3	Engine Blog	2	Machined	Stainless Steel AISI 304
4	Engine Cover Plate	2	Machined	Stainless Steel AISI 304
5	Top Heater Dome	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
6	Bottom Heater Dome	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
7	Cooler	1	Machined	Aluminum Alloy 7075
8	Tube	1	Machined	Copper
9	Regenerator	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
10	Top Hot Piston	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
11	Bottom Hot Piston 1	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
12	Bottom Hot Piston 2	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
13	Top Cold Piston	1	Machined	Aluminum Alloy 7075
14	Bottom Cold Piston	1	Machined	Aluminum Alloy 7075
15	Crankshaft	2	Machined	Stainless Steel AISI 304
16	Crankpin	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
17	Folk Connecting Rod	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
18	Connecting Rod	1	Machined	Stainless Steel AISI 304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

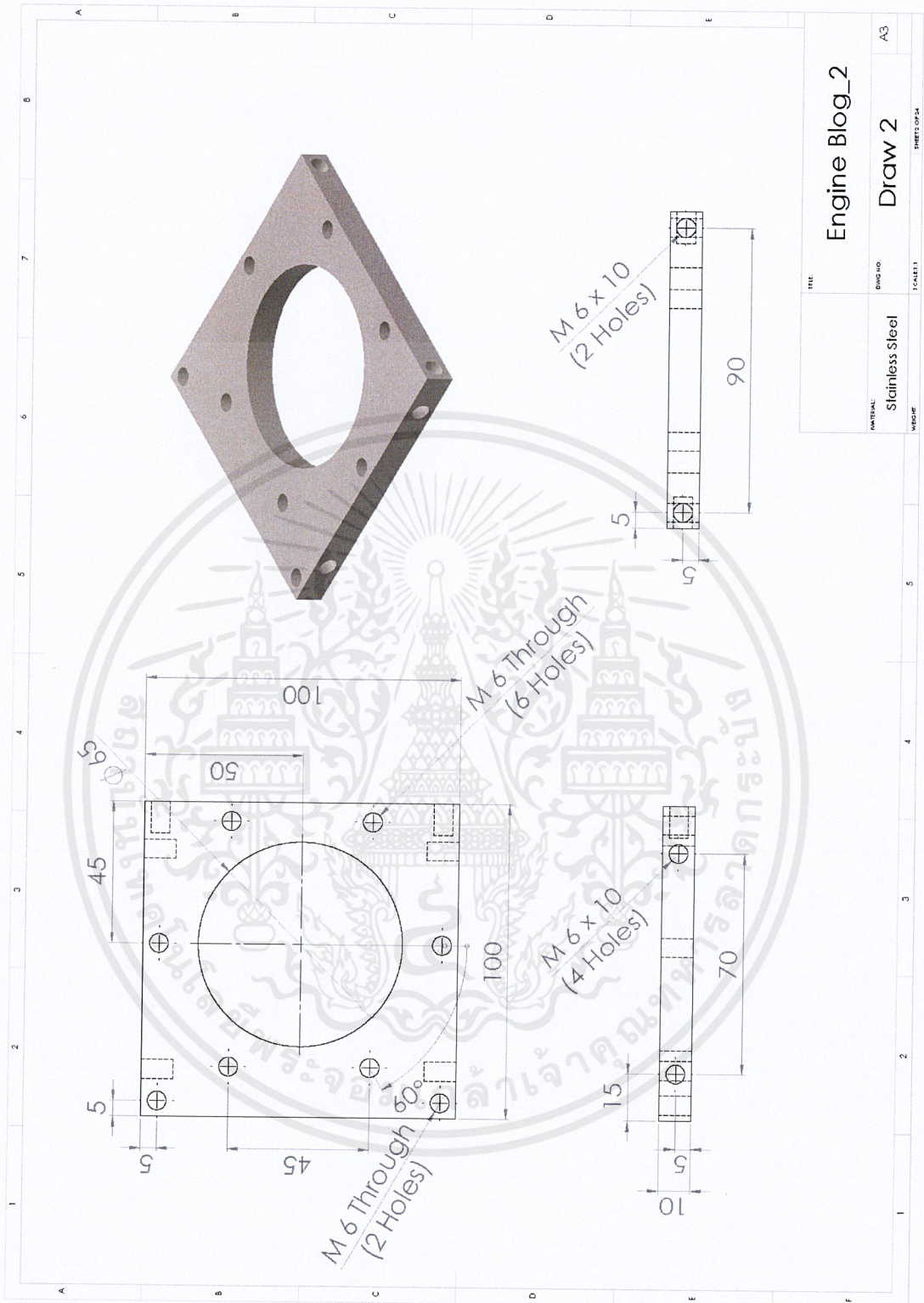
19	Piston pin	2	Machined	Stainless Steel AISI 304
Part no.	Name	Quantity	Mark	Material
20	Flywheel Coupling	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
21	Flywheel	1	Machined	Stainless Steel AISI 304
22	10NM11 Needle Bearing	3		Standard part
23	06NM11 Needle Bearing	2		Standard part
24	38-15 Ball Bearing	2		Standard part
25	M3x0.5x12 Socket Head	2		Standard part
26	M6x1x16 Socket Head	2		Standard part
27	M6x1x30 Socket Head	4		Standard part
28	M6x1x65 Socket Head	4		Standard part

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



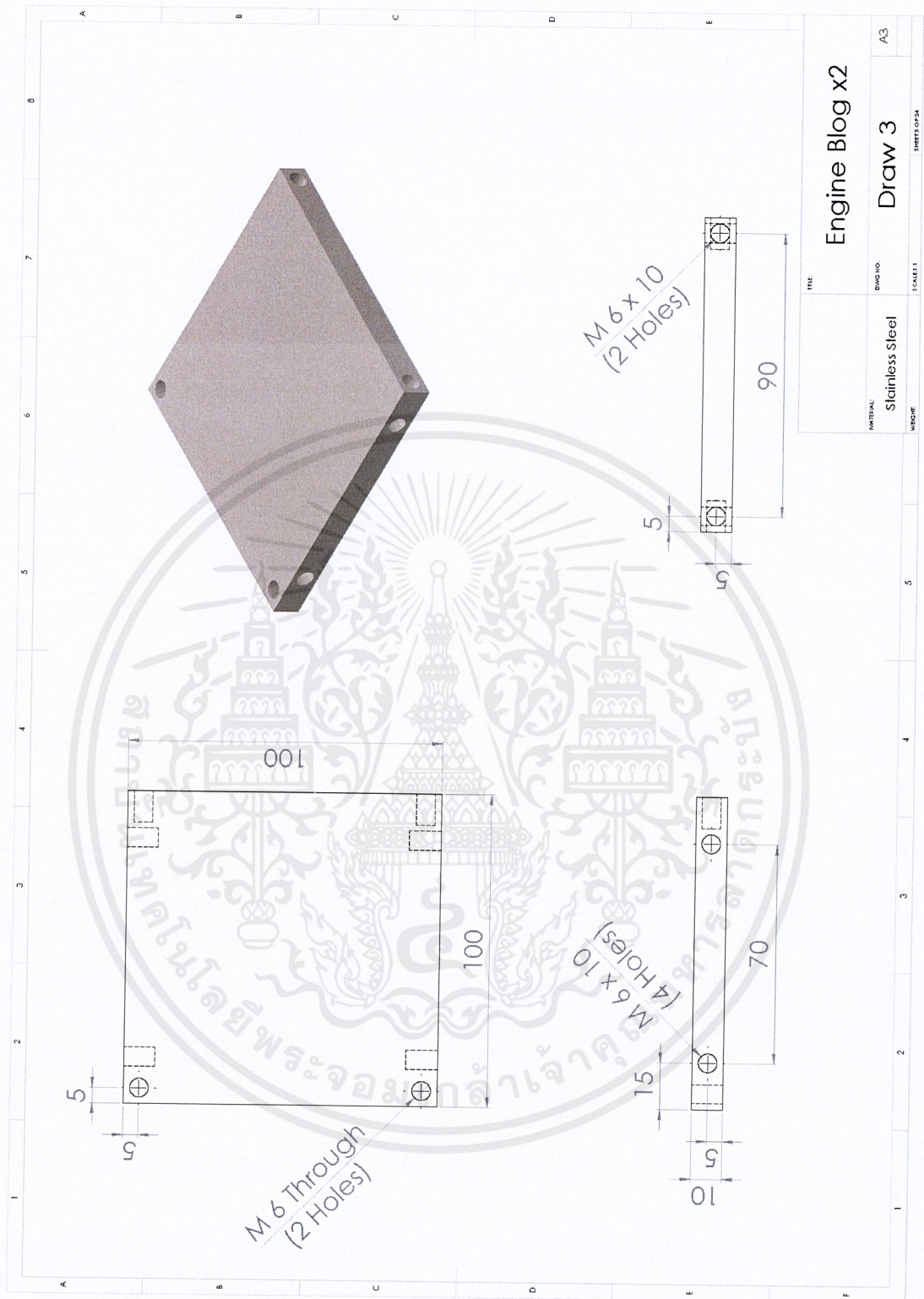
รูปที่ ก.1 ฐานรองโดมรับความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



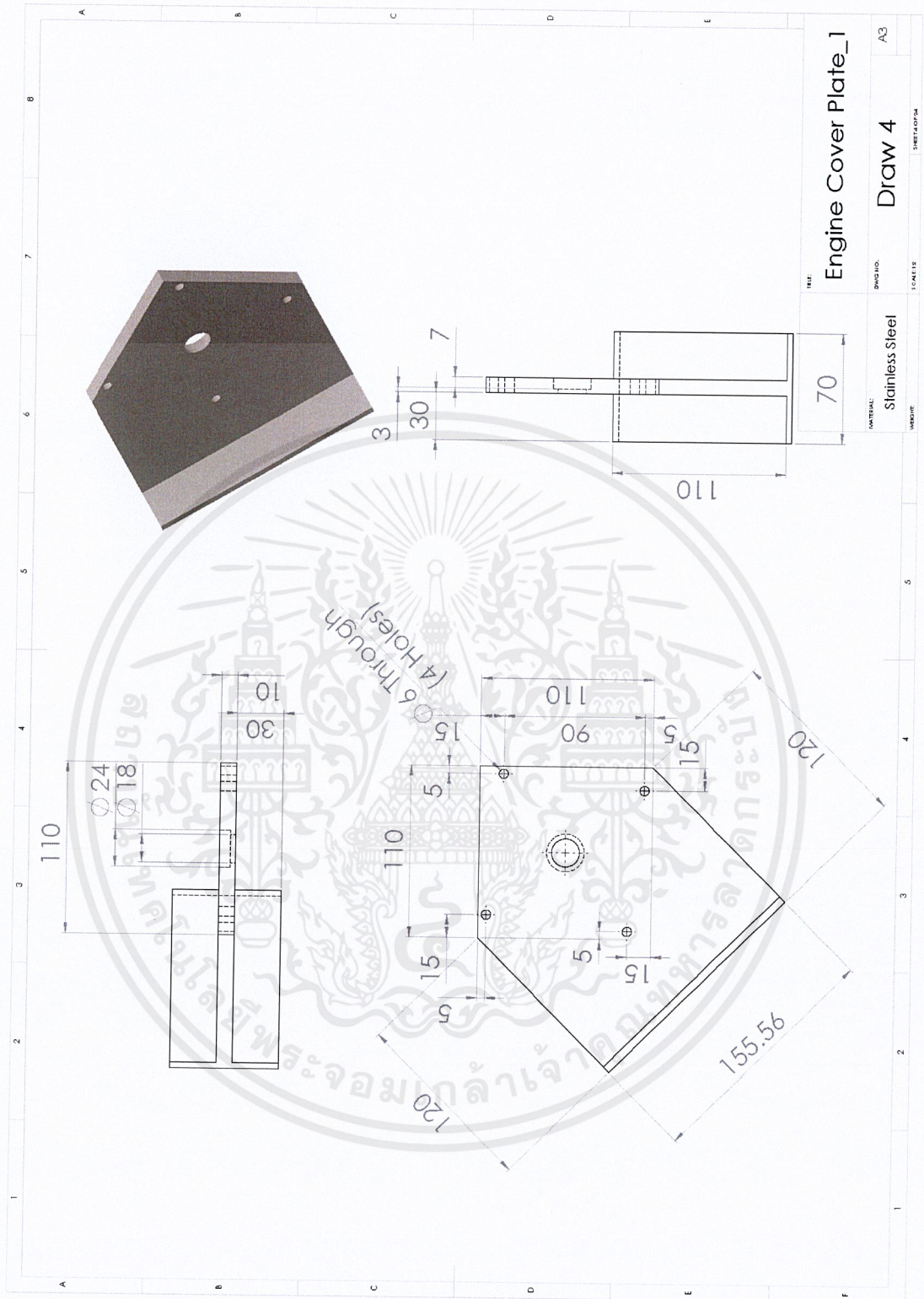
รูปที่ ก.2 ฐานรองรับส่วนระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



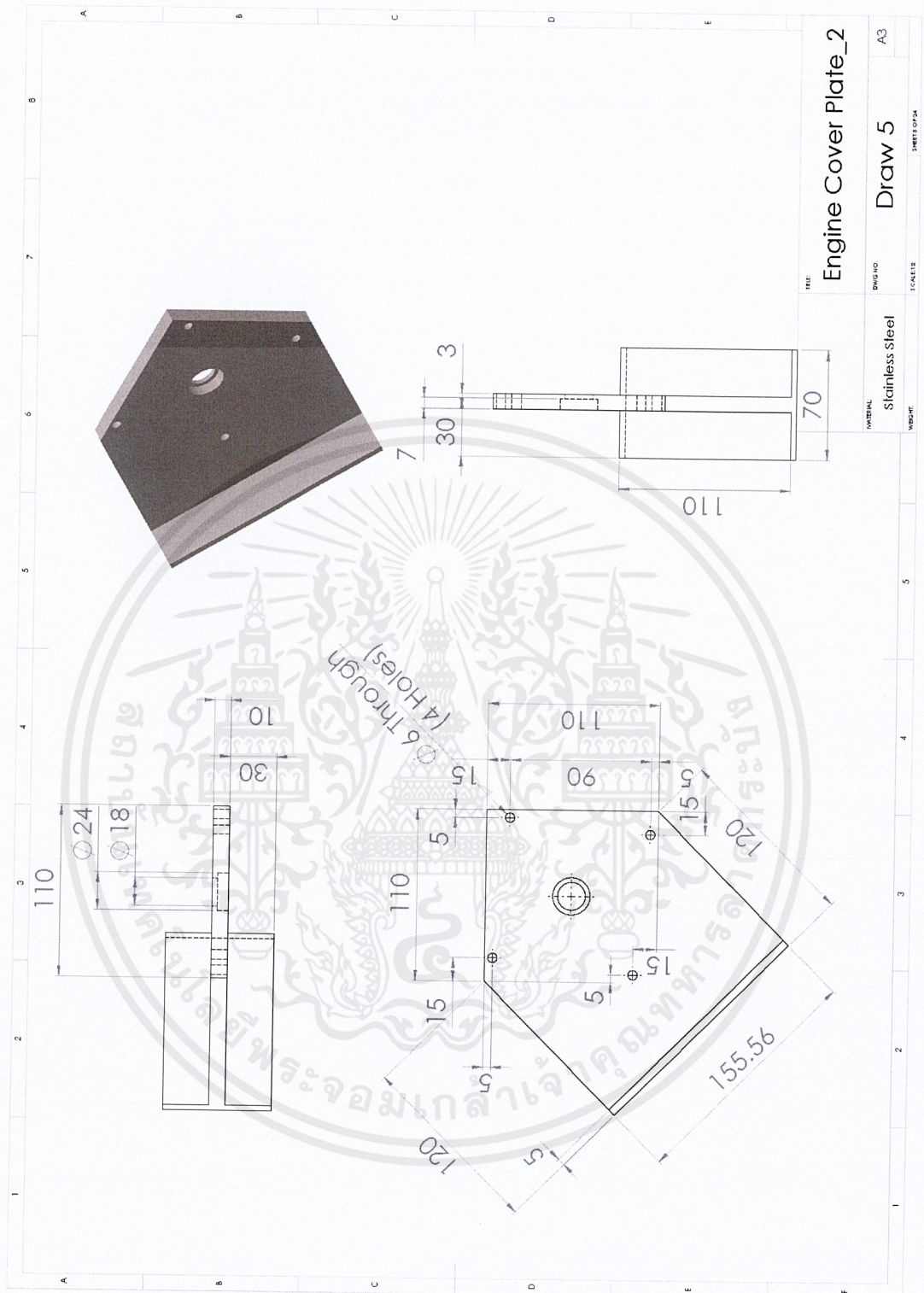
รูปที่ ก.3 ฝาปิดเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



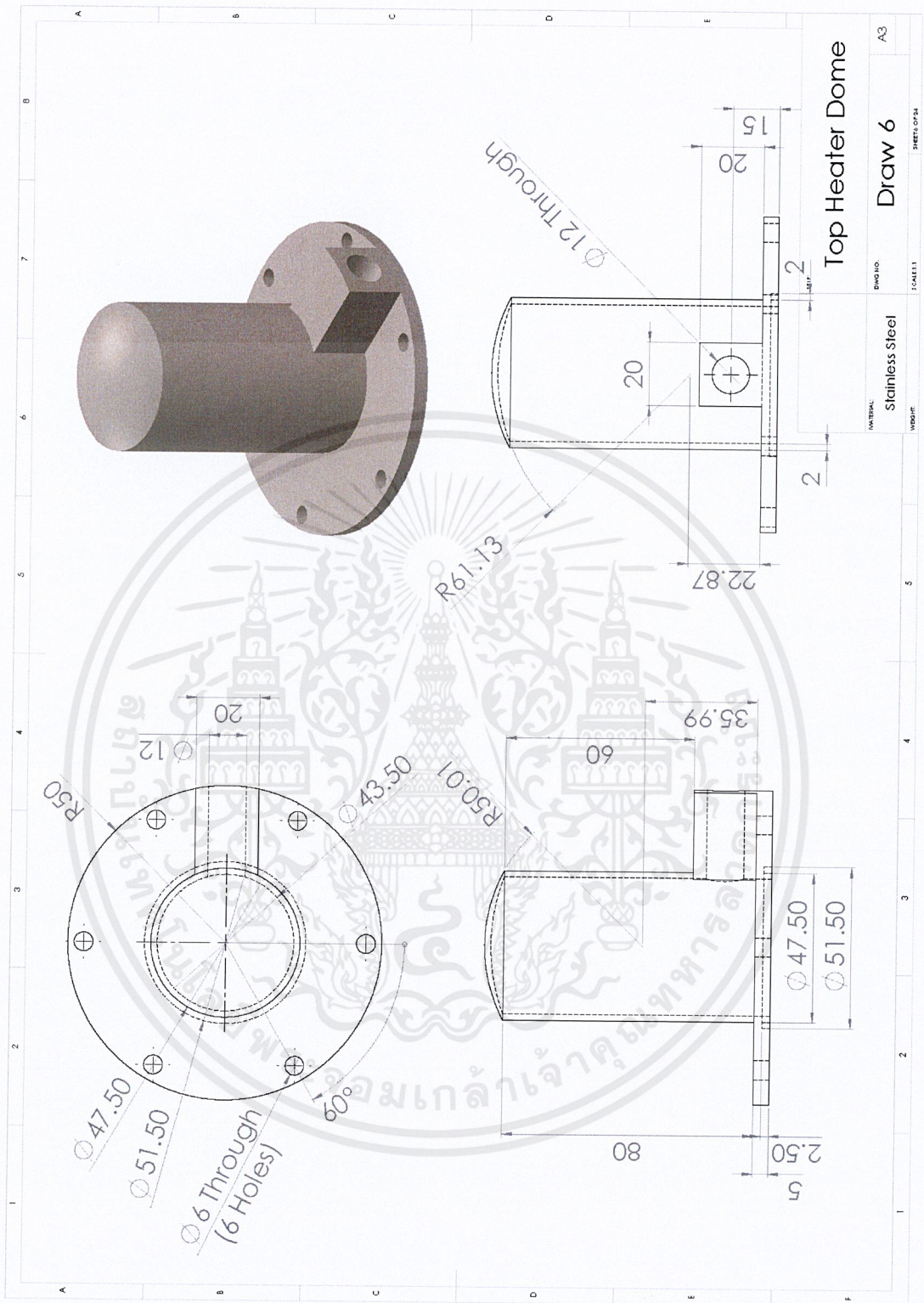
รูปที่ ก.4 ฐานเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 ฐานเครื่องยนต์

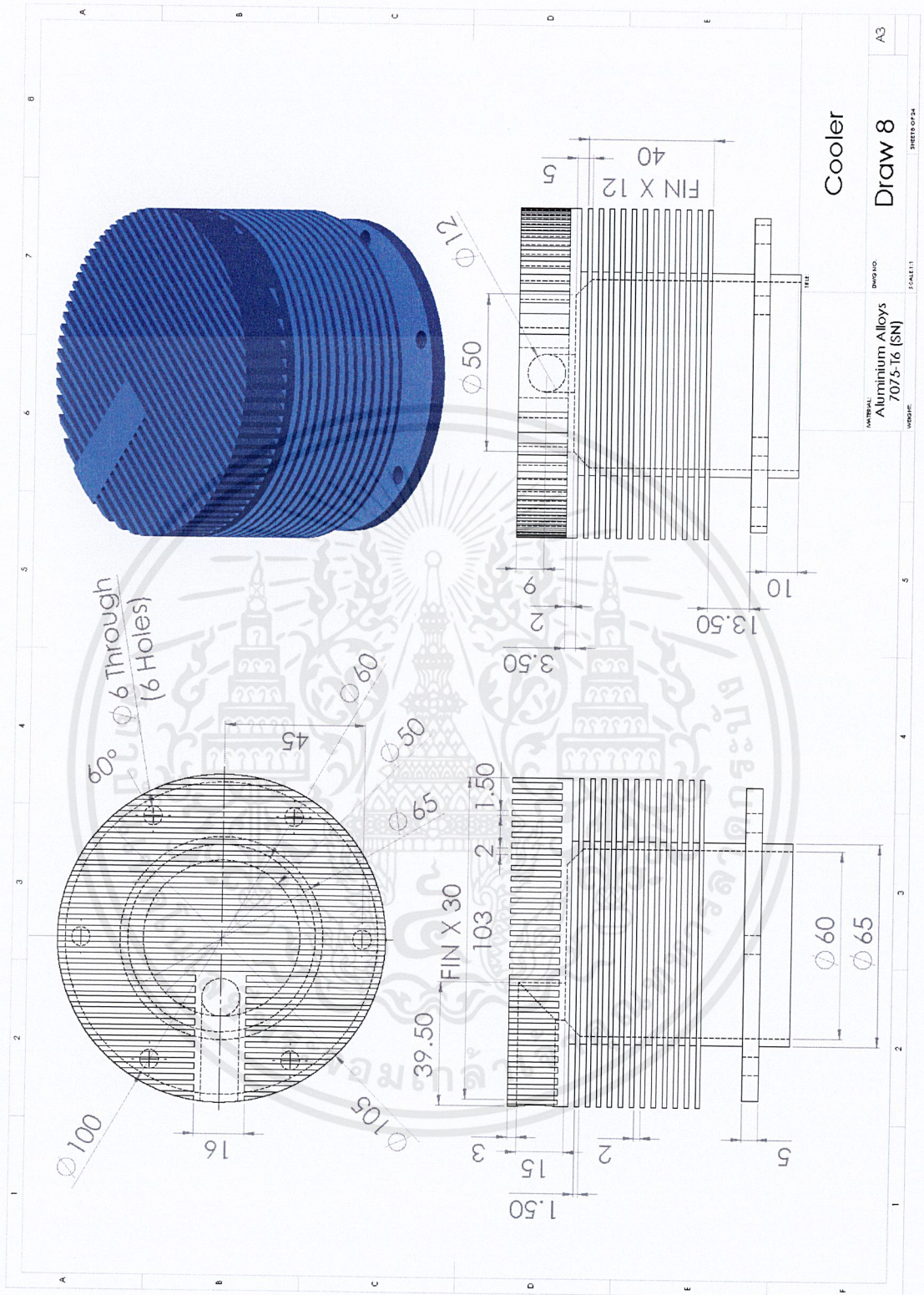
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 โดมรับความร้อนส่วนบน

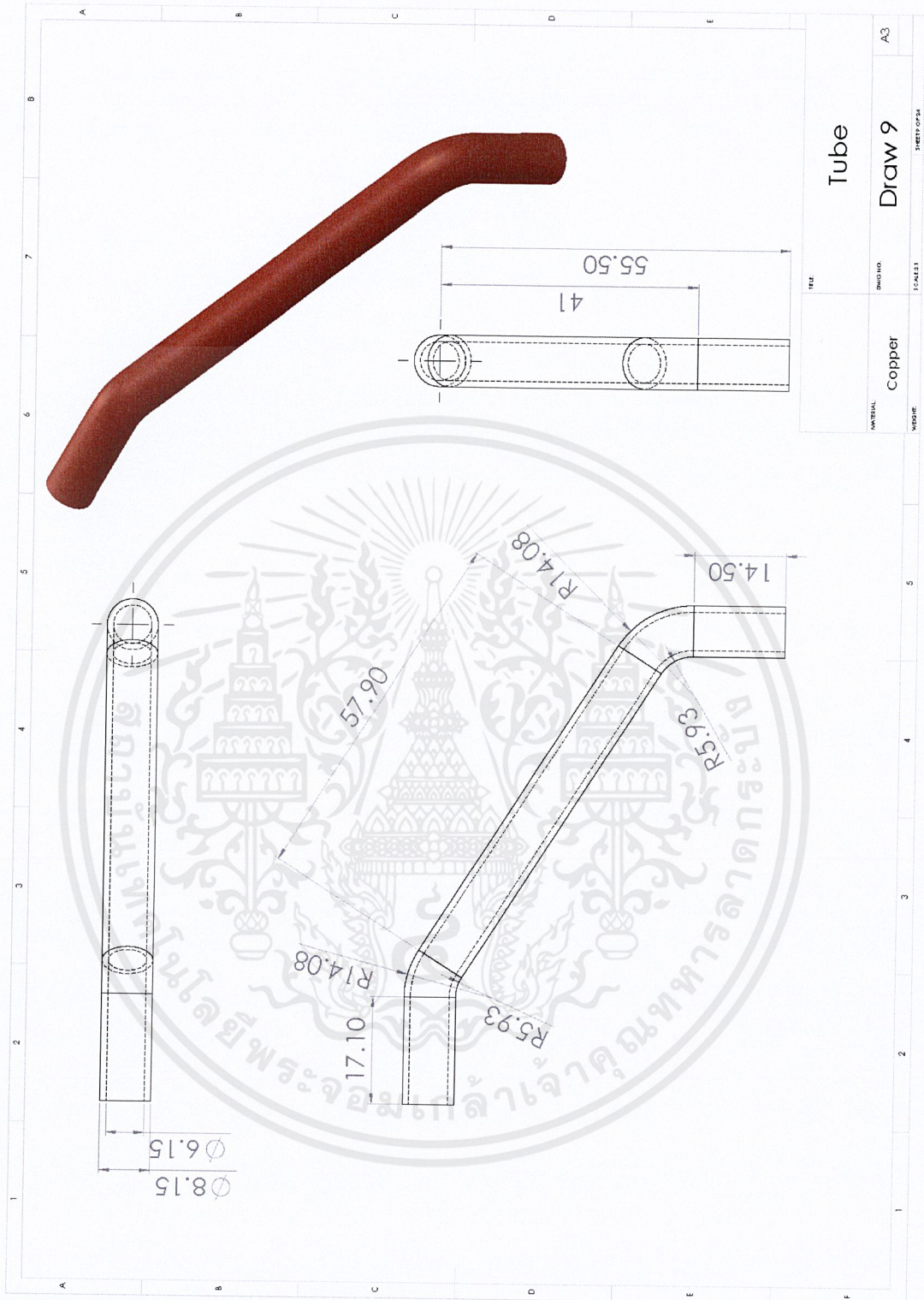
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ ก.8 ส่วนระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



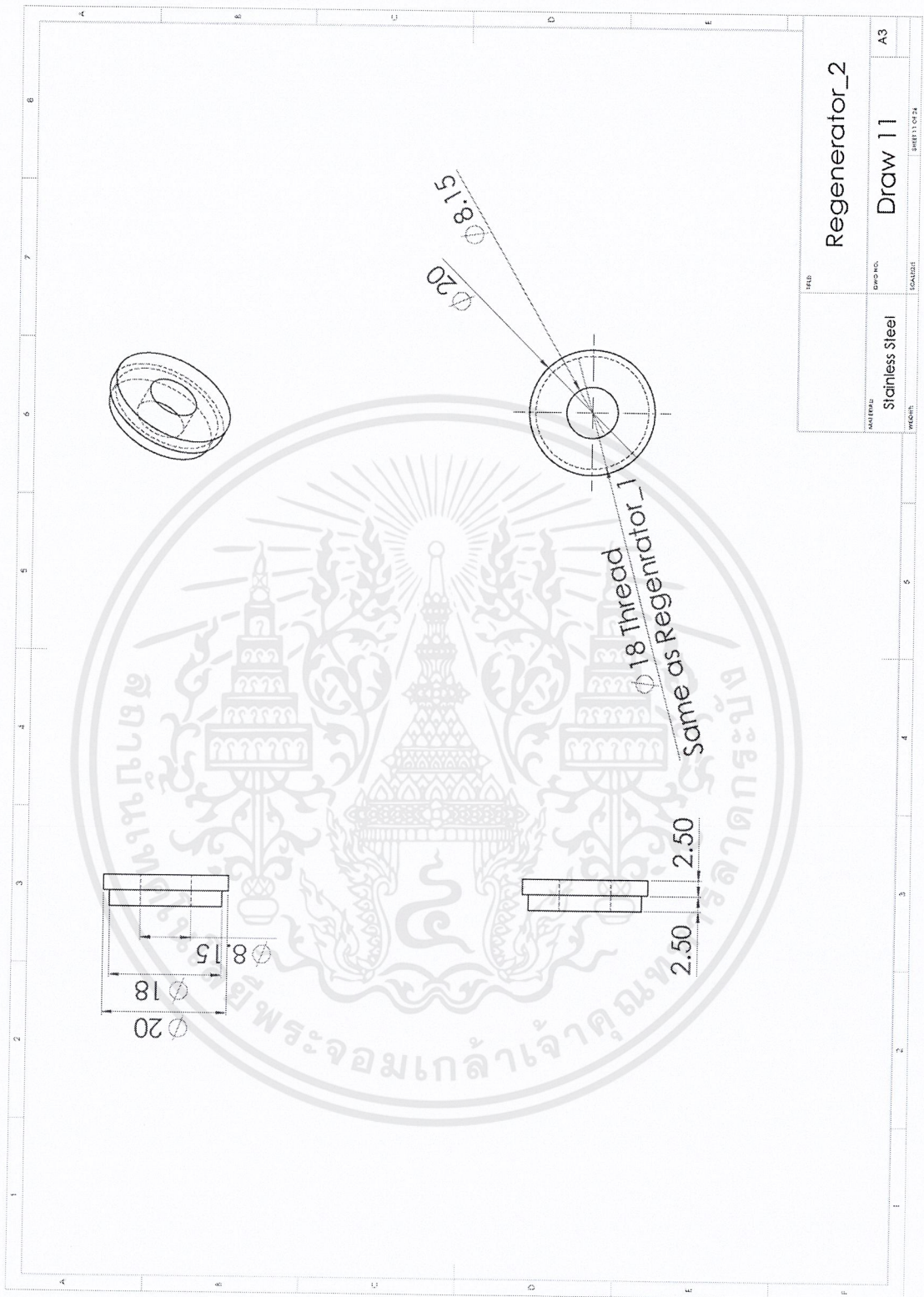
รูปที่ ก.9 ท่อทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



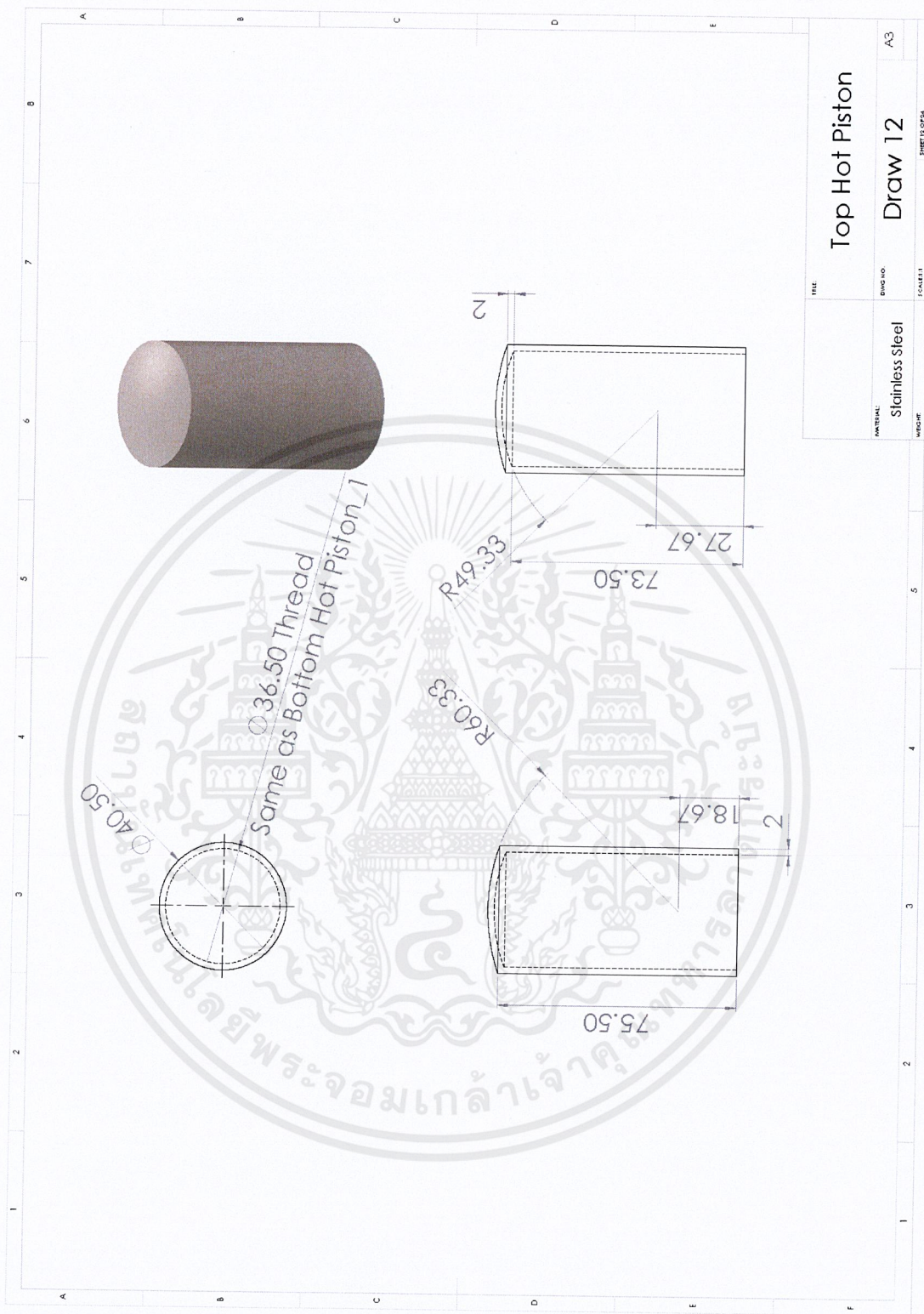
รูปที่ ก.10 ท่อรีเจนเนอเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



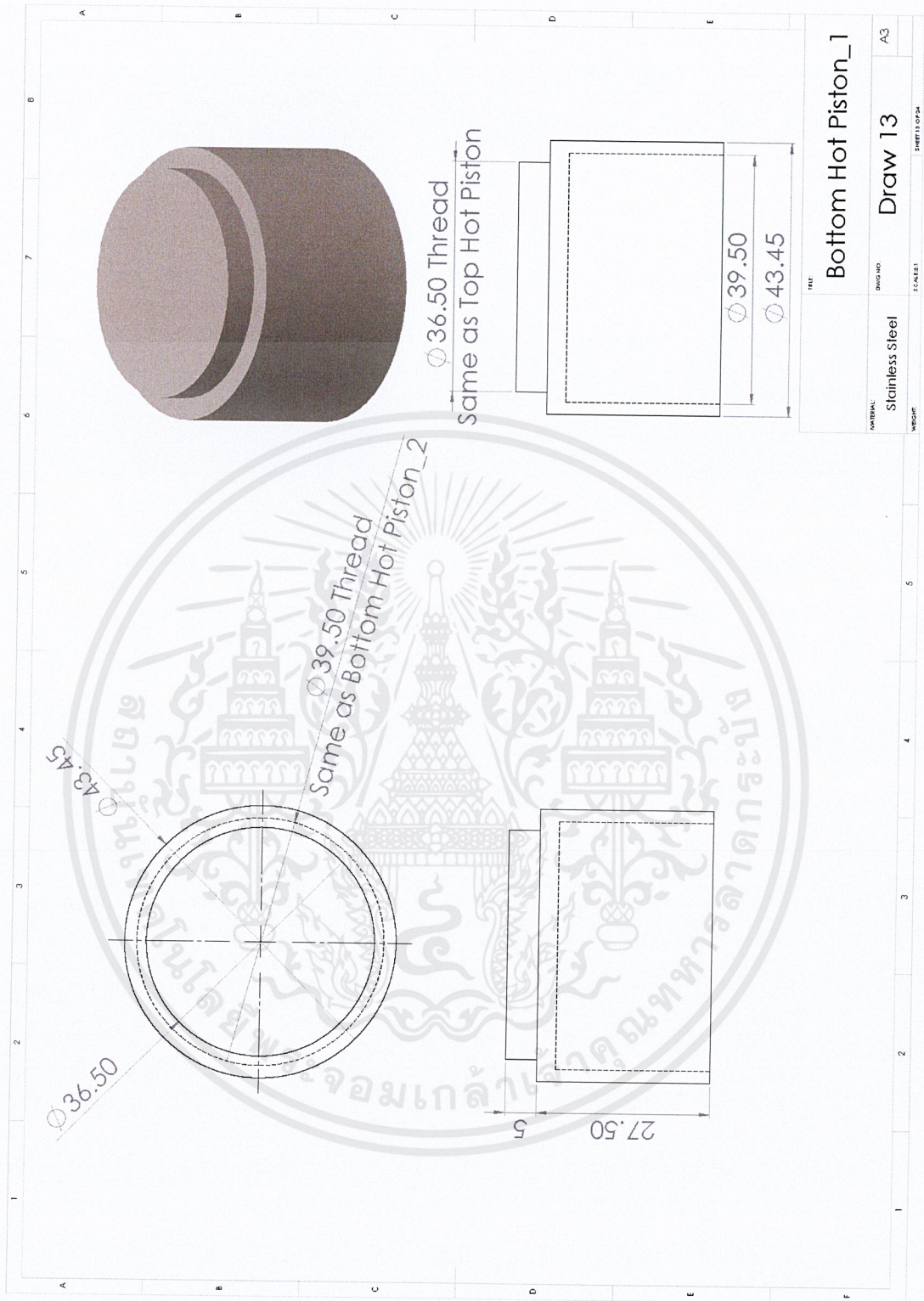
รูปที่ ก.11 ฝาปิดทอรีเจนเนอเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



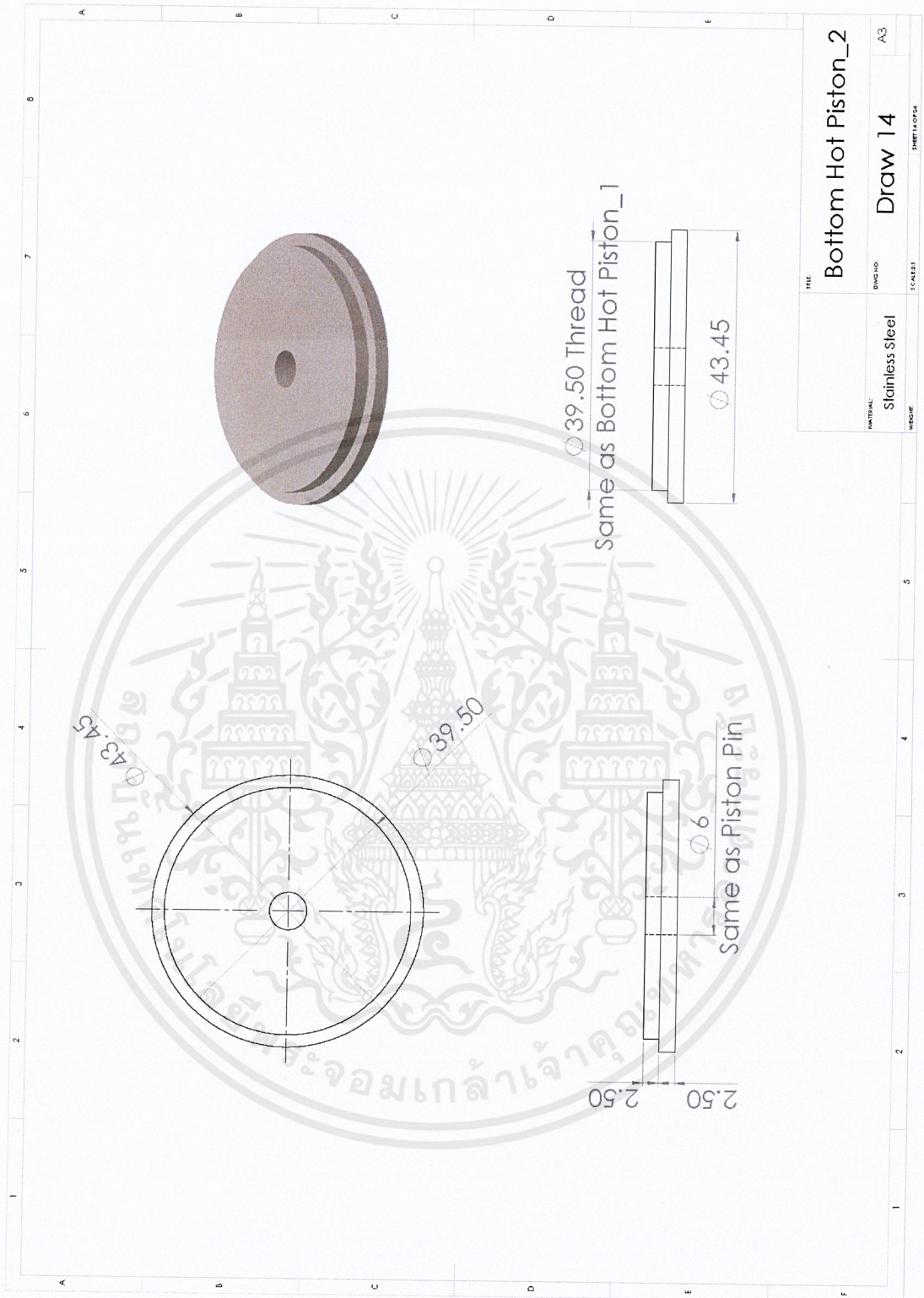
รูปที่ ก.12 ลูกสูบร้อนส่วนบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



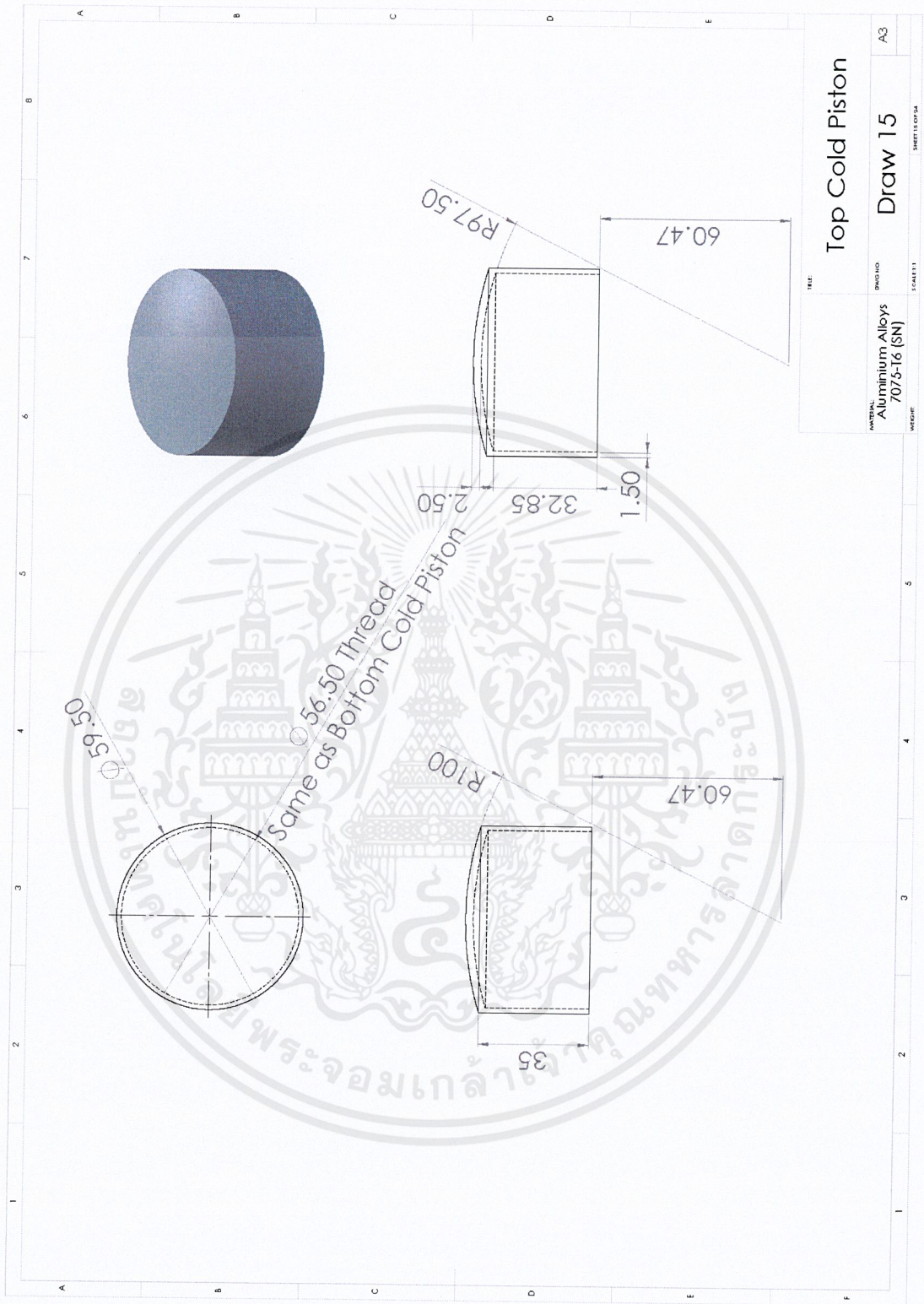
รูปที่ ก.13 ลูกสูบร้อนส่วนกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



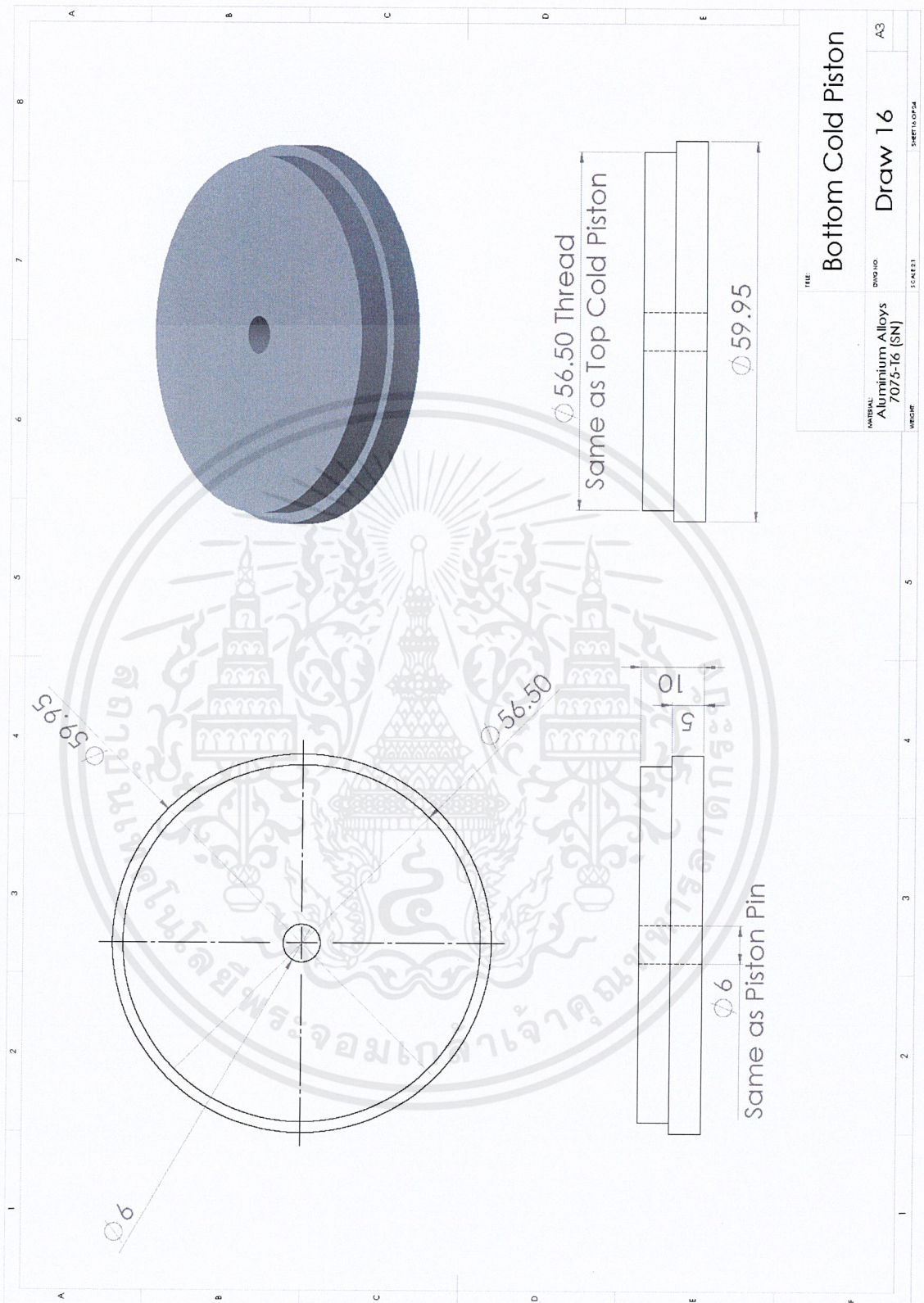
รูปที่ ก.14 ลูกสูบร้อนส่วนล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



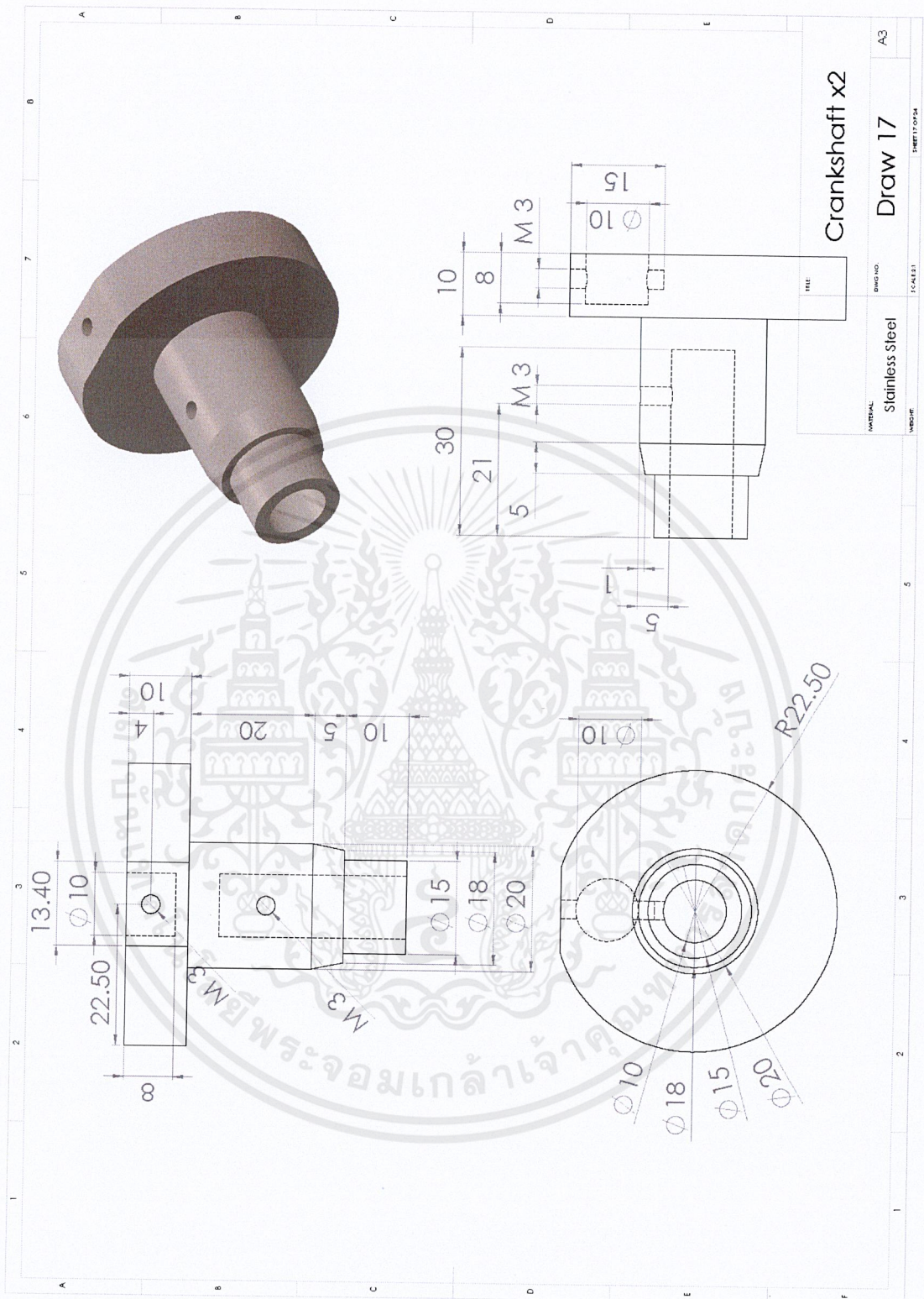
รูปที่ ก.15 ลูกสูบเย็นส่วนบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



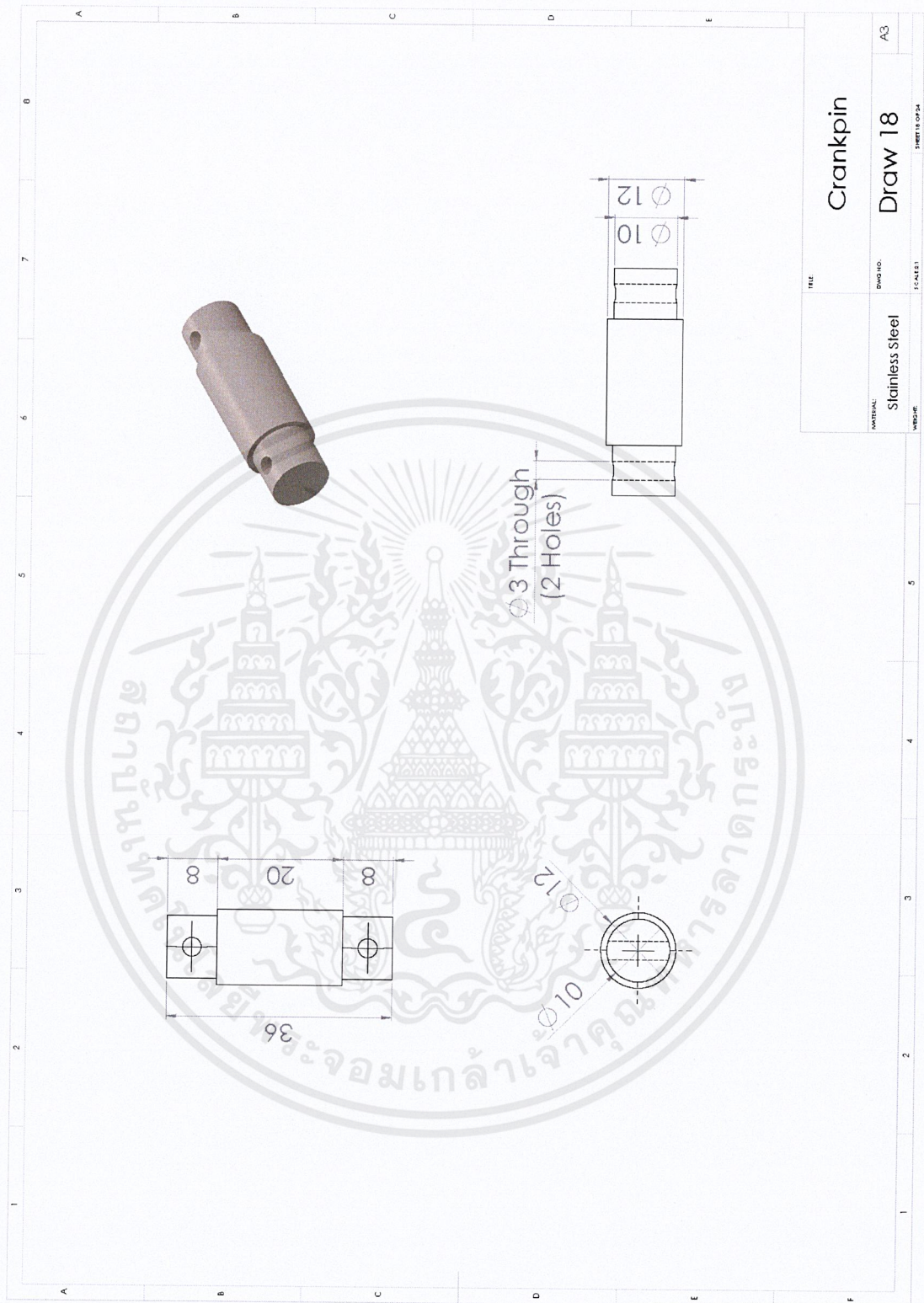
รูปที่ ก.16 ลูกสูบเย็นส่วนล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



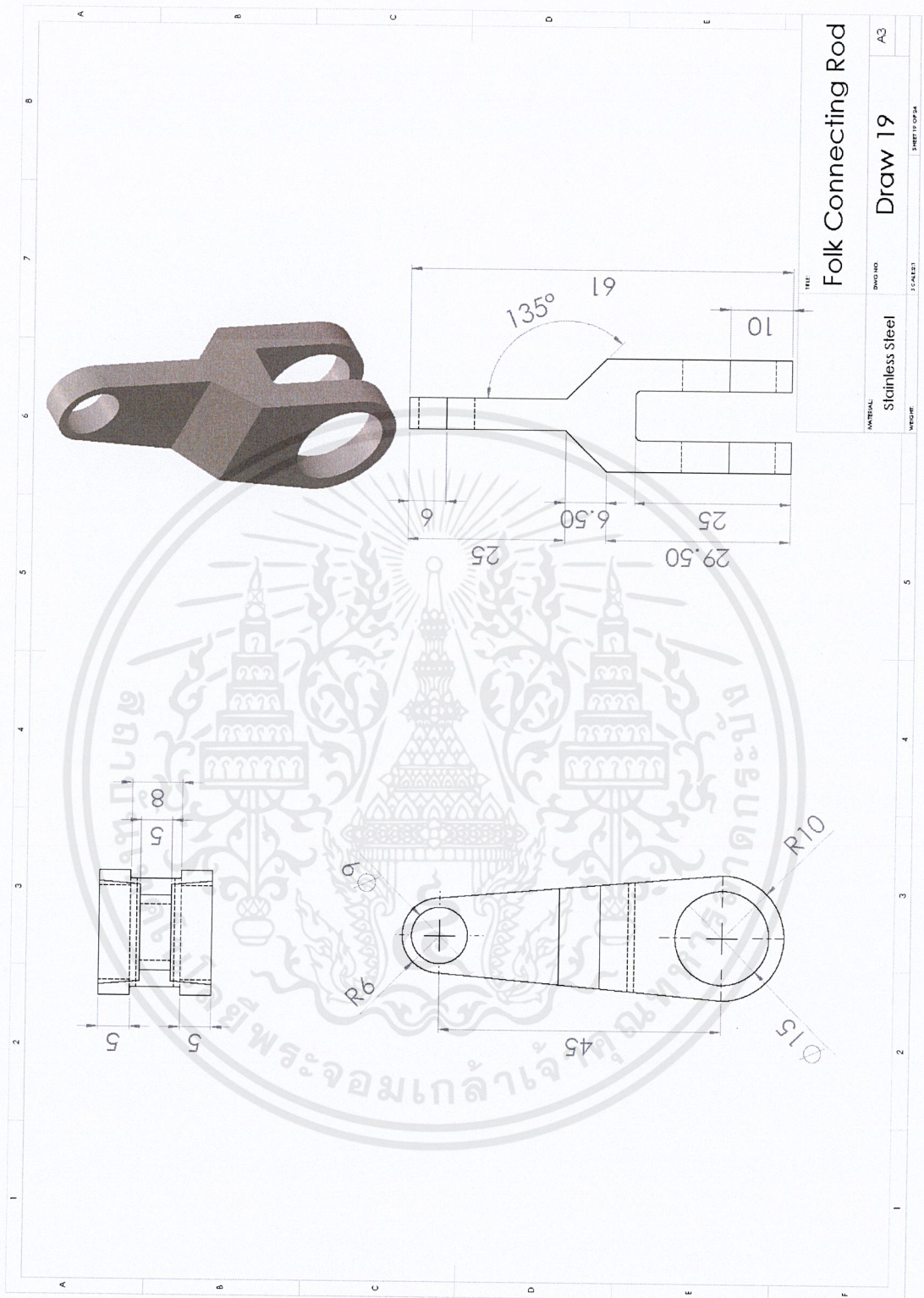
รูปที่ ก.17 เฟลาข้อเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



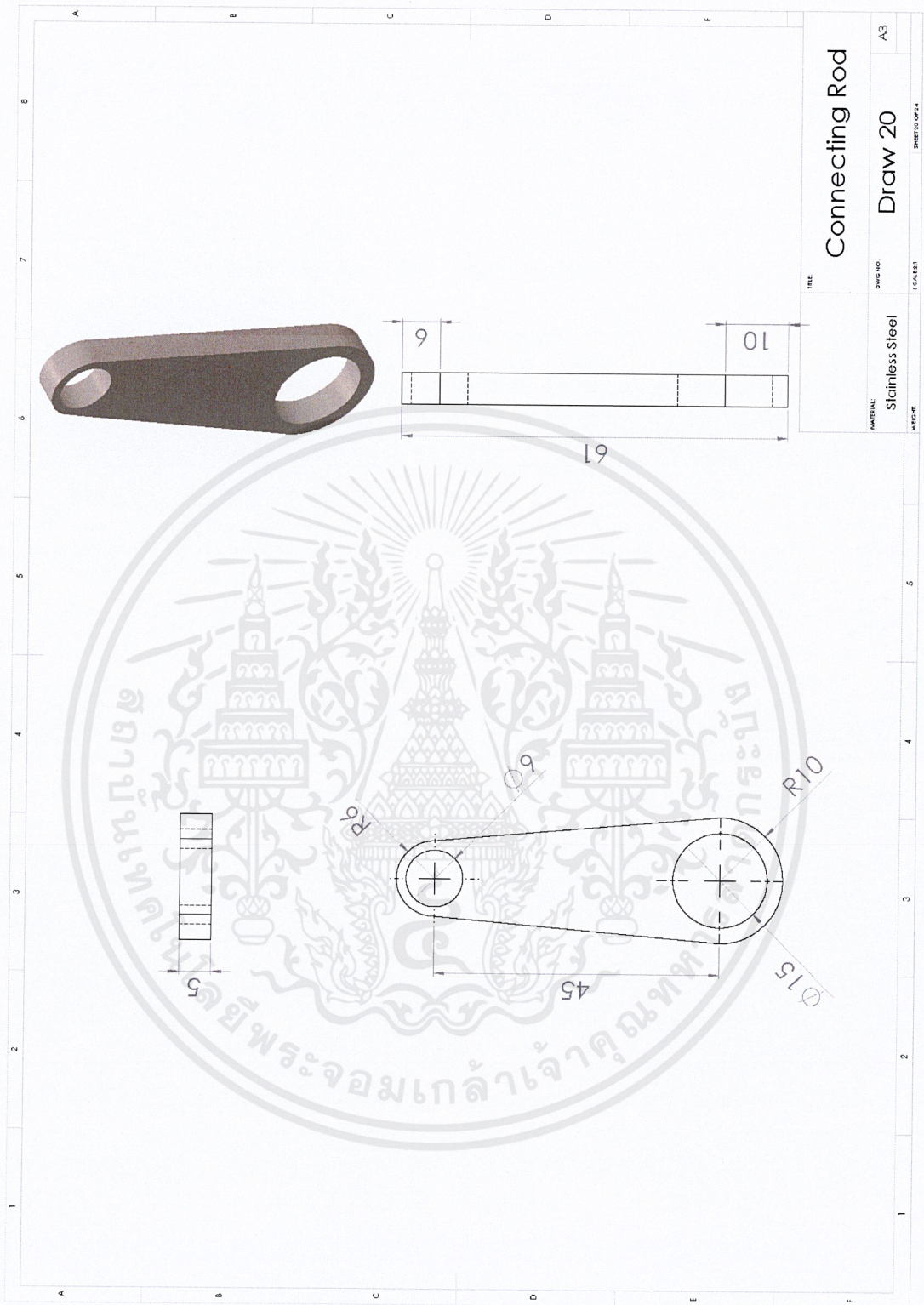
รูปที่ ก.18 สลักข้อเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



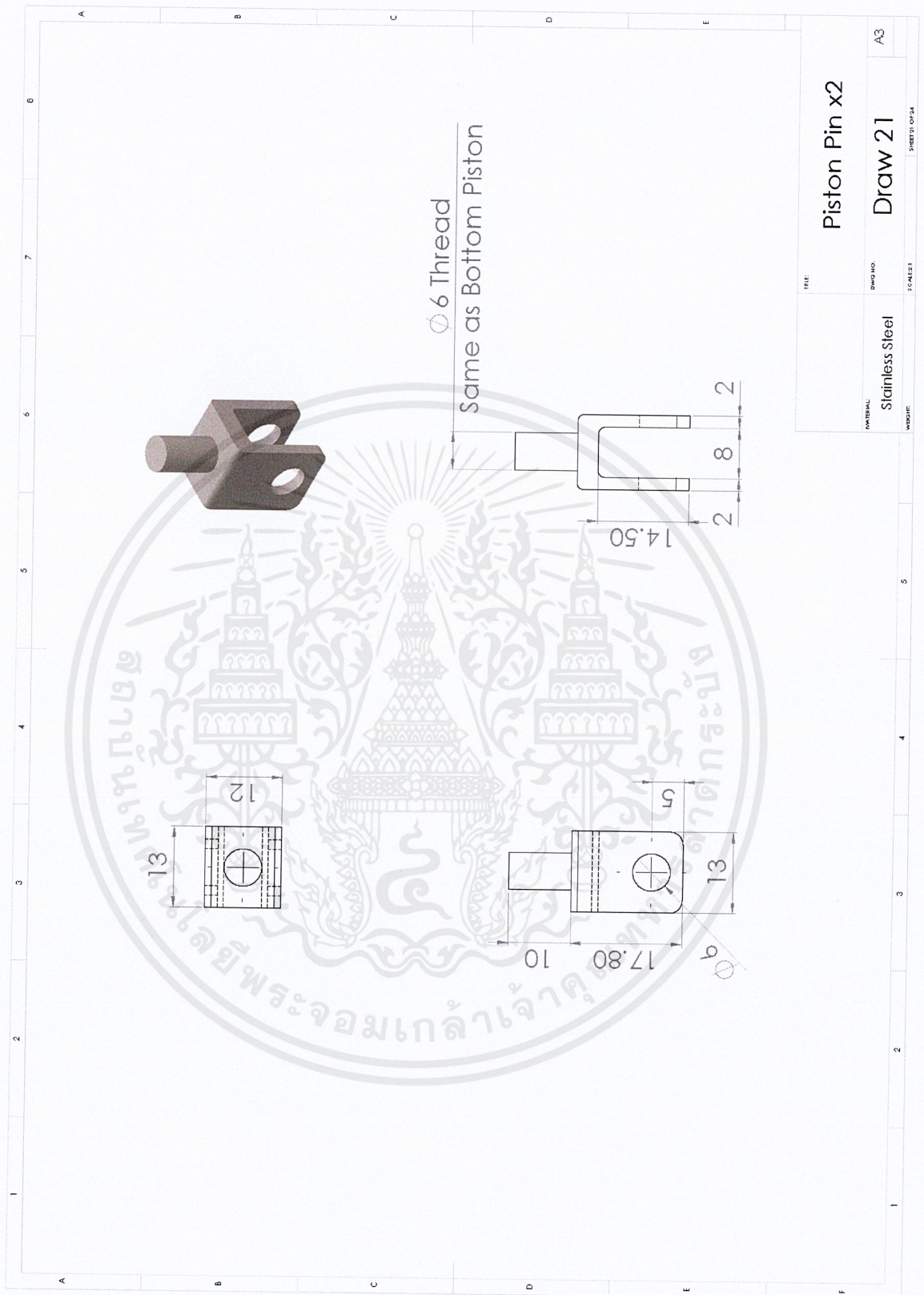
รูปที่ ก.19 ก้านลูกสูบชนิดส้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



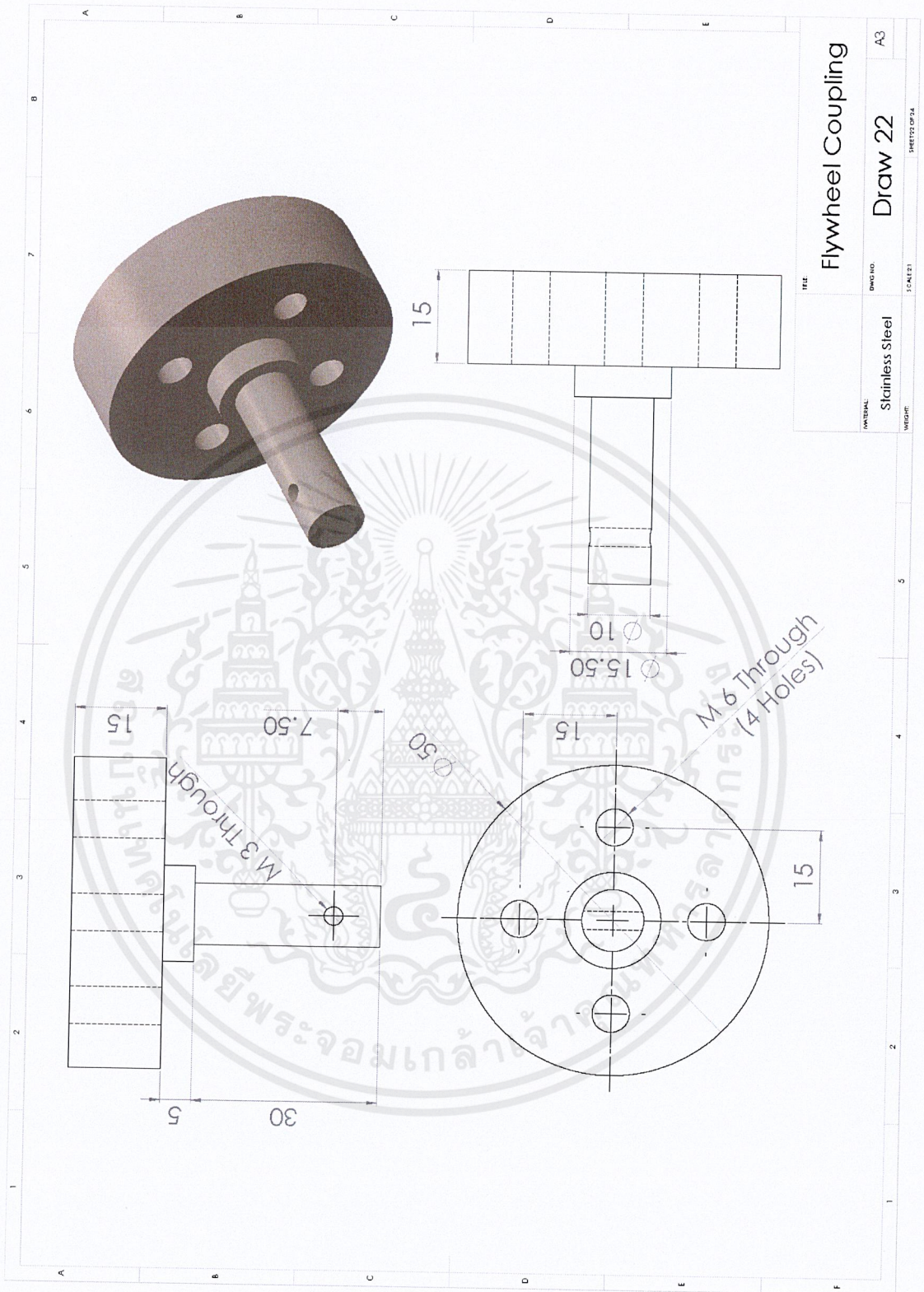
รูปที่ ก.20 ก้านลูกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



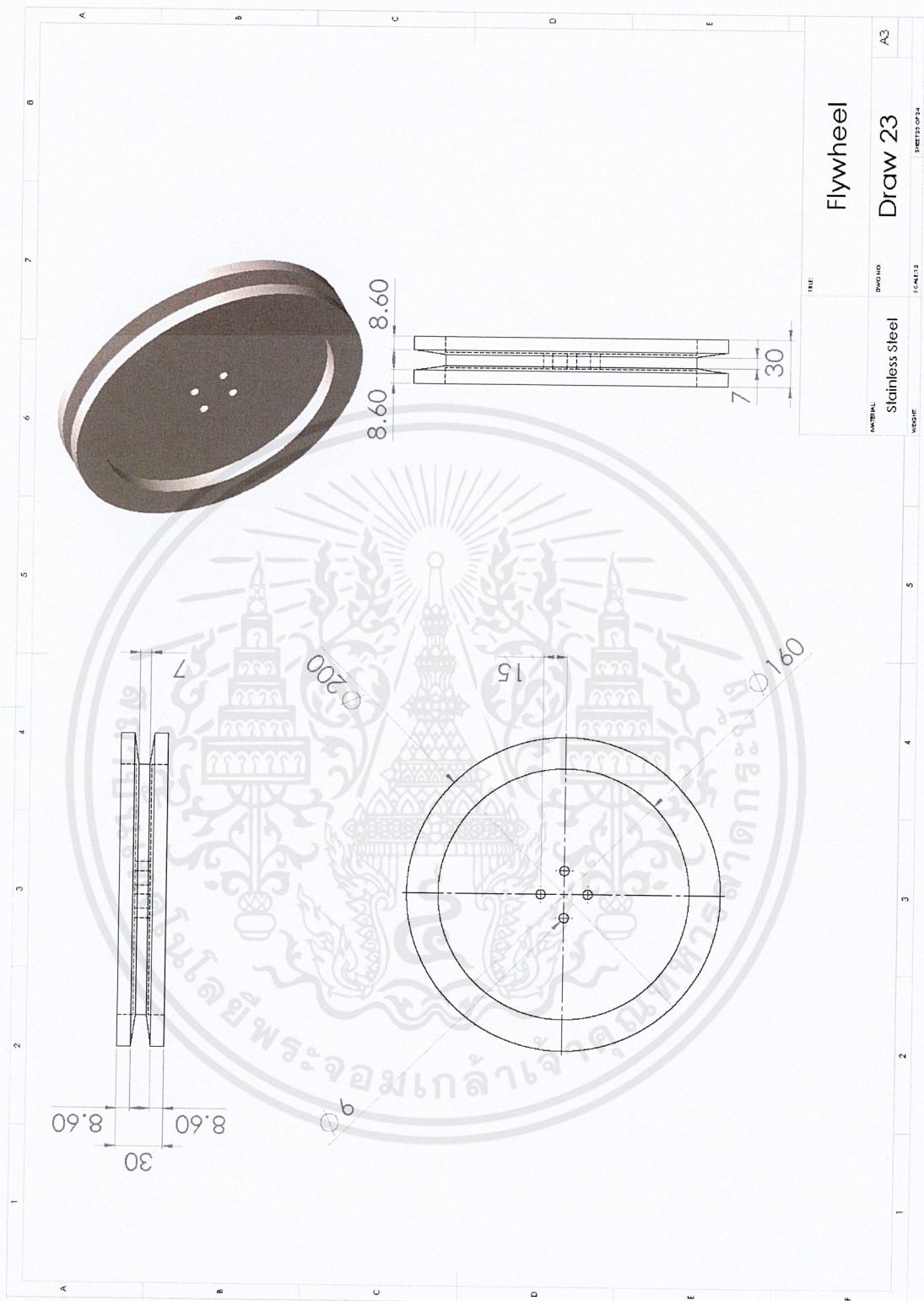
รูปที่ ก.21 หมุดยึดลูกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



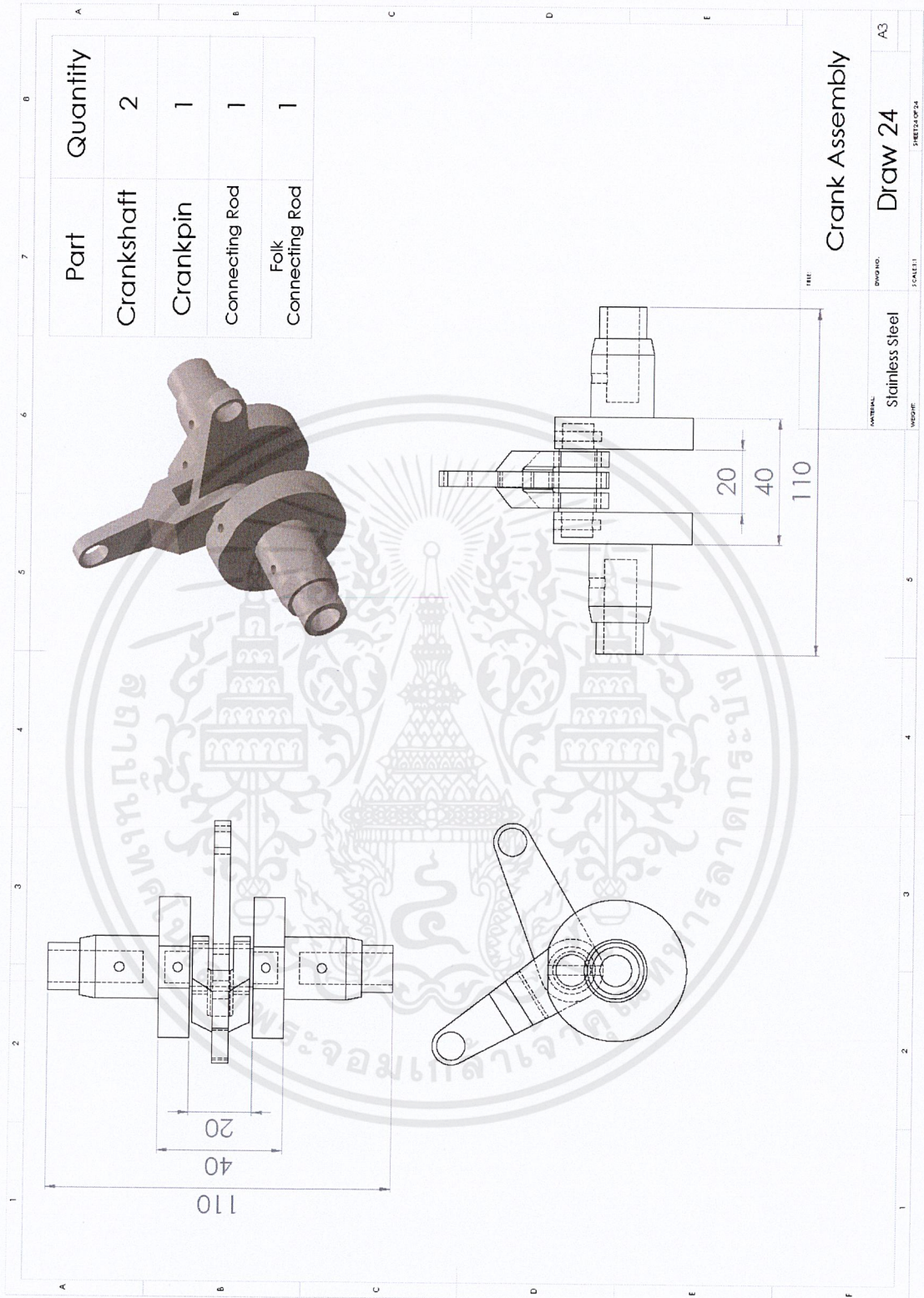
รูปที่ ก.22 ยอยล้อตุนกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.23 ล้อตุนก่าลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.24 ภาพประกอบเพลาคูรื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้