

การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟากลไกผลิตกำลังสองทางสี่สูบ

DESIGN OF AN ALPHA-TYPE STIRLING ENGINE  
WITH DOUBLE ACTING PISTONS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาผลิตกำลังสองทางสี่สูบ

DESIGN OF AN ALPHA-TYPE STIRLING ENGINE  
WITH DOUBLE ACTING PISTONS



T143866

จิรภัทร  
ชนชิต  
ชยุตม์

เลิศศุภกุล  
เพชรหว่าโจ๊ะ  
ศุภพิพัฒน์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 143866  
วัน,เดือน,ปี..... 04 ต.ค. 2559

b. 41801585  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF AN ALPHA-TYPE STIRLING ENGINE  
WITH DOUBLE ACTING PISTONS



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 การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟากลไกผลิตกำลังสองทางสี่สูบ

DESIGN OF AN ALPHA-TYPE STIRLING ENGINE WITH DOUBLE ACTING PISTONS

ผู้จัดทำ

- |               |              |              |          |
|---------------|--------------|--------------|----------|
| 1. นายจิรภัทร | เลิศศุภกุล   | รหัสประจำตัว | 55010167 |
| 2. นายชนชิต   | เพชรหว่าโจ๊ะ | รหัสประจำตัว | 55010219 |
| 3. นายชยุตม์  | คุร์พิพัฒน์  | รหัสประจำตัว | 55010241 |

  
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์  
(ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลโคผลิตกำลังสองทางสี่สูบ

นายจิรภัทร	เลิศศุภกุล	55010167
นายชนชิต	เพชรหว่าโจ๊ะ	55010219
นายชยุตม์	คุร์พิพัฒน์	55010241
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2558

### บทคัดย่อ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้กลายเป็นพลังงานจลน์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งเป้าหมายของโครงการวิจัยนี้คือ การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลโคการผลิตกำลังสองทาง โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานจลน์ภายใต้ผลต่างของอุณหภูมิในส่วนร้อนและส่วนเย็นของกระบอกสูบ เครื่องยนต์ต้นแบบนี้มีกระบอกสูบจำนวนสี่กระบอก แต่ละกระบอกสูบเชื่อมต่อกันด้วยรีเจนเนอเรเตอร์และคูลเลอร์ ลูกสูบภายในกระบอกสูบทำหน้าที่เป็นทั้งลูกสูบไล่และลูกสูบกำลัง เรียกว่า "กลไกผลิตกำลังสองทาง" ด้วยกลไกผลิตกำลังสองทางนี้จะทำให้สามารถผลิตงานได้มากกว่าเครื่องยนต์ที่มีกลไกผลิตกำลังทางเดียว เมื่อเครื่องยนต์ทำงานกลไกส่งกำลังรอสส์ยอร์คจะทำหน้าที่ส่งงานจากการเคลื่อนที่ขึ้นลงของลูกสูบไปขับเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ ในส่วนของการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงของโครงการวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและทำการสร้างโมเดลสามมิติของเครื่องยนต์ต้นแบบเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของชิ้นส่วนต่างๆ ในภายในเครื่องยนต์ และจากการออกแบบเครื่องยนต์จะทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงสุด 650 องศาเซลเซียส และสามารถผลิตกำลังได้สูงสุด 30 วัตต์

สืบบทคัดย่อ

## DESIGN OF AN ALPHA-TYPE STIRLING ENGINE WITH DOUBLE ACTING PISTONS

Jirapat	Lertsupakul	55010167
Chonnachit	Petwango	55010219
Chayut	Koolpipat	55010241
Assis.Prof.Dr.Sutapat Kwankaomeng Advisor		
Year 2558		

### ABSTRACT

There are many sources of free energy available in the form of heat or thermal energy so an effective way to convert it into useful energy such as mechanical energy is using a Stirling engine. This project is aimed to design and build an Alpha-type Stirling engine with double acting piston. The Stirling engine is powered by thermal energy and convert to mechanical energy under temperature difference of hot and cold spaces according to gas expansion and contraction, respectively. The prototype engine consists of four cylinders, each cylinder is interconnected and contained one piston. The piston is worked as a displacer and a power piston simultaneously because the working gas on both hot and cold sides act alternately on the piston called double acting motion. By using the double acting motion can produce more power than the single acting motion. Connecting port is attached between hot space of one cylinder and cold space of another to transfer the working gas between contraction and extension sections, consecutively. When the engine runs, Ross Yoke mechanism is used to transmit power for dual piston motion into rotational motion driving crankshaft. The Stirling engine was analyzed by using numerical method and 3D SolidWork model. The prototype engine was designed for operation at maximum temperature is 650 °C and the expected output power is produced at most 30 watts.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง อาจารย์ที่ปรึกษา และขอขอบพระคุณอาจารย์บรรเทิง ศิลป์สกุลสุข จากมหาวิทยาลัยสยาม ที่ช่วยให้คำแนะนำและแนวคิดต่างๆในการทำงานครั้งนี้ ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทที่ห้องทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงการนี้เพื่อให้งานดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

และสุดท้ายต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายจิรภัทร

นายชนชิต

นายชยุตม์

เลิศศุภกุล

เพชรหว่าโจ๊ะ

ศุภพิพัฒน์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบสมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา	
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประวัติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	4
2.2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	4
2.3 รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	5
2.3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟา	5
2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบเบต้า	5
2.3.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแกมมา	6
2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาผลิตกำลังสองทาง	6
2.4.1 ส่วนประกอบสำคัญ	7
2.5 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	8
2.5.1 วัฏจักรสเตอร์ลิง	8
2.5.2 ทฤษฎีของ Schmidt	9

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.3 ทฤษฎีของ Beale	12
2.6 กลไกโรสส์ยอร์ค	12
2.7 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในปัจจุบัน	13
<b>บทที่ 3 การออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบ</b>	<b>18</b>
3.1 แนวคิดของการออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบ	18
3.2 สมมติฐานของการออกแบบ	18
3.3 การออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน	18
3.3.1 กระจบอกลูบ(Cylinder)	18
3.3.2 ครีบริบความร้อน(Heating Fin)	19
3.3.3 ครีบริบายความร้อน(Cooling Fin)	22
3.4 การออกแบบชิ้นส่วนส่งกำลัง	23
3.4.1 การออกแบบเพลา(Shaft)	23
3.4.2 การออกแบบบรอสส์ยอร์ค(Ross Yoke) และเพลาข้อเหวี่ยง(Crank Shaft)	25
3.5 การออกแบบล้อช่วยแรง(Flywheel)	27
<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์วัฏจักรของเครื่องยนต์</b>	<b>29</b>
4.1 สมมติฐานของการวิเคราะห์	29
4.2 ขนาดและขีดจำกัดของเครื่องยนต์ต้นแบบ	29
4.3 การวิเคราะห์ที่กลไกโรสส์ยอร์ค	30
4.4 การวิเคราะห์วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ	31
4.5 การวิเคราะห์วัฏจักรสเตอร์ลิงแบบอุณหภูมิคงที่	32
4.6 การวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดย Beale	37
4.7 เปรียบเทียบกำลังที่ได้จากทฤษฎีต่างๆ	38
<b>บทที่ 5 ชิ้นส่วนและเครื่องยนต์ต้นแบบ</b>	<b>39</b>
5.1 ชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์	39

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.1 กระบอกสูบ	39
5.1.2 ครีประบายความร้อน	39
5.1.3 ลูกสูบ	40
5.1.4 ก้านสูบ	40
5.1.5 รอสส์ยอร์ค	41
5.1.6 เพลาข้อเหวี่ยง	41
5.1.7 เพลาส่งกำลัง	42
5.1.8 ล้อช่วยแรง	42
5.1.9 ฐานรองกระบอกสูบ	43
5.1.10 ฐานรองเครื่องยนต์	43
5.2 รุปรวมชิ้นส่วนส่วนผลิตกำลัง	44
5.3 รุปรวมชิ้นส่วนส่วนส่งกำลัง	45
5.4 เครื่องยนต์ต้นแบบ	45
บทที่ 6 การออกแบบการทดลอง	47
6.1 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องยนต์	47
6.1.1 วิธีทดสอบแบบ Robe Brake	47
6.2 การคำนวณกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์	47
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	49
7.1 สรุปผลการวิจัย	49
7.2 ข้อเสนอแนะ	51
บรรณานุกรม	52
ภาคผนวก	53

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของ Stainless Steel - Grade 304 (UNS S30400)	18
3.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างส่วนรับความร้อนที่ไม่มีครีบกับมีครีบก	22
4.1 แสดงขนาดและขีดจำกัดของเครื่องยนต์	29
4.2 แสดงค่าที่ได้จากวัฏจักรในอุดมคติ	32
4.3 แสดงค่าที่ได้จากวัฏจักรแบบอวนหมุมคิงที่	37
4.4 แสดงการเปรียบเทียบกำลังที่ได้จากทฤษฎีต่างๆ	38
7.1 แสดงขนาดของเครื่องยนต์	49



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการศึกษา	3
2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาและกลไกโรสส์ยอร์ก	5
2.2 ภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า	6
2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแกรมม่า	8
2.4 แสดงส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาผลิตกำลังสองทาง	7
2.5 ด้านซ้ายคือแผนภาพ P-V และด้านขวาคือ T-S ของวัฏจักรสเตอร์ลิง	8
2.6 แสดงลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา	10
2.7 แสดงกลไกโรสส์ยอร์ก	12
2.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบซินพัลส์	13
2.9 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงของบริษัทที่อยู่ต่อเรือคอคคัม	14
2.10 ระบบการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากบริษัทที่อยู่ต่อเรือคอคคัม	14
2.11 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบแสงอาทิตย์	14
2.12 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ถูกประยุกต์ใช้ในระบบแสงอาทิตย์	15
2.13 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบพลังงานยั่งยืน	15
2.14 เครื่องยนต์ STM Power	16
2.15 รูปตัดขวางเครื่องยนต์ STM Power	16
2.16 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงของบริษัทวิสเปอร์เทค	17
3.1 แสดงลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนของครีบริบความร้อน	20
3.2 แสดงวงจรความร้อนของครีบริบความร้อน	20
3.3 แสดงขนาดของครีบริบที่ออกแบบไว้	21
3.4 แสดงประสิทธิภาพของครีบริบทรงต่างๆ	21
3.5 แสดงวงจรความร้อนของครีบริบายความร้อน	22
3.6 แสดงขนาดของครีบริบที่ออกแบบไว้	22
3.7 แสดงประสิทธิภาพของครีบริตามแนวรัศมี	23
3.8 แสดงรูปร่างของเพลาส่งกำลัง	24
3.9 แสดงกลไกโรสส์ยอร์ก	26
4.1 แสดงกลไกโรสส์ยอร์ก	30
4.2 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของกลไกโรสส์ยอร์ก	31

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรที่เปลี่ยนไปจากวัฏจักรในอุดมคติ	32
4.4 แสดงลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา	33
4.5 โค้ดที่ใช้วิเคราะห์ในโปรแกรม MATLAB จากทฤษฎีของ Schmidt	35
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรที่เปลี่ยนไปจากทฤษฎีของ Schmidt	35
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนไปกับบองคาของเพลลาข้อเหวี่ยง จากทฤษฎีของ Schmidt	36
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับบองคาของเพลลาข้อเหวี่ยงจากทฤษฎีของ Schmidt	36
4.8 แสดงค่าของ Beale Number	38
5.1 แสดงกระบอกสูบ	39
5.2 แสดงครีบริบายความร้อน	39
5.3 แสดงลูกสูบ	40
5.4 แสดงก้านสูบ	40
5.5 แสดงรอสส์ยอร์ค	41
5.6 แสดงเพลลาข้อเหวี่ยง	41
5.7 แสดงเพลลาส่งกำลัง	42
5.8 แสดงล้อช่วยแรง	42
5.9 แสดงฐานรองกระบอกสูบ	43
5.10 แสดงฐานรองเครื่องยนต์	43
5.11ก. แสดงชิ้นส่วนส่วนผลิตกำลังประกอบด้วยกระบอกสูบและครีบริบายความร้อน	44
5.11ข. แสดงชิ้นส่วนส่วนผลิตกำลังประกอบด้วยลูกสูบและฐานรองลูกสูบ	44
5.12 แสดงชิ้นส่วนส่วนส่งกำลังประกอบด้วยรอสส์ยอร์ค เพลลาและเพลลาข้อเหวี่ยง	45
5.13 แสดงเครื่องยนต์ต้นแบบที่ไม่มีลูกสูบ	45
5.14 แสดงเครื่องยนต์ต้นแบบ	46
5.15 แสดงภายในฐานเครื่องยนต์ต้นแบบ	46
6.1 แสดงวิธีการทดสอบแบบ Robe Brake	47
8.1 แสดงก้านสูบที่มีปัญหา	50

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 Cylinder	54
ก.2 Piston2	55
ก.3 Piston1	56
ก.4 Regentube	57
ก.5 Coolerfin	58
ก.6 Coldchambertube	59
ก.7 Plate	60
ก.8 Rod01	61
ก.9 Rod02	62
ก.10 Platecylinder	63
ก.11 Modirossyoke	64
ก.12 Pinyoke	65
ก.13 Crank	66
ก.14 Shaft-yoke	67
ก.15 Shaft-mid	68
ก.16 Shaft-flywheel	69
ก.17 Shaft-bearing	70
ก.18 Plateyoke#1	71
ก.19 Plateyoke#2	72
ก.20 Locking level	73
ก.21 Flywheel	74

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา

พลังงานมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น พลังงานกล พลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน แต่ในยุคปัจจุบัน พลังงานกลถือเป็นสิ่งที่มนุษย์ไม่สามารถขาดได้ อาจกล่าวได้ว่าเป็นปัจจัยที่หนักสำหรับมนุษย์ เนื่องจาก พลังงานกลสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย เช่น นำไปผลิตกระแสไฟฟ้า นำไปเป็นแหล่งขับเคลื่อน ยานพาหนะ ดังนั้นหากเรามีอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานรูปแบบต่างๆให้เป็นพลังงานกลได้โดยปราศจากมลพิษและไม่ทำอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งกำลังเป็นปัญหาใหญ่ของโลกในยุคปัจจุบัน และจากการค้นคว้า ผู้วิจัยพบว่าเครื่องยนต์ชนิดหนึ่งที่สามารถใช้แหล่งพลังงานได้หลากหลายประเภท และไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ซึ่งก็คือ “เครื่องยนต์สเตอร์ลิง”

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่ถือกำเนิดขึ้นในปี ค.ศ.1816 โดย นายโรเบิร์ต สเตอร์ลิง เครื่องยนต์สเตอร์ลิงถือเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกที่ใช้ของไหลทำงานในสถานะแก๊สภายใต้ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน เมื่อความร้อนในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นจะทำให้อากาศในกระบอกสูบขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเย็นให้กับกระบอกสูบด้านตรงข้ามก็จะทำให้อากาศหดตัว ทำให้เกิดแรงดันให้ลูกสูบ เคลื่อนที่กลับไปมาที่อยู่ภายในกระบอกสูบ เกิดเป็นพลังงานกลหรืองานอย่างต่อเนื่อง โดยความร้อน จะถูกป้อนให้กับเครื่องยนต์ทางด้านใดด้านหนึ่งแล้วผลิตงานออกมาตราบเท่าที่ ยังคงมีความร้อนป้อน อยู่ เนื่องจากหลักการทำงานของเครื่องยนต์ต้องการเพียงความแตกต่างของอุณหภูมิของแหล่งความร้อน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงถือว่าเป็นเครื่องยนต์สะอาด และสามารถใช้แหล่งเชื้อเพลิงได้หลาย ประเภท ไม่ว่าจะเป็นถ่านหิน ขยะจากการเกษตร หรือความร้อนเหลือใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ก็เพียงพอที่จะขับเคลื่อนเครื่องยนต์ได้แล้ว

จากการศึกษาของผู้วิจัยยังพบข้อมูลอีกว่า เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีอยู่หลายรูปแบบ แต่ที่ผู้วิจัย ต้องการศึกษานั้นเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟา เนื่องจากเครื่องยนต์รูปแบบแอลฟานั้นเป็น รูปแบบที่ให้กำลังงานสูงกว่ารูปแบบอื่นๆที่ปริมาตรเท่ากัน และโดยปกติเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบ แอลฟาจะสามารถผลิตกำลังได้ทางเดียวคือทางด้านของลูกสูบกำลัง แต่ปริญาณิพนธ์เล่มนี้จะ ทำการศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาที่มีกลไกผลิตกำลังสองทาง เนื่องจากกำลังงานขา ออกที่ได้จะมีค่ามากกว่าเครื่องยนต์ที่มีกลไกผลิตกำลังทางเดียว

ปริญาณิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาเรื่อง “การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟา กลไกผลิตกำลังสองทางสี่สูบ” โดยผู้วิจัยเริ่มทำการศึกษาดังแต่ขั้นตอนการออกแบบไปจนถึง กระบวนการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟา กลไกผลิตกำลังสองทางสี่สูบ และเมื่อสร้าง เครื่องยนต์เสร็จจะทำการทดสอบกำลังงานที่เครื่องยนต์ผลิตได้และเปรียบเทียบผลการวิจัยเพื่อนำ ผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาวิจัยการทำงานและการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟากลไกการผลิตกำลังสองทาง(Double-Acting)
2. ออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟา ซึ่งมีกลไกการผลิตกำลังสองทาง (Double-acting)
3. สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟา ซึ่งมีกลไกการผลิตกำลังสองทาง (Double-acting)
4. เป็นเครื่องยนต์ต้นแบบเพื่อใช้ในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

## 1.3 ข้อสมมติฐานของการศึกษา

การออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาผลิตกำลังสองทางสี่สูบ ตามทฤษฎีแก๊สอุดมคติจะได้กำลังงาน 100 วัตต์ แต่หากคำนวณจากทฤษฎีของบีลและซิมิทซ์ซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าจะได้กำลังงานไม่เกิน 35 วัตต์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ 32 มิลลิเมตร ระยะชัก 22 มิลลิเมตร และมีความดันทำงานไม่เกิน 5 บาร์ ตัวแปรที่มีผลต่อกำลังงานของเครื่องยนต์ที่ผลิตได้ คือ อุณหภูมิของแหล่งความร้อน ความดันทำงาน ปริมาตรกวาด และปริมาตรตาย(dead volume)

## 1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ออกแบบและสร้างเป็นรูปแบบแอลฟา มีลูกสูบ 4 ลูกสูบ
2. ใช้กลไกโรสส์ยอร์กในการส่งกำลังไปยังเพลลาข้อเหวี่ยง
3. ใช้อากาศเป็นสารทำงาน
4. ใช้อากาศเป็นสารหล่อเย็น
5. ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบ
6. กำลังผลิตอย่างมาก 100 วัตต์

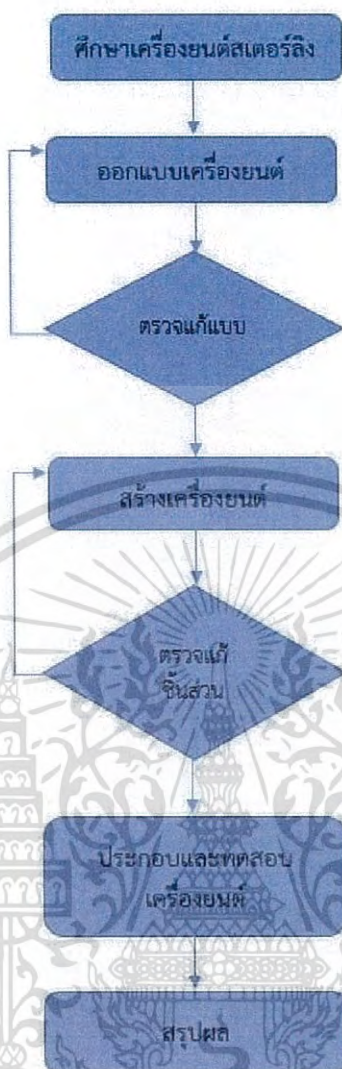
## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างองค์ความรู้ และประสบการณ์จากการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
2. สามารถนำความรู้และประสบการณ์ที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
3. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สร้างขึ้นสามารถเป็นต้นแบบในการศึกษาและพัฒนาต่อไป
4. สามารถนำเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สร้างขึ้นไปใช้งานได้จริง

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาหลักการการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากสื่อและสิ่งพิมพ์ต่างๆ รวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
2. ออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาผลิตกำลังสองทาง(Double-acting) โดยที่ออกแบบให้มีจำนวนลูกสูบ 4 ลูกสูบ
3. เขียนและตรวจแก้แบบเครื่องยนต์ ตามที่ได้ออกแบบไว้ ลงในโปรแกรม SolidWorks
4. สร้าง ตรวจสอบและแก้ชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์
5. ประกอบเครื่องยนต์และทดสอบพร้อมเก็บข้อมูลและสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการศึกษา

### 1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา

1. มีทรัพยากรไม่เพียงพอต่อการสร้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่มีความละเอียดสูง
2. ในขั้นตอนการสร้างเครื่องยนต์ไม่สามารถควบคุมได้ทุกขั้นตอน
3. ขณะทดสอบเครื่องยนต์มีตัวแปรบางอย่างที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ปริมาณความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์ ความดันทำงาน อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ประวัติของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงหรือเครื่องจักรสเตอร์ลิง คือเครื่องยนต์สันดาปภายนอกที่สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย ขอเพียงมีแหล่งพลังงานความร้อน เครื่องยนต์ก็สามารถทำงานได้ ถูกสร้างขึ้นโดย นายโรเบิร์ต สเตอร์ลิง เมื่อปี ค.ศ. 1816 เป็นที่รู้จักกันในชื่อเครื่องยนต์อากาศร้อน โดยจะมีก๊าซบรรจุอยู่ภายในกระบอกสูบ ทำงานโดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อความร้อนในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นจะทำให้อากาศในกระบอกสูบขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเย็นให้กับกระบอกสูบด้านตรงข้ามก็จะทำให้อากาศหดตัว ทำให้เกิดแรงดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่สลับไปมาที่อยู่ภายในกระบอกสูบ เกิดเป็นพลังงานกลหรืองานอย่างต่อเนื่อง โดยความร้อนจะถูกป้อนให้กับเครื่องยนต์ทางด้านใดด้านหนึ่งแล้วผลิตรงานออกมาตราบเท่าที่ยังคงมีความร้อนป้อนอยู่

นายโรเบิร์ต สเตอร์ลิง เป็นคนประเทศอังกฤษที่มีเชื้อสายสก๊อตแลนด์ มีอาชีพเป็นนักบวชแต่มีงานอดิเรกเป็นนักประดิษฐ์ ซึ่งแรงบันดาลใจในการผลิตเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือ เขาต้องการผลิตเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยมากกว่าเครื่องจักรไอน้ำในสมัยนั้น ที่มีจะมีการระเบิดทำให้มีผู้เสียชีวิต และเขาได้สร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้สำเร็จในปี ค.ศ. 1816 หลังจากนั้น 55 ปี ทฤษฎีทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้พัฒนาขึ้นโดย กัสทาบ ซมิทท์(Gustav Schmidt) ในปี 1871 โดยสมการหลักที่ใช้คือ สมการอนุกรมวงกลม สมการแก๊สอุดมคติ และสมการการเคลื่อนที่แบบรูปคลื่นไซน์(Sinusoidal) และหลังจากนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงก็ได้รับการพัฒนาเรื่อยมา

### 2.2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ความร้อนอย่างง่ายอีกรูปแบบหนึ่งที่ใช้สารทำงานประเภทอัดตัวได้เนื่องจากสารทำงานอยู่ในระบบปิด จึงไม่มีปัญหาเรื่องการปนเปื้อนและสิ้นเปลืองสารทำงาน แต่การถ่ายเทความร้อนให้แก่สารทำงานเป็นเรื่องที่สำคัญ ดังนั้นเพื่อการถ่ายเทความร้อนที่ดีสารทำงานควรจะมีอัตราการไหลเชิงมวลสูง และมีความหนืดต่ำเพื่อลดแรงเสียดทานเนื่องจากความหนืด ควรใช้ความดันในระบบสูง หรือใช้สารทำงานความหนืดต่ำและความดันสูงคู่กัน

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นงานทางกลได้สูงในทางทฤษฎีโดยการใช้วัฏจักร Carnot ขีดจำกัดของการทำงานของเครื่องยนต์จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้สร้างประสิทธิภาพเครื่องยนต์ที่ดีเยี่ยมจะอยู่ในช่วง 30% ถึง 40% โดยมีอุณหภูมิทำงานอยู่ระหว่าง 923-1073K และความเร็วรอบจะอยู่ในช่วง 2000-4000 รอบต่อนาที

การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอยู่ในระบบปิด โดยสารทำงานที่ใช้คืออากาศสามารถอธิบายได้ดังนี้

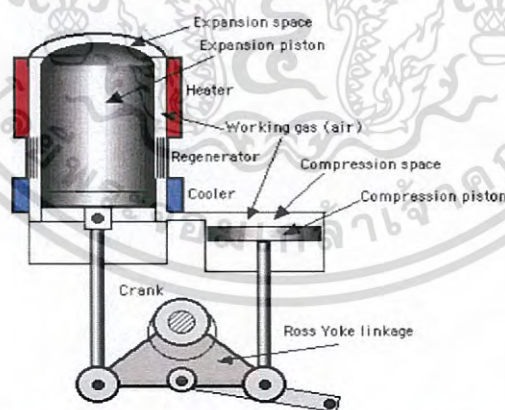
1. ในกระบอกสูบมีของไหลทำงานซึ่งก็คืออากาศ เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้อากาศเกิดการขยายตัว และความดันภายในกระบอกสูบก็จะเพิ่มขึ้น ถ้าให้ปลายด้านหนึ่งของกระบอกสูบมีลูกสูบที่เคลื่อนที่ได้โดยไม่มีการรั่วไหลของอากาศ ความดันที่เพิ่มขึ้นภายในกระบอกสูบจะดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ออกไปทำให้ปริมาตรกระบอกสูบขยายตัว
2. เมื่ออากาศภายในกระบอกสูบขยายตัวก็จะเกิดการไหลของอากาศไปยังส่วนระบายความร้อน ทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำลง เกิดการหดตัวของอากาศ ความดันในส่วนเย็นก็จะลดลงเป็นผลให้ลูกสูบสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย
3. เมื่อลูกสูบในส่วนเย็นเคลื่อนที่ดันอากาศกลับมายังส่วนระบายความร้อนและผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ จะทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น อากาศจะเริ่มขยายตัวอีกครั้งและดันลูกสูบด้านร้อนให้เคลื่อนที่เช่นกัน
4. เมื่อกระบวนการในข้อ 1 ถึง 3 เกิดขึ้นซ้ำ กำลังงานที่เกิดจากลูกสูบจะถูกส่งไปสะสมในล้อช่วยแรง เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถเดินได้ราบรื่นขึ้น

## 2.3 รูปแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมี 3 รูปแบบ

### 2.3.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟา

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาประกอบไปด้วย ลูกสูบขยายซึ่งจะเคลื่อนที่อยู่ในกระบอกสูบร้อน เรียกว่า ส่วนร้อน ความร้อนจะถ่ายเทเข้าสู่ของไหลทำงานผ่านกระบอกสูบร้อน เมื่อของไหลทำงานขยายตัวดันลูกสูบจะได้งานออกมา ลูกสูบอัดซึ่งจะเคลื่อนที่อยู่ในกระบอกสูบเย็น เรียกว่า ส่วนเย็น ความร้อนจะถูกถ่ายเทออกจากของไหลทำงานผ่านกระบอกสูบเย็น พร้อมกับการอัดตัวเป็นการให้งานกับระบบ ส่วนระหว่างร้อนและเย็นเรียกว่า รีเจนเนอเรเตอร์

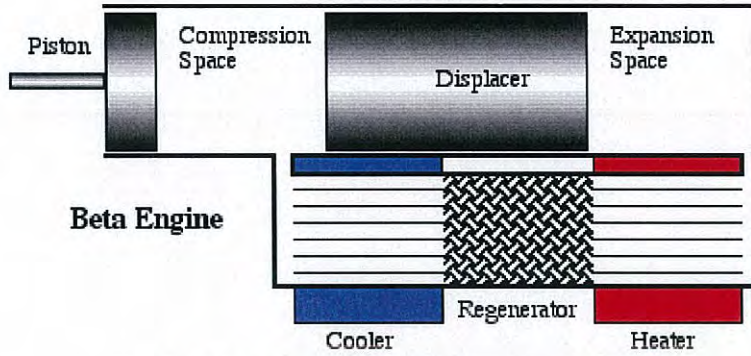


รูปที่ 2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาและกลไกโรสส์ยอร์ก

### 2.3.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบเบต้า

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบเบต้าจะมีดีสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังในกระบอกเดียวกัน โดยที่ลูกสูบไล่จะดันสารทำงานระหว่างในส่วนร้อนและส่วนเย็นของกระบอกสูบให้ผ่าน ส่วนให้ความร้อน รีเจนเนอเรเตอร์ และส่วนระบายความร้อน ลูกสูบเย็นอยู่ในส่วนเย็นของกระบอกสูบ ทำหน้าที่อัดของไหลทำงานเมื่อของไหลทำงานอยู่ในส่วนเย็น และขยายตัวเมื่อของไหลทำงานเคลื่อนที่ไปยังส่วนร้อน

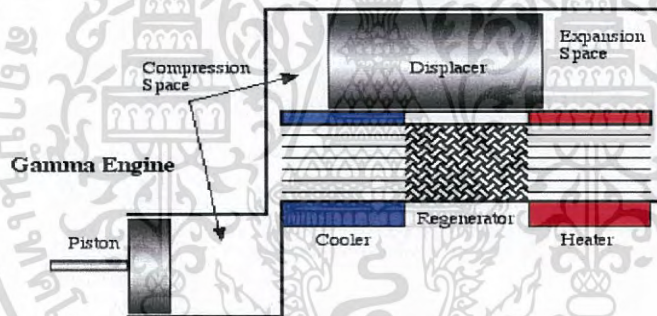
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า

### 2.3.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแกรมม่า

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแกรมม่าจะมีกระบอกสูบแยกออกจากกันสำหรับลูกสูบไล่และลูกสูบกำลัง โดยทั้งสองกระบอกสูบเชื่อมต่อกันและมีหลักการการทำงานเช่นเดียวกับเบต้า รูปแบบแกรมม่าที่มีการส่งกำลังจากทั้งสองลูกสูบไปที่เพลาคือข้อเหวี่ยงข้อเดียวกัน มีประสิทธิภาพเชิงกลที่สูงที่สุดในทางทฤษฎี อย่างไรก็ตามกระบอกสูบควรออกแบบให้อยู่ในแนวตั้งเพื่อลดแรงเสียดทาน

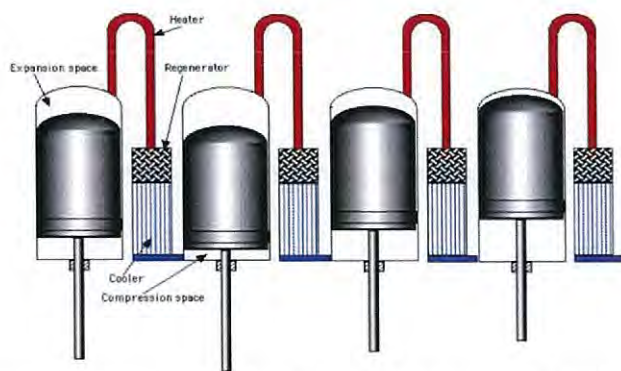


รูปที่ 2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแกรมม่า

## 2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาผลิตกำลังสองทาง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาผลิตกำลังสองทางเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สามารถผลิตงานได้มากกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาแบบทั่วไปที่ปริมาตรกวาดเท่ากัน ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์ทั่วไป โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาผลิตกำลังสองทางนี้ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นอย่างหลากหลายเนื่องจากเป็นนวัตกรรมใหม่จึงทำให้มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาผลิตกำลังสองทาง จะแบ่งปริมาตรของกระบอกสูบออกเป็นสองส่วนร้อนและส่วนเย็นในกระบอกสูบเดียว เป็นกลไกที่ประกอบไปด้วยกระบอกสูบและลูกสูบเป็นคู่ที่สมมาตรกัน คู่ละ 1 ชุด ส่วนที่ร้อนของกระบอกสูบหนึ่งจะเชื่อมกับส่วนที่เย็นของอีกกระบอกสูบหนึ่ง เรียกว่า "กลไกผลิตกำลังสองทาง" เมื่อเครื่องยนต์ทำงาน ลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นลงสัมพันธ์กันโดยจะมีเฟสต่างกันในแต่ละลูกสูบเท่ากับ  $90^\circ$  และส่งกำลังนี้จะทำให้เพลาคงหมุนเพื่อขับเคลื่อนล้อช่วยแรงต่อไป



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลโคผลิตกำลังสองทาง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลโคผลิตกำลังสองทางเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สามารถผลิตงานได้มากกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาแบบทั่วไปที่ปริมาตรกวาดเท่ากัน ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์ทั่วไป โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลโคผลิตกำลังสองทางนี้ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นอย่างหลากหลายเนื่องจากเป็นนวัตกรรมใหม่จึงทำให้มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลโคผลิตกำลังสองทาง จะแบ่งปริมาตรของกระบอกสูบออกเป็นสองส่วนร้อนและส่วนเย็นในกระบอกสูบเดียว เป็นกลไกที่ประกอบไปด้วยกระบอกสูบและลูกสูบเป็นคู่ที่สมมาตรกัน คู่ละ 1 ชุด ส่วนที่ร้อนของกระบอกสูบหนึ่งจะเชื่อมกับส่วนที่เย็นของอีกกระบอกสูบหนึ่ง เรียกว่า "กลไกผลิตกำลังสองทาง" เมื่อเครื่องยนต์ทำงาน ลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นลงสัมพันธ์กันโดยจะมีเฟสต่างกันในแต่ละลูกสูบเท่ากับ  $90^\circ$  และส่งกำลังนี้จะทำให้เพลลาหมุนเพื่อขับเคลื่อนล้อช่วยแรงต่อไป

#### 2.4.1 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลโคผลิตกำลังสองทาง

##### 1. ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน

เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานด้วยการขยายตัวและหดตัวของสารทำงานภายในกระบอกสูบ โดยการขยายและหดตัวของอากาศนั้นเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลทำงาน ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนจึงจำเป็นอย่างมาก หากให้ความร้อนสูงมากเกินไปจะทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์เกิดความเสียหายได้ แต่หากให้ความร้อนน้อยเกินไป เครื่องยนต์ก็ไม่สามารถทำงานได้เช่นกัน

ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบ่งได้ 2 ส่วนคือ ส่วนรับความร้อนทำหน้าที่นำความร้อนเข้าสู่ระบบและส่วนระบายความร้อนทำหน้าที่นำความร้อนออกจากกระบอกสูบ การออกแบบทั้ง 2 ส่วนนี้จำเป็นต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของวัสดุ ความทนทานต่อความร้อนและความสามารถในการนำความร้อนอีกด้วย

##### 2. ลูกสูบ(piston)

ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลโคผลิตกำลังสองทาง ลูกสูบจะทำหน้าที่เป็นทั้งลูกสูบกำลังและลูกสูบไล่ เนื่องจากกลไกผลิตกำลังสองทางจะใช้ส่วนเย็นของอีกกระบอกสูบหนึ่งเป็นลูกสูบไล่แทน ดังนั้นการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงการไหลของอากาศ ความแข็งแรงของวัสดุ ความสามารถในการทนความร้อน และความเสียดทานของผิวสัมผัส

### 3. รีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator)

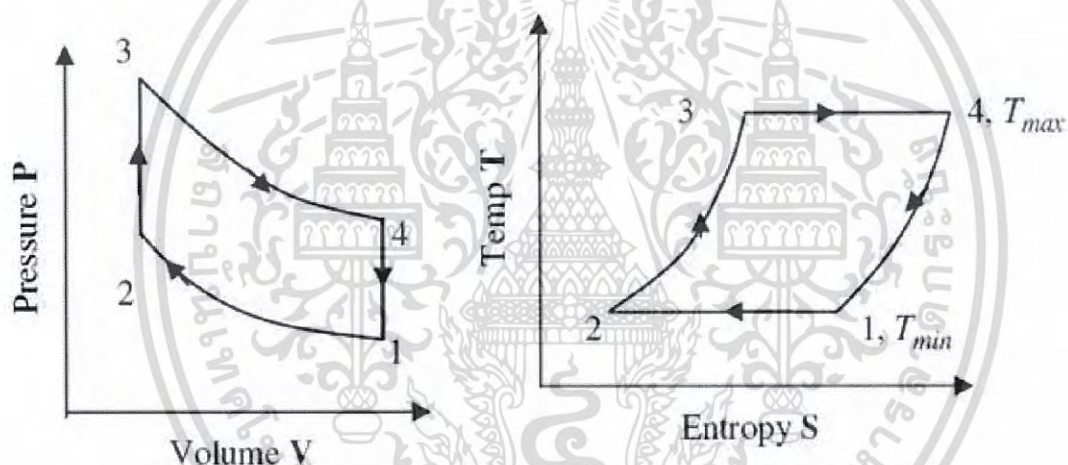
เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลทำงาน แต่การส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เร็วเกินไปอาจทำให้เครื่องยนต์ผลิตกำลังได้น้อยลง รีเจนเนอเรเตอร์เป็นส่วนที่ช่วยในการทำงานของเครื่องยนต์ โดยทำการเก็บกักพลังงานความร้อนให้ผ่านไปสู่ส่วนระบายความร้อนให้น้อยที่สุด โดยประสิทธิภาพของรีเจนเนอเรเตอร์นั้นมีสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยตรง

ในการออกแบบรีเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยถูกต้องแม่นยำนั้นมีความซับซ้อน แต่สามารถสรุปให้เรียบง่ายลงโดยใช้การคำนวณจากความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพและพลังงานความร้อนต่อหนึ่งรอบวัฏจักร โดยมีหลักเกณฑ์สำคัญประกอบไปด้วยขนาด วัสดุและขนาดของรีเจนเนอเรเตอร์

## 2.5 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

### 2.5.1 วัฏจักรสเตอร์ลิง

วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติจะคล้ายกับวัฏจักรของ Carnot โดยจะเป็นวัฏจักรที่ย้อนกลับได้แบบอุณหภูมิกงที่และแบบปริมาตรคงที่ ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวัฏจักร Carnot ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 ด้านซ้ายคือแผนภาพ P-V และด้านขวาคือ T-S ของวัฏจักรสเตอร์ลิง

กระบวนการที่ 1-2 การอัดตัวแบบอุณหภูมิกงที่ ลูกสูบอัดเคลื่อนที่เข้าสู่รีเจนเนอเรเตอร์ ขณะที่ลูกสูบขยายไม่มีการเคลื่อนที่ ของไหลทำงานถูกอัดตัวทำให้ความดันเพิ่มขึ้นจาก  $P_1$  เป็น  $P_2$  เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนตลอดช่วงการอัดจึงทำให้อุณหภูมิกงที่ สมการการวิเคราะห์ดังนี้

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (2.1)$$

กระบวนการที่ 2-3 การเพิ่มความดันแบบปริมาตรคงที่ โดยที่ลูกสูบทั้งคู่มีการเคลื่อนที่ ลูกสูบอัดเคลื่อนที่เข้าสู่รีเจนเนอเรเตอร์ ลูกสูบขยายเคลื่อนที่ออกจากรีเจนเนอเรเตอร์ เพื่อรักษาปริมาตรให้คงที่ ของไหลทำงานเคลื่อนที่ผ่านรีเจนเนอเรเตอร์จากปริมาตรอัด (Compress Volume) เข้าสู่ปริมาตรขยาย (Expansion Volume) ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก  $T_2$  เป็น  $T_3$  ใช้สมการการวิเคราะห์ดังนี้

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการที่ 3-4 การขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ ลูกสูบขยายเคลื่อนออกจากรีเจนเนอเรเตอร์อย่างต่อเนื่อง ขณะที่ลูกสูบอัดไม่มีการเคลื่อนที่ ความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ระบบด้วยอุณหภูมิคงที่ ความดันลดลง เป็นกระบวนการที่ให้งาน สมการการวิเคราะห์ดังนี้

$$P_3V_3 = P_4V_4 \quad (2.3)$$

กระบวนการที่ 4-1 การลดความดันแบบปริมาตรคงที่ โดยลูกสูบบมีการเคลื่อนที่ทั้งคู่ ของไหลทำงานเคลื่อนที่ผ่านรีเจนเนอเรเตอร์จากห้องขยายตัวเข้าสู่ห้องอัดตัว จึงทำให้อุณหภูมิลดลงจาก  $T_4$  เป็น  $T_1$  สมการการวิเคราะห์ดังนี้

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_4}{T_4} \quad (2.4)$$

ประสิทธิภาพของวัฏจักรสเตอร์ลิงมีค่าใกล้เคียงกับวัฏจักร Canot หากแต่พิจารณาการทำงาน จะเห็นว่า เป็นการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเท่านั้น เพราะวัฏจักรในทางปฏิบัติการอัดตัวหรือขยายตัวในกระบวนการอุณหภูมิคงที่นั้นทำได้ยาก เพราะต้องสร้างพื้นที่รับความร้อนขนาดใหญ่มากฉะนั้นวัฏจักรสเตอร์ลิงนี้จึงเป็นวัฏจักรในเชิงอุดมคติเท่านั้น สามารถใช้สมการต่อไปในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

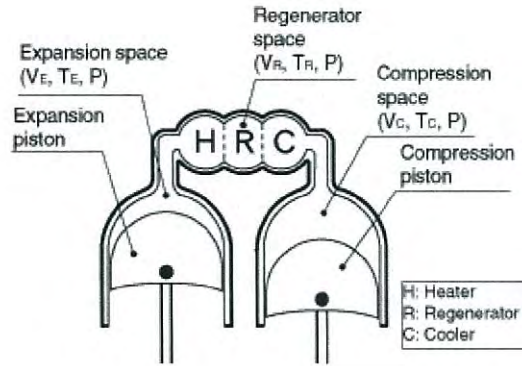
$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (2.5)$$

### 2.5.2 ทฤษฎีของ Schmidt

เป็นทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยทฤษฎีของ Schmidt นี้จะตั้งอยู่ภายใต้สมมติฐานสำคัญที่ว่าลูกสูบบมีการเคลื่อนที่สอดคล้องกัน อุณหภูมิของทุกๆจุดคงที่และมีรีเจนเนอเรเตอร์ที่สมบูรณ์แบบ โดยการวิเคราะห์จะยังคงความเป็นอุดมคติไว้เพียงบางอย่าง ซึ่งทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อย

โดยทฤษฎีของ Schmidt จะเป็นคำนวณอย่างง่ายตายโดยใช้รูปทรงเรขาคณิตภายในกระบอกสูบ เมื่อมวลของสารทำงานและอุณหภูมิจะถูกกำหนดไว้ และความดันจะคำนวณโดยใช้วิธีก๊าซในอุดมคติตั้งแสดงในสมการต่อไปนี้

$$PV = mRT \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

ปริมาตรขยายอธิบายด้วยสมการ

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos(x)) + V_{DE} \quad (2.7)$$

ปริมาตรอัดอธิบายด้วยสมการ

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} (1 - \cos(x - dx)) + V_{DC} \quad (2.8)$$

ปริมาตรรวมเท่ากับ

$$V = V_E + V_C + V_R \quad (2.9)$$

มวลของสารทำงานในเครื่องยนต์ได้จากสมการ

$$m = \frac{PV_E}{RT_E} + \frac{PV_C}{RT_C} + \frac{PV_R}{RT_C} \quad (2.10)$$

อัตราส่วนอุณหภูมิ อัตราส่วนปริมาตรกวาด และอัตราส่วนปริมาตรตายต่างๆหาได้จาก

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (2.11)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (2.12)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (2.13)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SC}} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (2.15)$$

อุณหภูมิของรีเจนเนอเรเตอร์

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$a = \tan^{-1} \left( \frac{v \sin(dx)}{t + \cos(dx)} \right) \quad (2.17)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} \quad (2.18)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \cos(dx) + V^2} \quad (2.19)$$

ความดันภายในกระบอกสูบหาได้จาก

$$P = \frac{2mRT_C}{V_{SE}(S - B \cos(x-a))} \quad (2.20)$$

ความดันเฉลี่ยจะหาได้จาก

$$P_{\text{mean}} = \frac{1}{2\pi} \oint P dx = \frac{2mRT_C}{V_{SE} \sqrt{S^2 - B^2}} \quad (2.21)$$

การทำงานบ่งชี้, กำลัง, และประสิทธิภาพ

งานบ่งชี้(พื้นที่ใต้กราฟ P-V) ในส่วนด้านขยายและด้านอัดสามารถหาได้จาก

$$W_E = \oint P dV_E = \frac{P_{\text{mean}} V_{SE} \pi c \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (2.22)$$

$$W_C = \oint P dV_C = - \frac{P_{\text{mean}} V_{SE} \pi c t \sin(a)}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (2.23)$$

ดังนั้นจะหางานบ่งชี้ได้จาก

$$W_i = W_e - W_c \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_i = \frac{P_{\text{mean}} V_{SE} \pi c (1-t) \cdot \sin(a)}{1 + \sqrt{1-c^2}} \quad (2.25)$$

และประสิทธิภาพทางความร้อนสามารถหาได้จาก

$$e = \frac{W_i}{W_E} = 1 - t \quad (2.26)$$

### 2.5.3 ทฤษฎีของ Beale

William Beale ได้ทำการสังเกตกำลังขาออกของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมาเป็นระยะเวลานาน จนกระทั่งสามารถสรุปออกมาเป็นสมการอย่างง่ายคือ

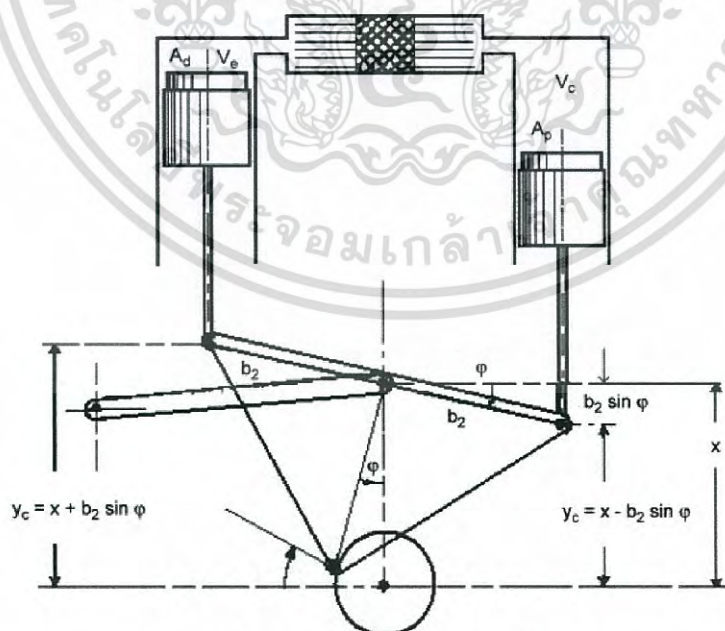
$$P_B = B_n \times P_{\text{mean}} \times f \times V_{sw} \quad (2.27)$$

## 2.6 กลไกโรสส์ยอร์ก

กลไกโรสส์ยอร์กถูกคิดค้นโดยแอนดี โรสส์ การเชื่อมโยงกันของกลไกโรสส์ยอร์กนี้จะช่วยให้ระบบส่งกำลังมีขนาดเล็กและช่วยลดภาระของเครื่องยนต์ (เนื่องจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบเกือบจะเป็นเส้นตรงทำให้แทบจะไม่มีการสูญเสียกำลังจากแรงด้านข้าง)

ขนาดของโรสส์ยอร์กจะต้องออกแบบให้สัมพันธ์กับระยะชักเพื่อให้เกิดการเสียดำแหน่งน้อยที่สุด และรัศมีของเพลาคือเหวี่ยงจะต้องคำนึงถึงขนาดของโรสส์ยอร์กและระยะชัก

ก่อนการวิเคราะห์กลไกโรสส์ยอร์ก เราต้องทราบระยะชักเพื่อใช้คำนวณหาระยะของเพลาคือเหวี่ยง แผนภาพด้านล่างแสดงสององค์ประกอบพื้นฐานของกลไกโรสส์ยอร์ก เพลาคือเหวี่ยงและมุมของเพลาคือเหวี่ยง



รูปที่ 2.7 แสดงกลไกโรสส์ยอร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการในการคำนวณมีดังนี้

$$y_c = x + b_2 \sin \phi \quad (2.17)$$

$$y_{oke} = \sqrt{b_1^2 - b_2^2} \quad (2.18)$$

$$y_{max} = \sqrt{(y_{oke} + crank)^2 - b^2} \quad (2.19)$$

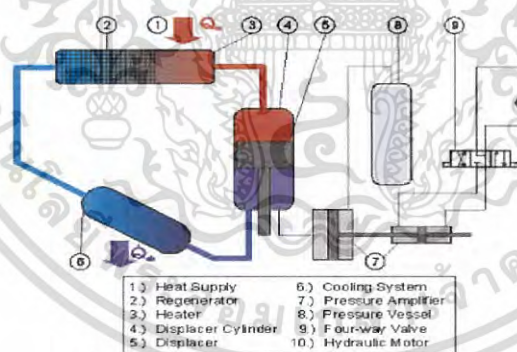
$$y_{min} = \sqrt{(y_{oke} - crank)^2 - b^2} \quad (2.20)$$

$$stroke = y_{max} - y_{min} \quad (2.21)$$

## 2.7 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในปัจจุบัน

ในปัจจุบันมีการสร้าง พัฒนาและคิดค้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงออกมาอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นเครื่องยนต์ต้นแบบเพื่อใช้สำหรับการทดลองและพัฒนาหรือเครื่องยนต์ที่พร้อมจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ต่างก็ประกอบไปด้วยกลไกการทำงานที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงาน และกำลังที่สร้างได้ โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นมีการพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและเหมาะสมต่อการใช้งานตามสภาพแวดล้อมของพื้นที่นั้นๆ ทำให้เกิดการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เช่น

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบซันพัลส์ (Sun pulse system)

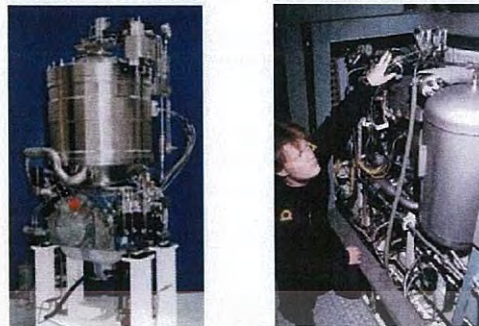


รูปที่ 2.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบซันพัลส์

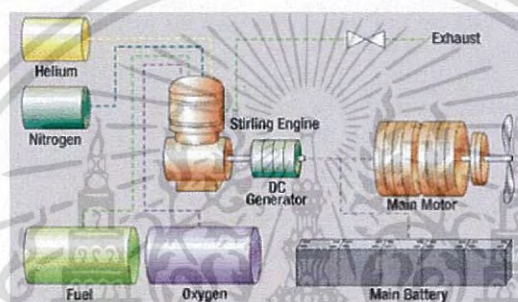
เครื่องยนต์ซันพัลส์เป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดใช้อุณหภูมิต่ำซึ่งแปลงพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้า ใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ในการทำความร้อนระบบน้ำมันหรือน้ำอัดความดัน โดยเครื่องยนต์นี้สามารถทำงานได้ทั้งเวลากลางวันและกลางคืนอันเกิดจากวิทยาการทางการจัดการพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเครื่องยนต์ซันพัลส์มีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ ประมาณครึ่งถึงกึ่งหนึ่งของแบตเตอรี่ไฟฟ้าเคมีเท่านั้น โดยออกแบบสำหรับการทำงานร่วมกับการหล่อเย็นที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อรับความร้อนเข้าสู่ระบบ เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส สามารถทำงานได้กับเชื้อเพลิงที่หลากหลาย ให้ผลลัพธ์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีตัวปั่นไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิด ให้กำลังออกมา 5-10 kW ประสิทธิภาพทางความร้อน 90% ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 35%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องยนต์สเตอร์ลิงของบริษัททู่ต่อเรือคอคคัม (Kockum's stirling engine)



รูปที่ 2.9 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงของบริษัททู่ต่อเรือคอคคัม



รูปที่ 2.10 ระบบการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากบริษัททู่ต่อเรือคอคคัม

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงของบริษัททู่ต่อเรือคอคคัมเป็นเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 4 กระบอกสูบ ออกแบบเป็นรูปแบบตัววี สารทำงานคือไฮโดรเจนหรือฮีเลียม กำลังเครื่องยนต์อยู่ที่ 25-75 kW ประสิทธิภาพมอเตอร์ 39-42 % เครื่องยนต์จะเริ่มทำงานเมื่อได้รับความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ด้านเย็นจะระบายความร้อนด้วยความเย็นอย่างยิ่งยวดจากออกซิเจนเหลว ภายในห้องเผาไหม้มีการกันรั่วและอัดความดันสามารถให้กำลังค่อนข้างสูง ด้วยลักษณะที่มีความเร็วรอบสูง ความร้อนที่ลดลงทำให้เกิดเป็นของเหลว เหลือจากสารทำความเย็น ของเหลวนั้นจะถูกระบายออกทางท่อ จุดประสงค์หลักของเครื่องคือการผลิตกระแสไฟฟ้า

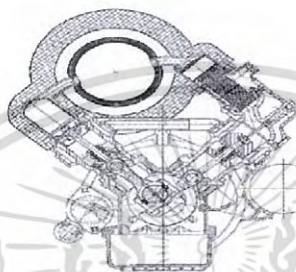
### เครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบแสงอาทิตย์ (Stirling solar system)



รูปที่ 2.11 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบแสงอาทิตย์ ถูกขึ้นทะเบียนสิทธิบัตรใน ค.ศ. 1987 โดย นายโรเอลฟ์ เจ. เมย์เจอร์ ซึ่งมีงานรวมแสงอาทิตย์รวมแสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยแสงอาทิตย์ จะถูกรวมเป็นพลังงานความร้อนใส่เข้าสู่ระบบเครื่องยนต์ แปรพลังงานความร้อนนั้นเป็นพลังงานกล ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม งานรวมแสงจำเป็นที่จะต้องหันเข้าหาดวงอาทิตย์เสมอ ซึ่ง กลายเป็นปัญหาสำคัญของเครื่องยนต์เนื่องจาก การออกแบบให้งานรวมแสงหันเข้าหาดวงอาทิตย์ได้ ตลอดเวลานั้นมีข้อจำกัดในด้านการออกแบบส่วนหล่อลื่นและการเคลื่อนไหวของเครื่องยนต์ ล่าสุด ใน ค.ศ.2011 นักประดิษฐ์ชาวแคลิฟอร์เนีย เจสัน เฉา ได้ผสมระบบแสงอาทิตย์เข้ากับระบบพลังงานลม และประยุกต์ใช้พลังงานที่ได้กับการทำปรับอากาศ, ตู้เย็น, เครื่องทำน้ำร้อนและไฟฟ้าในบ้าน



รูปที่ 2.12 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ถูกประยุกต์ใช้ในระบบแสงอาทิตย์

#### เครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบพลังงานยั่งยืน (Sustainable energy system)

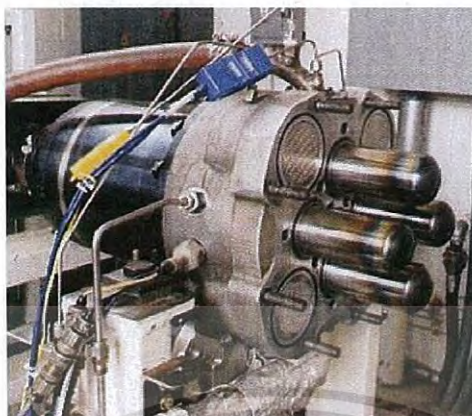
ทำงานด้วยการเผาเชื้อเพลิงชีวมวลกำลังที่ผลิตได้คือ 10 kW ใช้อากาศเป็นสารทำงานเนื่องจากการกันรั่ว ง่ายกว่าไฮโดรเจน และฮีเลียม เครื่องยนต์พัฒนาจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน จากเดิม ใช้เชื้อเพลิงเป็น ดีเซลอาจจะต้องมีการทำความสะอาดเพราะมีคราบเขม่าจากการเผาไหม้ ชีวมวล



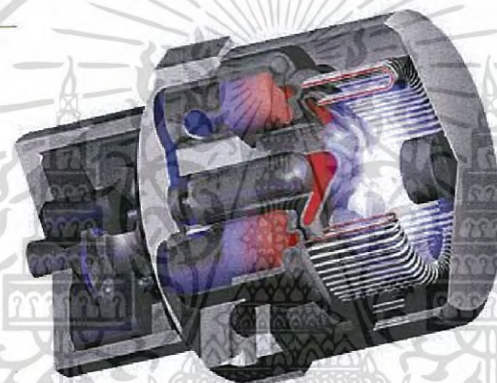
รูปที่ 2.13 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบพลังงานยั่งยืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## STM power



รูปที่ 2.14 เครื่องยนต์ STM Power



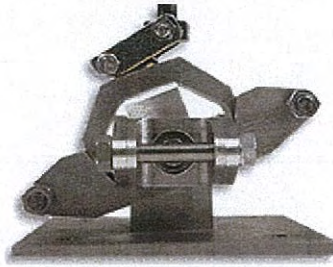
รูปที่ 2.15 รูปตัดขวางเครื่องยนต์ STM Power

เครื่องยนต์สเตอร์ลิง 4 กระบอกสูบ กลไกขับเคลื่อนใช้สวอทเพลทในการขับเคลื่อน ใช้ไฮโดรเจนเป็นสารทำงาน ทำงานได้ 2 kW ถึง 500kW ฝาครอบส่วนห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นฉนวนกันความร้อนระบายสู่สิ่งแวดล้อม มีระบบซีลกันรั่ว ความเร็วรอบอยู่ที่ 1800 รอบต่อนาที เชื้อเพลิงใช้ได้กับแหล่งพลังงานที่หลากหลาย ส่วนใหญ่นิยมใช้ แก๊สธรรมชาติ โพรเพน ดีเซล และแก๊สโซลีน

#### เครื่องยนต์สเตอร์ลิงของบริษัทวิสเปอร์เทค (Whisper tech)

เครื่องยนต์ถูกพัฒนาให้ใช้ร่วมกับเครื่องกำเนิดทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถผลิตกำลังได้ถึง 1kW ใช้ร่วมกับไฟฟ้าภายในบ้าน เพื่อแก้ไขการส่งไฟฟ้าจากโรงงานไฟฟ้าที่มีการสูญเสียกำลังทางไฟฟ้าระหว่างส่ง สำหรับประเทศที่มีอุณหภูมิร้อนชื้น กระบวนการหล่อเย็นของเครื่องยนต์ถูกนำมาใช้เป็นการทำน้ำอุ่นใช้ภายในบ้าน กลไกการส่งกำลังถูกใช้ร่วมกับวอบบเบิลยอค (wobble yoke) ออกแบบมาจากโรตอร์ค และสวอทเพลท เพื่อลดการเสียดสีของซีลกันรั่วในกระบอกสูบ เนื่องจากการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงของบริษัทวิสเปอร์เทค

สารทำงานคือไนโตรเจนเพราะมีโมเลกุลที่ใหญ่เชื้อเพลิงอาจจะเป็นของเหลวหรือแก๊ส เมื่อใช้ในบ้านนิยมใช้แก๊สหุงต้มทั่วไป การออกแบบถูกออกแบบมาใช้ภายในบ้านจึงมีขนาดเครื่องที่เล็กและมี 4 กระบอกลูกสูบ



## บทที่ 3

### การออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบ

#### 3.1 แนวคิดของการออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบ

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย เครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบนี้จะเป็นชนิดแอลฟาใช้กลไกผลิตกำลังสองทาง มีลูกสูบจำนวน 4 ลูกสูบ โดยใช้อากาศเป็นสารทำงาน และใช้กลไกรอสส์ยอร์คแบบประยุกต์ในการส่งกำลังเพื่อลดการเสียดทานของก้านสูบให้น้อยที่สุด

#### 3.2 สมมติฐานของการออกแบบ

1. ไม่มีการสูญเสียความดันในระบบ และความดันในระบบมีค่าคงที่
2. ไม่มีการสูญเสียความร้อนในระบบ
3. สมมติให้อากาศเป็นก๊าซในอุดมคติ
4. การไหลของสารทำงานเป็นแบบคงตัว
5. ให้เครื่องยนต์ทำงานที่อุณหภูมิสูงสุด 650°C อุณหภูมิต่ำสุด 65°C
6. ใช้วัสดุ Stainless Steel - Grade 304 (UNS S30400) ในการออกแบบซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางดังนี้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ Stainless Steel - Grade 304 (UNS S30400)

Property	Minimum Value (S.I.)	Maximum Value (S.I.)	Units (S.I.)
Compressive Strength	205	310	MPa
Elastic Limit	205	310	MPa
Tensile Strength	510	620	MPa
Latent Heat of Fusion	260	285	kJ/kg
Maximum Service Temperature	1023	1198	K
Melting Point	1673	1723	K
Specific Heat	490	530	J/kg.K
Thermal Conductivity	14	17	W/m.K
Thermal Expansion	16	18	10 <sup>-6</sup> /K

#### 3.3 การออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน

##### 3.3.1 กระจบอกลูกสูบ(Cylinder)

การออกแบบความหนาของกระจบอกลูกสูบจะต้องคำนึงถึงความดันสูงสุด(Maximum Pressure)ที่จะเกิดจากเครื่องยนต์ได้จากสมการ

$$\sigma_y = \frac{P_{\max} d}{2t} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $\sigma_y$  คือ ค่า Yield Strength ของวัสดุ(Pa)  
 $P_{max}$  คือ ค่าความดันสูงสุดที่กระบอกสูบสามารถรับได้(Pa)  
 $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ(m)  
 $t$  คือ ความหนาของกระบอกสูบ(m)

ทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 3.1 จะได้

$$t = \frac{P_{max}d}{2\sigma_y} = \frac{(700 \times 10^3)(3.2 \times 10^{-2})}{2(205 \times 10^6)} = 5.46 \times 10^{-5} \text{ m} = 0.0546 \text{ mm}$$

โดยกระบอกสูบจะมีความหนา 1mm เพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการสร้างและสามารถทนต่อความเค้นได้สูง

### 3.3.2 ครีบริับความร้อน(Heating Fin)

ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่กระบอกสูบที่ไม่มีครีบริบสามารถหาได้จาก

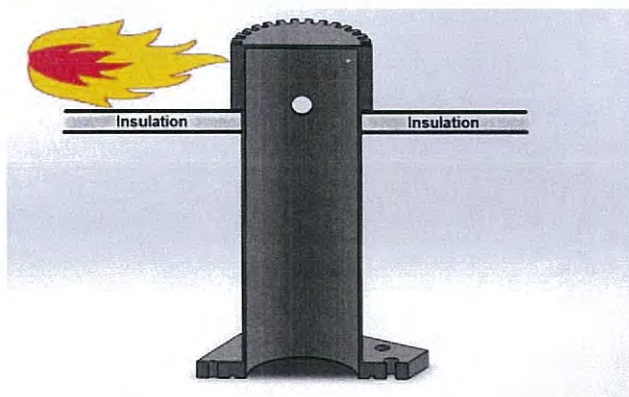
$$\dot{Q}_{in} = hA_{nofin}(T_{\infty} - T_s) \quad (3.2)$$

- เมื่อ  $\dot{Q}_{in}$  คือ ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่กระบอกสูบ(W)  
 $h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน( $\frac{W}{m^2K}$ )  
 $A_{nofin}$  คือ พื้นที่ผิวรับความร้อน( $m^2$ )  
 $T_{\infty}, T_s$  คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิพื้นผิวตามลำดับ( $^{\circ}C$ )

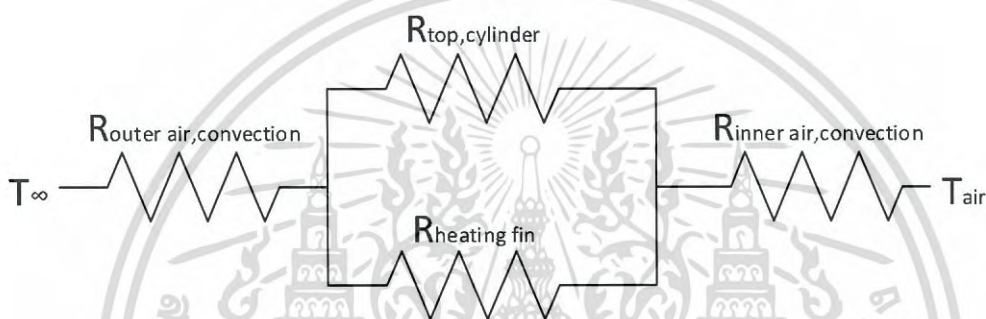
ทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการ 3.2 จะได้

$$\dot{Q}_{in} = (50)(2.8149 \times 10^{-3})(800 - 650) = 21.11 \text{ W}$$

จะเห็นได้ว่าปริมาณความร้อนที่เข้าสู่กระบอกสูบที่ไม่มีครีบริบมีค่าน้อยกว่าปริมาณความร้อนที่เครื่องยนต์ต้องการ(จะกล่าวถึงในบทถัดไป) เราจึงสร้างครีบริบความร้อนเพิ่ม เพื่อให้ความร้อนสามารถเข้าสู่ระบบได้มากขึ้น ความร้อนที่ถ่ายให้แก่กระบอกสูบจะถูกส่งมายังครีบริบและถ่ายโอนพลังงานด้วยการเหนี่ยวนำความร้อน(heat conduction) ไปให้แก่สารทำงานในเครื่องยนต์ สารทำงานจะรับความร้อนจากผนังกระบอกสูบด้วยวิธีการพาความร้อน(heat convection) ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนของครีบริับความร้อน



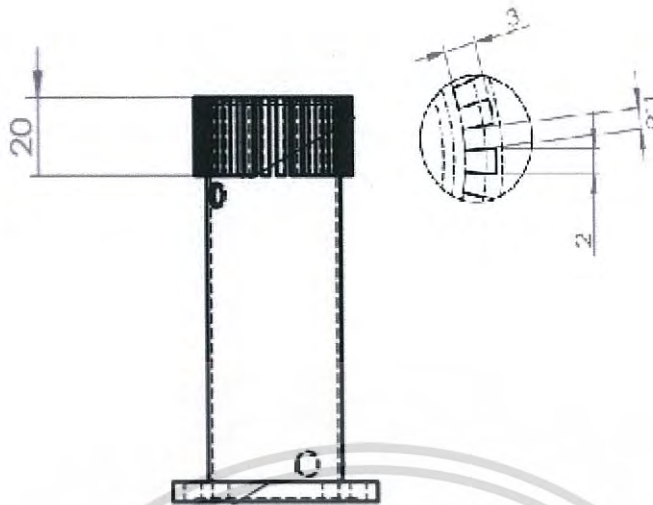
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรความร้อนของครีบริับความร้อน

เราสามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบอกสูบได้จากสมการด้านล่าง

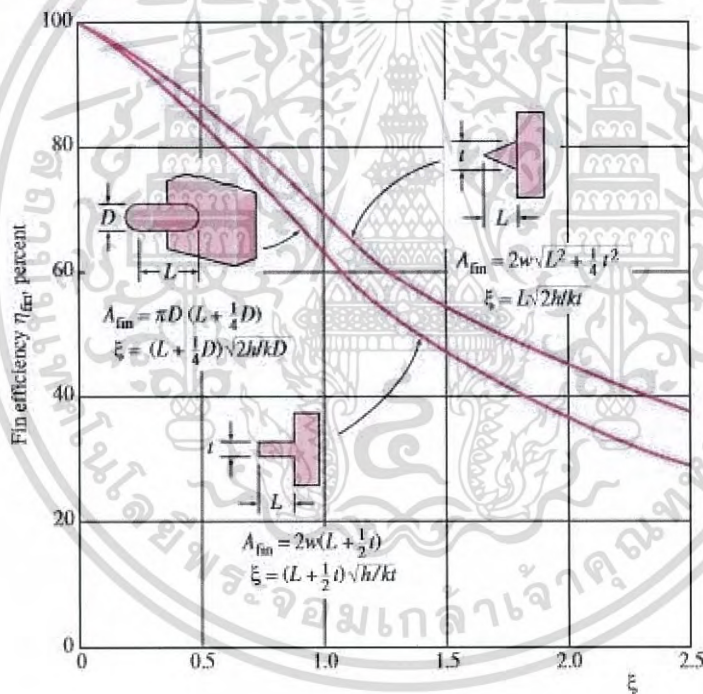
$$\dot{Q}_{in} = h(A_{unfin} + \eta_{fin}A_{fin})(T_{\infty} - T_s) \quad (3.3)$$

เมื่อ	$\dot{Q}_{in}$	คือ ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบอกสูบ(W)
	$h$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน( $\frac{W}{m^2K}$ )
	$A_{unfin}, A_{fin}$	คือ พื้นที่ผิวรับความร้อนบริเวณที่ติดครีบริับและไม่ติดครีบริับตามลำดับ( $m^2$ )
	$\eta_{fin}$	คือ ประสิทธิภาพของครีบริับความร้อน
	$T_{\infty}, T_s$	คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิพื้นผิวตามลำดับ( $^{\circ}C$ )

ครีบริับความร้อนที่ออกแบบไว้มีขนาดความหนา  $t=2mm$  ลึก  $L=3mm$  และยาว  $w=20mm$  จำนวน 30 ชุด ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของครีบอกแบบไว้



รูปที่ 3.4 แสดงประสิทธิภาพของครีบอกทรงต่างๆ

จากรูปที่ 3.4 ครีบอกรับความร้อนที่ออกแบบไว้จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 0.96 เมื่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าเท่ากับ  $50 \frac{W}{m^2K}$  จากการแทนค่าลงในสมการที่ 3.3 ทำให้เราทราบว่าปริมาณความร้อนที่เข้าสู่กระบอกสูบที่มีครีบอกรับความร้อนสามารถเข้าได้มากถึง 49.99W ซึ่งเป็นค่าที่มากเพียงพอต่อปริมาณความร้อนที่การ โดยค่านี้จะทำการเผื่อการสูญเสียความร้อนแก่สิ่งแวดล้อม, การสูญเสียความร้อนในส่วนระบายความร้อน, การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและ Shuttle effect แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างส่วนรับความร้อนที่ไม่มีครีบกับมีครีบ

ส่วนรับความร้อน	ประสิทธิภาพ	พื้นที่ผิวสัมผัส ( $\times 10^{-4} \text{ m}^2$ )	ปริมาณความร้อนที่รับได้ (W)
ไม่มีครีบ	-	28.15	21.11
มีครีบ	0.96	68.42	49.99

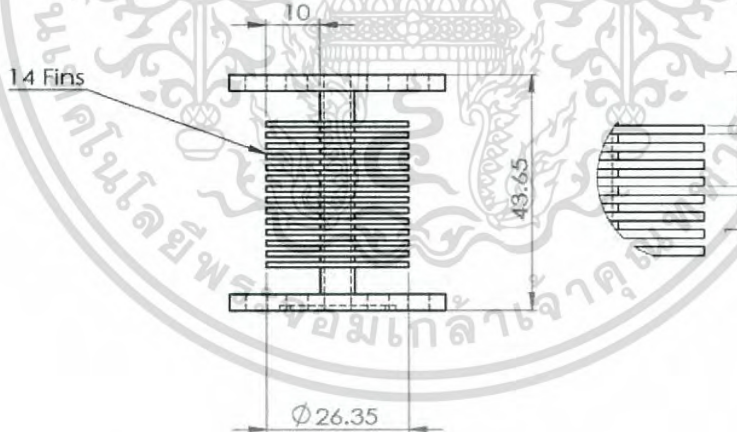
### 3.3.3 ครีบระบายความร้อน(Cooling Fin)

ความร้อนจะถูกระบายออกจากเครื่องยนต์ผ่านครีบระบายความร้อน โดยสารทำงานจะถ่ายโอนความร้อนไปให้แก่ครีบระบายความร้อนด้วยวิธีการเหนี่ยวนำความร้อน(heat conduction) และครีบระบายความร้อนจะระบายความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมด้วยการพาความร้อน(heat convection)



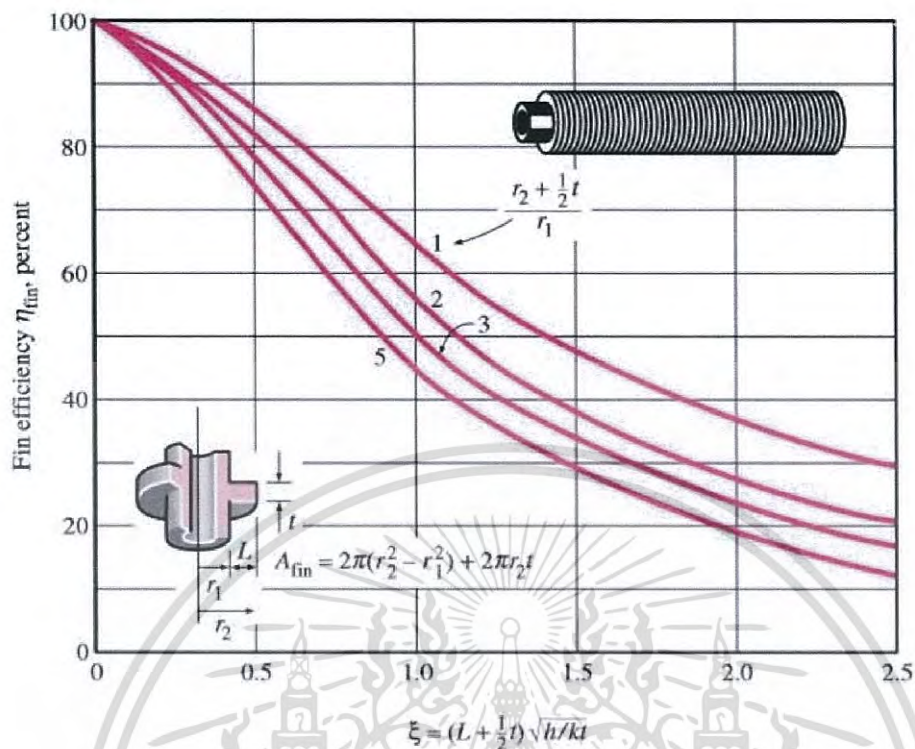
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรความร้อนของครีบระบายความร้อน

เราได้ทำการออกแบบครีบระบายความร้อนที่มีขนาดความหนา  $t=1\text{mm}$  ความกว้าง  $L=10\text{mm}$  จำนวน 14 ชุด ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดของครีบรับความร้อนที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงประสิทธิภาพของครีบบตามแนวรัศมี

จากรูปที่ 3.4 ทำให้เราทราบประสิทธิภาพของครีบบระบายความร้อนที่ออกแบบไว้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.97 และเราสามารถหาปริมาณความร้อนที่ครีบบสามารถระบายได้ได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{out} = h(A_{unfin} + \eta_{fin} A_{fin})(T_{fin} - T_{\infty}) \quad (3.4)$$

เมื่อ	$\dot{Q}_{out}$	คือ ปริมาณความร้อนที่ครีบบระบายได้(W)
	$h$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน( $\frac{W}{m^2K}$ )
	$A_{unfin}, A_{fin}$	คือ พื้นที่ผิวรับความร้อนบริเวณที่ติดครีบบและไม่ติดครีบบตามลำดับ( $m^2$ )
	$\eta_{fin}$	คือ ประสิทธิภาพของครีบบรับความร้อน
	$T_{fin}, T_{\infty}$	คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิพื้นผิวตามลำดับ( $^{\circ}C$ )

ทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 3.4 จะทำให้เราทราบว่าปริมาณความร้อนที่ครีบบสามารถระบายได้มีค่าเท่ากับ 38.87W ซึ่งมีค่าเพียงพอต่อการระบายความร้อนของเครื่องยนต์ โดยค่านี้เราได้ทำการเผื่อค่าการสูญเสียภายในระบบแล้ว

### 3.4 การออกแบบชิ้นส่วนส่งกำลัง

#### 3.4.1 การออกแบบเพลลา(Shaft)

ขนาดของเพลลาที่ออกแบบจะต้องรองรับน้ำหนัก แรงบิดและแรงเฉือนจากชิ้นส่วนต่างๆรวมไปถึงการหมุนของชิ้นส่วนนั้นๆป้องกันไม่ให้เพลลาเสียรูป โดยเลือกใช้วัสดุ Stainless Steel - Grade 304 สามารถหาแรงบิดที่จะเกิดขึ้นเมื่อเพลลาหมุนจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

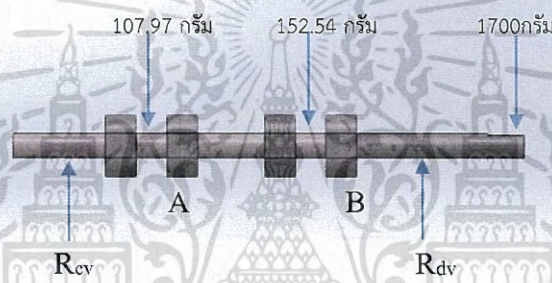
$$P = \frac{2\pi N\tau}{60} \quad (3.5)$$

เมื่อ P คือ กำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้(W)  
N คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์(rpm)  
 $\tau$  คือ แรงบิด(Torque) (Nm)

ทำการแทนค่าลงในสมการที่ 3.5 จะได้

$$\tau = \frac{70}{2\pi(600/60)} = 1.1 \text{ Nm}$$

เมื่อเครื่องยนต์ผลิตกำลังสูงสุดได้ 70W เพล่าจะมีแรงบิดเท่ากับ 1.1Nm  
เพล่าที่ออกแบบจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.8 แสดงรูปร่างของเพล่าส่งกำลัง

จากรูปที่ 3.5 เราสามารถเขียนสมการกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมได้ดังนี้  
ให้  $R_{cv} = 0$

$$0 = (((117 \times 10^{-3})(R_{DV})) + ((35 \times 10^{-3})(107.97 \times 10^{-3} \times g)) + ((87 \times 10^{-3})(152.54 \times 10^{-3} \times g)) + ((1700 \times 10^{-3} \times g)(152 \times 10^{-3})) \quad (3.6)$$

ทำการแก้สมการที่ 3.6 จะได้  $R_{DV} = 23.085$  และ  $R_{CV} = 20.384$   
และเราสามารถหาขนาดของเพล่าได้จากสมการ

$$d^3 = \frac{16}{\pi T} ((c_t \tau)^2 + (c_m M)^2)^{1/2} \quad (3.7)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพล่า(m)  
T คือ ความเค้นอนุญาตสำหรับแรงบิดในวัสดุเท่ากับ 62MPa  
 $\tau$  คือ แรงบิด(Torque)(Nm)  
M คือ โมเมนตัม(Nm)  
 $c_t, c_m$  คือ ค่าคงที่สำหรับแรงแบบกระทำทันทีทันใดเท่ากับ 1 และ 1.5 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 3.7 จะได้

$$d^3 = \frac{16}{(62 \times 10^6)\pi} ((1 \times 1.1)^2 + (1.5 \times 23 \times 10^2)^2)^{1/2}$$

จะได้  $d = 4.55\text{mm}$

ต้องการหามุมบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่เพลลาเมื่อมีแรงมากระทำโดยหาจาก

$$\theta = \frac{584\tau L}{Gd^4} \quad (3.7)$$

- เมื่อ
- $\theta$  คือ มุมบิดที่เพลลาถูกกระทำ (degree)
  - $\tau$  คือ แรงบิด (Torque) (Nm)
  - $L$  คือ ความยาวของเพลลา (m)
  - $G$  คือ โมดูลัสของแรงเฉือนสำหรับวัสดุ Stainless Steel - Grade 304 มีค่า 75GPa
  - $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา (m)

เมื่อทำการแทนค่าที่ได้ลงในสมการ 3.7 จะได้

$$\theta = \frac{584\tau L}{Gd^4} = \frac{584 \times 1.11 \times 0.162}{(75 \times 10^9)(0.0045)^4} = 3.414^\circ$$

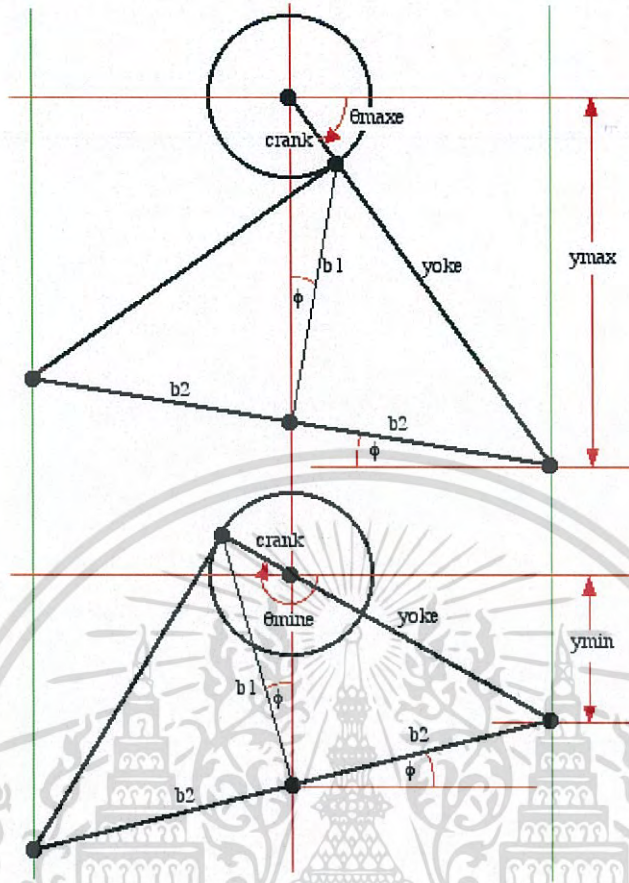
ได้มุมบิดของเพลลาเท่ากับ  $3.414^\circ$  ซึ่งมีค่ามากเกินไปเนื่องจากทำให้วัสดุเสียรูปและเมื่อเพลลามีการหมุนจะทำให้เกิดการเยื้องศูนย์กลาง ดังนั้นจึงทำการกำหนดมุมบิดใหม่ให้ไม่เกิน  $0.5^\circ$  จะได้

$$d = \sqrt[4]{\frac{584(1.11)(162 \times 10^{-3})}{(75 \times 10^9)(0.5)}} = 7.27 \times 10^{-3} \text{ m} = 7.27 \text{ mm}$$

จากการแทนค่าข้างต้นเมื่อคำนวณแล้วจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลาใหม่เท่ากับ 8mm ซึ่งง่ายต่อการสร้างและไม่ทำให้เพลลาบิดเมื่อมีการเคลื่อนไหว

### 3.4.2 การออกแบบรอสส์ยอร์ค (Ross Yoke) และเพลลาข้อเหวี่ยง (Crank Shaft)

ขนาดของรอสส์ยอร์คจะต้องออกแบบให้สัมพันธ์กับระยะชักเพื่อให้เกิดการเสียดทานน้อยที่สุด และรัศมีของเพลลาข้อเหวี่ยงจะต้องคำนึงถึงขนาดของรอสส์ยอร์คและระยะชัก



รูปที่ 3.9 แสดงกลไกรอสส์ยอร์ด

จากรูปที่ 3.6 เราออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างสับหรือ  $b_1$  และ  $b_2$  เท่ากับ 26mm เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.8 จะได้ขนาดของรอสส์ยอร์ดดังนี้

$$\text{yoke} = \sqrt{b_1^2 + b_2^2} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ 3.8 เมื่อแทนค่าแล้วจะได้ขนาดรอสส์ยอร์ดเท่ากับ 36.77mm และเราสามารถหาขนาดของเพลาค้อเหวี่ยงได้จาก

$$y_{\max} - y_{\min} = \sqrt{(\text{yoke} + \text{crank})^2 - b_2^2} - \sqrt{(\text{yoke} - \text{crank})^2 - b_2^2} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $y_{\max} - y_{\min}$  คือ ระยะของรอสส์ยอร์ดในตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับระยะชัก(mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแทนค่าลงในสมการที่ 3.9 จะได้

$$22 = \sqrt{(26\sqrt{2} + \text{crank})^2 - 26^2} - \sqrt{(26\sqrt{2} - \text{crank})^2 - 26^2}$$

จากการแทนค่าข้างต้นจะได้ crank = 7mm

### 3.5 การออกแบบล้อช่วยแรง(Flywheel)

การหาขนาดของล้อช่วยแรงสามารถคำนวณได้จากโมเมนต์ความเฉื่อยที่กักเก็บพลังงานไว้ระหว่าง การหมุนโดยสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$E_k = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (3.10)$$

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \quad (3.11)$$

เมื่อ  $E_k$  คือ พลังงานจลน์(J)  
 $I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อย( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )  
 $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม( $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ )  
 $m$  คือ มวลของล้อช่วยแรง(kg)  
 $r$  คือ รัศมีของล้อช่วยแรง(m)

จากการออกแบบเรากำหนดให้ รัศมีล้อช่วยแรงเท่ากับ 7cm ดังนั้น

$$I = \frac{1}{2}mr^2 = 2.45 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

เราสามารถหาพลังงานจลน์ต่อรอบการเดินของเครื่องยนต์ได้จาก

$$E_k = \frac{\text{Power}}{n} = \frac{70}{10} = 7 \text{ J/cycle}$$

เมื่อทำการแทนค่าลงในสมการที่ 3.10 จะได้

$$7 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} m (0.07)^2 \right) (2\pi(10))^2$$

ทำการแก้สมการข้างต้นจะได้  $m = 1.4 \text{ kg}$  และจากคุณสมบัติของ ASTM A36 ที่มี  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$  เราสามารถหาความหนาของล้อช่วยแรงได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi r^2 w} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $m$  คือ มวลของล้อยช่วยแรง(kg)  
 $r$  คือ รัศมีของล้อยช่วยแรง(m)  
 $w$  คือ ความหนาของล้อยช่วยแรง(m)  
 ทำการแทนค่าลงในสมการที่ 3.12 จะได้

$$\rho = \frac{1.4}{\pi(0.07)^2(w)}$$

จากการแทนค่าข้างต้นเราจะได้  $w = 11.58\text{mm}$  ดังนั้นความหนาของล้อยช่วยแรงความจะมีค่าใกล้เคียงกับ  
 คำนีเพื่อให้การหมุนเป็นไปอย่างราบรื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การวิเคราะห์วัฏจักรของเครื่องยนต์

### 4.1 สมมติฐานของการวิเคราะห์

1. ไม่มีการสูญเสียความดันระหว่างการไหล
2. ความดันในแต่ละส่วนของเครื่องยนต์มีค่าคงที่
3. กระบวนการหดตัวและขยายตัวของสารทำงานเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิคงที่
4. อุณหภูมิในแต่ละส่วนของเครื่องยนต์มีค่าคงที่
5. สมมติให้อากาศเป็นก๊าซในอุดมคติ
6. สมมติให้รีเจนเนอเรเตอร์มีประสิทธิภาพสูงมาก
7. ไม่มีการรั่วของสารทำงานในเครื่องยนต์
8. ปริมาตรของสารทำงานมีการเปลี่ยนแปลงแบบคลีนไซน์
9. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่

### 4.2 ขนาดและขีดจำกัดของเครื่องยนต์ต้นแบบ

จากบทที่ 3 เราได้ทำการออกแบบและหาขนาดของส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดและขีดจำกัดของเครื่องยนต์

ค่าขนาดของเครื่องยนต์ ชั้นส่วน/ตัวแปร	หน่วย	ค่า/ชนิด
ชนิดเครื่องยนต์		แอลฟา
สารทำงาน		อากาศ
การระบายความร้อน		อากาศ
ความเร็วรอบเครื่องยนต์	รอบต่อนาที	600
ความดันเฉลี่ยเครื่องยนต์	kPa	158,57
อุณหภูมิด้านร้อน	เคลวิน	923
อุณหภูมิด้านเย็น	เคลวิน	338
ปิสันัมเบอร์		0,007
Working Space		
เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ	เซนติเมตร	3,2
ระยะชักลูกสูบ	เซนติเมตร	2,2
ปริมาตรกวาด(Swept Volume)	ลูกบาศก์เซนติเมตร	17,7
Drive		
รัศมีเพลลาข้อเหวี่ยง	เซนติเมตร	0,75
รัศมีก้านสูบ	เซนติเมตร	0,8

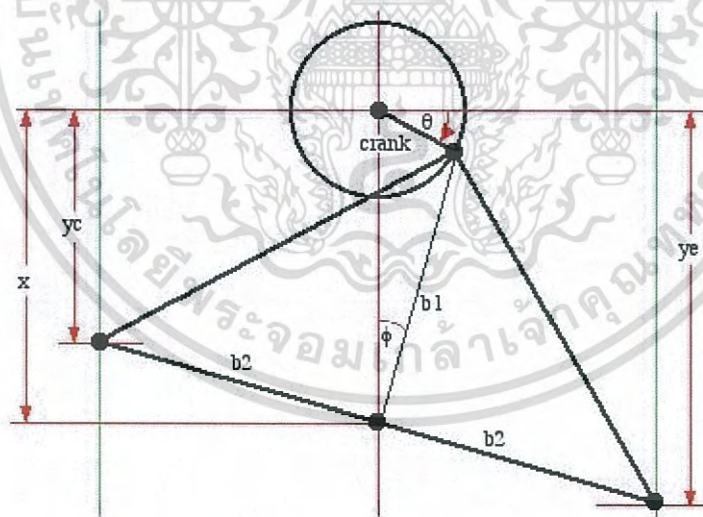
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1(ต่อ) แสดงขนาดและขีดจำกัดของเครื่องยนต์

ค่าขนาดของเครื่องยนต์ ชิ้นส่วน/ตัวแปร	หน่วย	ค่า/ชนิด
Dead Hot Space		
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	เซนติเมตร	3,2
ความสูง	เซนติเมตร	0,1
ปริมาตร	ลูกบาศก์เซนติเมตร	0,8
Connecting Tube		
เส้นผ่านศูนย์กลาง	เซนติเมตร	0.635
ความยาว	เซนติเมตร	12
ปริมาตร	ลูกบาศก์เซนติเมตร	3,8
Dead Cold Space		
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	เซนติเมตร	3,2
ความสูง	เซนติเมตร	0,2
ปริมาตร	ลูกบาศก์เซนติเมตร	1,6

### 4.3 การวิเคราะห์กลไกโรสส์ยอร์ด

เราสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลไกได้จากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงกลไกโรสส์ยอร์ด

จากรูปที่ 4.1 เราสามารถนำไปวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลไกได้โดยใช้สมการดังนี้

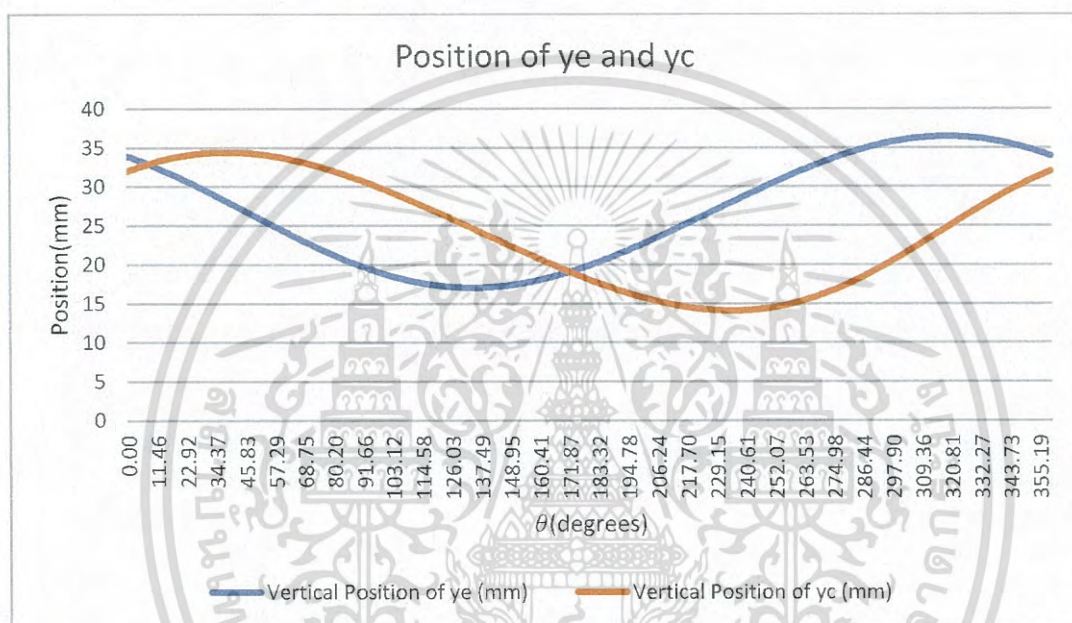
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = \text{crank} \sin(\theta) + b_1 \cos(\theta) \quad (4.1)$$

$$y_e(\theta) = \text{crank}(\sin(\theta) + \frac{b_2}{b_1} \cos(\theta)) + b\theta \quad (4.2)$$

$$y_c(\theta) = \text{crank}(\sin(\theta) - \frac{b_2}{b_1} \cos(\theta)) + b\theta \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ทำให้เราสามารถสร้างกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของกลไกโรสส์ยอร์ดได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของกลไกโรสส์ยอร์ด

#### 4.4 การวิเคราะห์วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ

วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติจะคล้ายกับวัฏจักร Carnot และจากสมมติฐานในหัวข้อ 5.1 เราสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันในกระบอกสูบกับปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

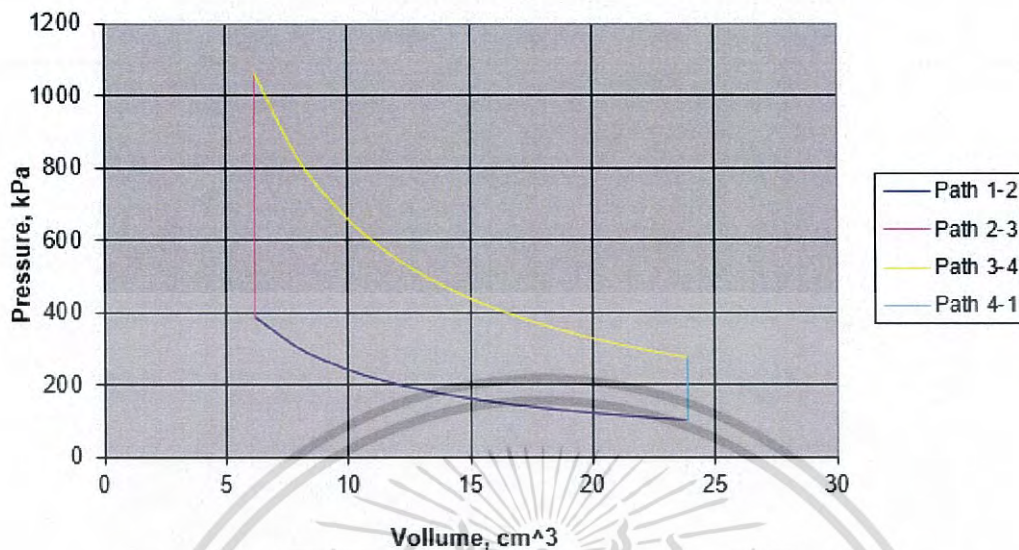
$$PV = \text{constant} \quad (4.4)$$

$$\frac{P}{T} = \text{constant} \quad (4.5)$$

ทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4.4 และ 4.5 และคำนวณค่าที่จุดวิกฤตของวัฏจักรและเมื่อนำค่าต่างๆมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันในกระบอกสูบกับปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงได้ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Ideal Stirling Cycle



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรที่เปลี่ยนไปจากวัฏจักรในอุดมคติ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าที่ได้จากวัฏจักรในอุดมคติ

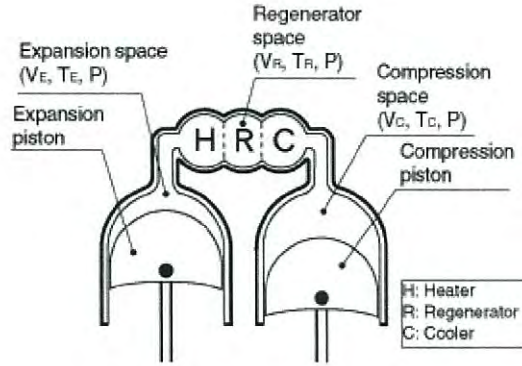
ค่าที่ได้จากวัฏจักร	หน่วย	ค่าที่ได้
ความดันสูงสุด	kPa	1062.90
ความดันต่ำสุด	kPa	101.33
ความร้อนที่ต้องจ่ายให้ต่อ 1 กระบอกสูบ	W	88.92
ความร้อนที่ต้องเอาออกต่อ 1 กระบอกสูบ	W	32.57
งานสุทธิที่ได้ต่อ 1 กระบอกสูบ	W	56.35

#### 4.5 การวิเคราะห์วัฏจักรสเตอร์ลิงแบบอุดมคติ

การวิเคราะห์วัฏจักรแบบอุดมคติที่จะใช้ทฤษฎีของ Schmidt ในการวิเคราะห์ โดยทฤษฎีของ Schmidt จะเป็นคำนวณอย่างง่ายโดยใช้รูปทรงเรขาคณิตภายในกระบอกสูบ เมื่อมวลของสารทำงานและอุณหภูมิจะถูกกำหนดไว้ และความดันจะคำนวณโดยใช้วิธีก๊าซในอุดมคติดังแสดงในสมการ

$$PV = mRT \quad (4.6)$$

จากสมมติฐานที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อ 4.1 นำมาใช้กับสมการการวิเคราะห์วัฏจักรแบบอุดมคติดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

ปริมาตรขยายอธิบายด้วยสมการ

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos(x)) + V_{DE} \quad (4.7)$$

ปริมาตรอัดอธิบายด้วยสมการ

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} (1 - \cos(x - dx)) + V_{DC} \quad (4.8)$$

ปริมาตรรวมเท่ากับ

$$V = V_E + V_C + V_R \quad (4.9)$$

มวลของสารทำงานในเครื่องยนต์ได้จากสมการ

$$m = \frac{PV_E}{RT_E} + \frac{PV_C}{RT_C} + \frac{PV_R}{RT_C} \quad (4.10)$$

อัตราส่วนอุณหภูมิ อัตราส่วนปริมาตรกวาด และอัตราส่วนปริมาตรตายต่างๆหาได้จาก

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (4.11)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (4.12)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (4.13)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SC}} \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (4.15)$$

อุณหภูมิของรีเจนเนอเรเตอร์

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2} \quad (4.16)$$

เมื่อ

$$a = \tan^{-1} \left( \frac{v \sin(dx)}{t + \cos(dx)} \right) \quad (4.17)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} \quad (4.18)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \cos(dx) + V^2} \quad (4.19)$$

ความดันภายในกระบอกสูบหาได้จาก

$$P = \frac{2mRT_c}{V_{SE}(S - B \cos(x-a))} \quad (4.20)$$

ความดันเฉลี่ยจะหาได้จาก

$$P_{\text{mean}} = \frac{1}{2\pi} \oint P dx = \frac{2mRT_c}{V_{SE} \sqrt{S^2 - B^2}} \quad (4.21)$$

เมื่อนำสมการที่ 4.6 ถึง 4.21 มาวิเคราะห์แต่เรื่องจากสมการข้างต้นมีความซับซ้อน เราจึงใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และสร้างกราฟต่างดังที่ได้ในรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clear all
t=TC/TE;
v=VSC/VSE;
XDE=VDE/VSE;
XDC=VDC/VSE;
XR=VR/VSE;
VK=VK/VSE;
VDE=0.6*10^-6; %%m^3
VR=1.9*10^-6; %%m^3
VK=1.9*10^-6; %%m^3
VDC=1.6*10^-6; %%m^3
VD=VDE+VR+VK+VDC
DensityOfAirAt60C=1.060;
m=DensityOfAirAt60C*(VD+VSE)
R=287.058; %%J*kg^-1*K^-1
TE=450+273; %%K
TC=65+273; %%K
TR=(TE+TC)/2; %%K
dx=90;
x=0:360/3;
n=10; %%hz

figure
plot(V*10^6,P/10^3,'r')
xlabel('Volume (cm^3)');
ylabel('Pressure (kPa)');
grid on

figure
plot(x,VE*10^6,'--r',x,VC*10^6)
xlabel('Crank angle (degree)');
ylabel('Volume (cm^3)');

figure
plot(x,P/10^3)
xlabel('Crank angle (degree)');
ylabel('Pressure (kPa)');

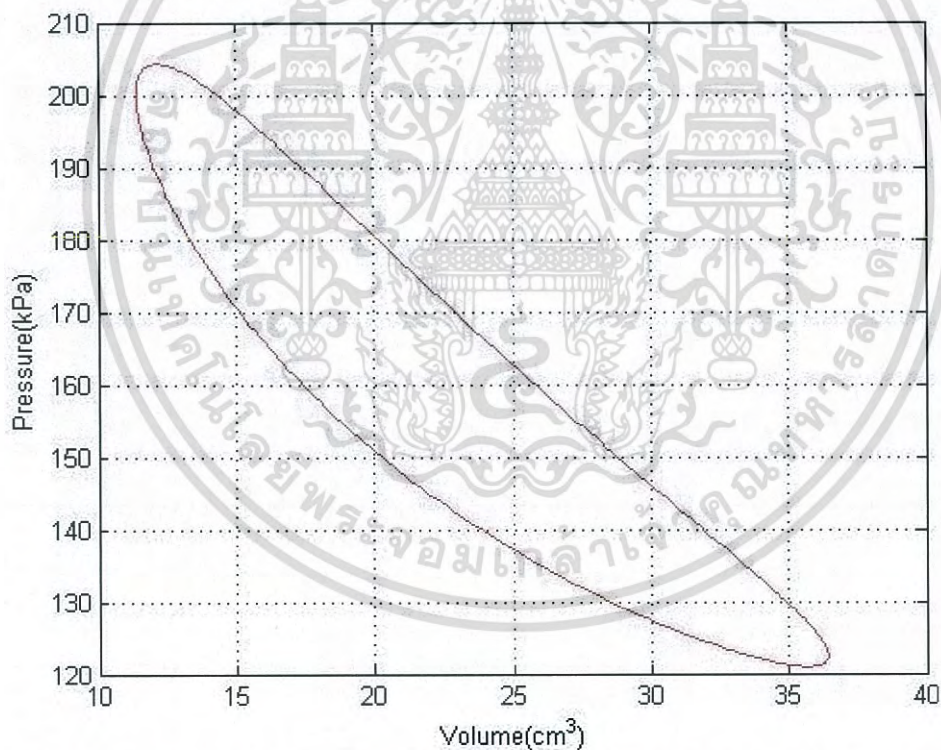
a=atan2((v*sind(dx))/(t*cosd(dx)));
S=t+2*t*XDE+((4*t*XR)/(1+t))+v+2*XDC;
B=(t^2+2*t*v*cosd(dx))^0.5;

P=(2*m*R*TC)/(VSE*(S-B*cosd(x-a)));
Pmean=(2*m*R*TC)/(VSE*(S^2-B^2)^0.5);
Pmax=max(P/10^3);
Pmin=min(P/10^3);

WC=trapz(VC,P);
WE=trapz(VE,P);
W=trapz(V,P);

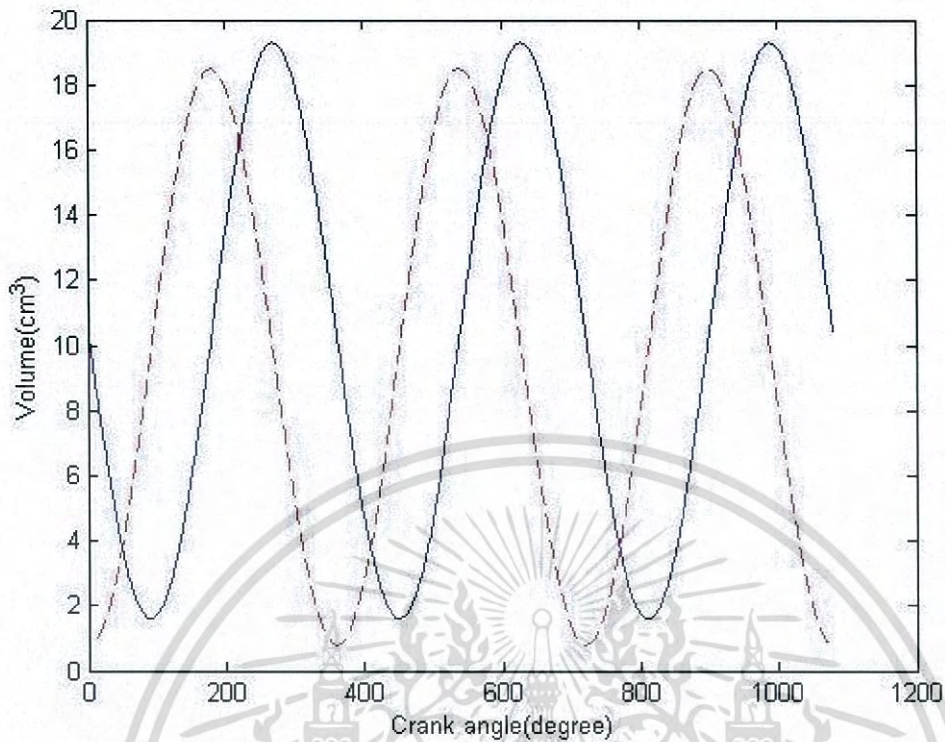
```

รูปที่ 4.5 โค้ดที่ใช้วิเคราะห์โปรแกรม MATLAB จากทฤษฎีของ Schmidt

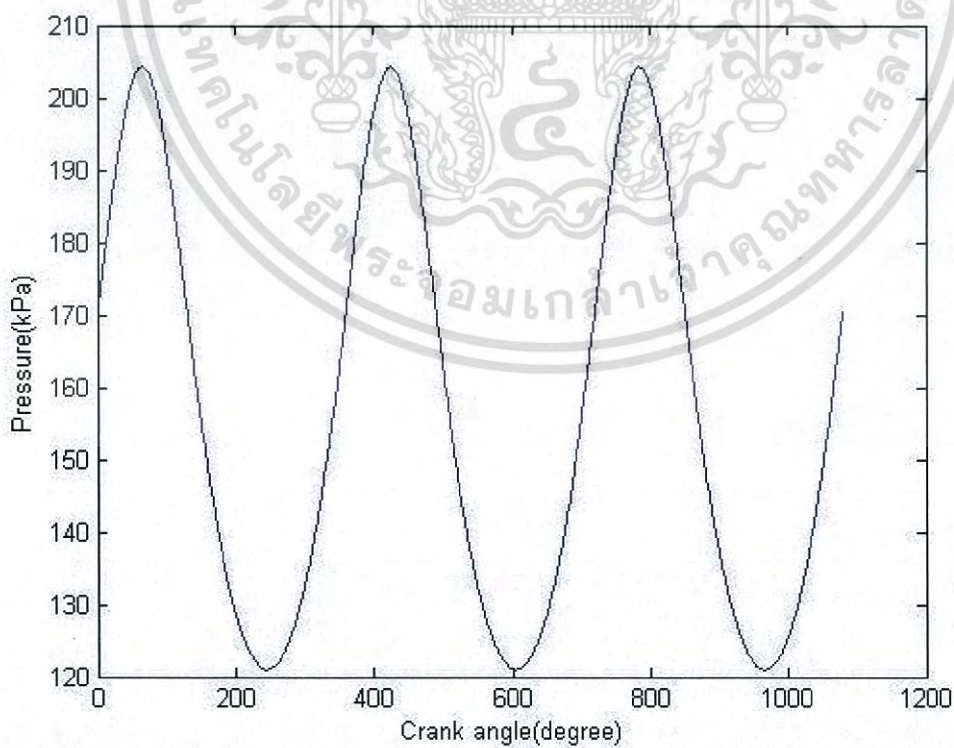


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงจากทฤษฎีของ Schmidt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนไปกับองศาของเพลาค้อเหวี่ยงจากทฤษฎีของ Schmidt



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับองศาของเพลาค้อเหวี่ยงจากทฤษฎีของ Schmidt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าที่ได้จากวัฏจักรแบบอนุกรมคงที่

ค่าที่ได้จากวัฏจักร	หน่วย	ค่าที่ได้
ความดันสูงสุด	kPa	204.25
ความดันต่ำสุด	kPa	121.03
ความดันเฉลี่ย	kPa	157.23
ความร้อนที่ต้องจ่ายให้ต่อ 1 กระบอกสูบ	W	30.91
ความร้อนที่ต้องเอาออกต่อ 1 กระบอกสูบ	W	14.45
งานสุทธิที่ได้ต่อ 1 กระบอกสูบ	W	16.46

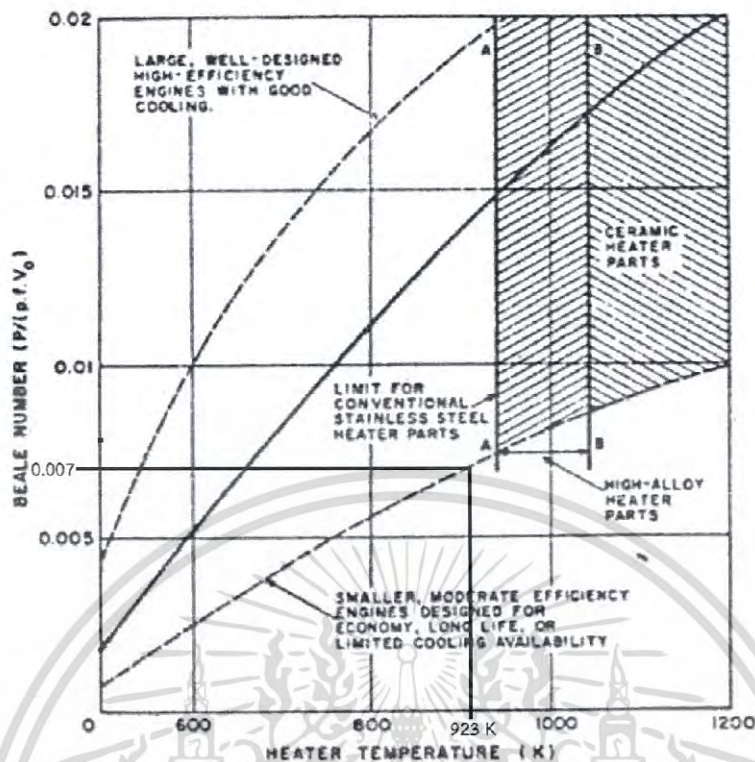
#### 4.6 การวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดย Beale

ทฤษฎีของ Beale หรือ Beale Number เป็นทฤษฎีที่ใช้ระบุประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง และสามารถใช้ประมาณกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์โดยใช้สมการ

$$P_B = B_n \times P_{\text{mean}} \times f \times V_{\text{sw}} \quad (4.22)$$

- เมื่อ  $P_B$  คือ กำลังที่ได้จากเครื่องยนต์(W)  
 $B_n$  คือ Beale Number  
 $P_{\text{mean}}$  คือ ความดันเฉลี่ย(bars)  
 $f$  คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์(rps)  
 $V_{\text{sw}}$  คือ ปริมาตรกวาด( $\text{cm}^3$ )

โดย Beale Number สามารถหาได้จากรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงค่าของ Beale Number

เมื่อนำค่าต่างๆ แทนลงในสมการที่ 4.22 จะได้

$$P_B = (0.007)(1.57)(10)(17.7) = 1.95 \text{ W} \quad (4.22)$$

งานที่ได้จากทฤษฎีของ Beale เท่ากับ 1.95W ต่อ 1 กระบอกสูบ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็ว 10 รอบต่อวินาที

#### 4.7 เปรียบเทียบกำลังที่ได้จากทฤษฎีต่างๆ

เมื่อเรานำข้อมูลที่ได้จากวัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ วัฏจักรสเตอร์ลิงแบบอุณหภูมิคงที่และทฤษฎีของ Beale มาเปรียบเทียบกับกันจะได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบกำลังที่ได้จากทฤษฎีต่างๆ

ค่าที่ได้จากวัฏจักร	หน่วย	วัฏจักรในอุดมคติ	วัฏจักรแบบอุณหภูมิคงที่	ทฤษฎีของ Beale
ความร้อนที่ต้องจ่ายให้แก่เครื่องยนต์	W	355.68	123.64	-
ความร้อนที่ต้องเอาออกจากเครื่องยนต์	W	130.28	57.80	-
งานสุทธิที่ได้	W	255.4	65.84	7.80

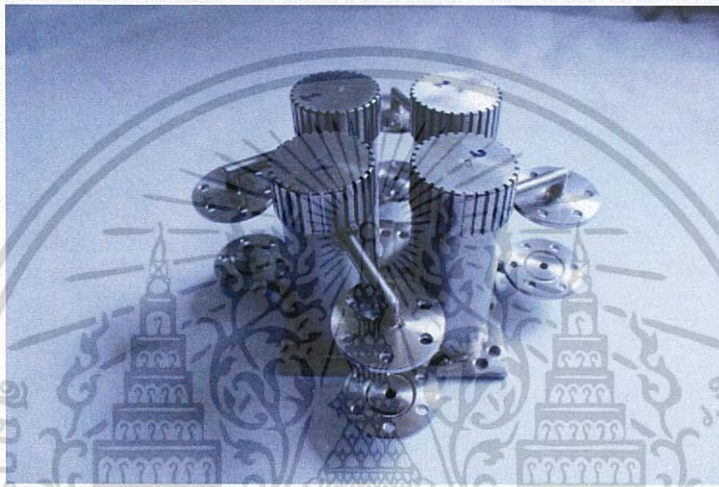
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชิ้นส่วนและเครื่องยนต์ต้นแบบ

### 5.1 ชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์

#### 5.1.1 กระจบอกลูบ

เป็นส่วนที่รับความร้อนจากห้องเผาไหม้ ดังนั้นเราจึงต้องใช้วัสดุที่ทนความร้อนและสามารถรองรับความดันได้สูงเพียงพอ ในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้ Stainless Steel - Grade 304 ในการสร้างส่วนกระจบอกลูบ ส่วนบนของกระจบอกลูบออกแบบให้เป็นครีบริบความร้อนเพื่อให้ความร้อนเข้าสู่ระบบได้มากขึ้น



รูปที่ 5.1 แสดงกระจบอกลูบ

#### 5.1.2 ครีบริบายความร้อน

เนื่องจากส่วนระบายความร้อนเป็นส่วนที่ต้องให้มีการนำความร้อนได้ดีเพื่อที่จะระบายความร้อนให้ได้มากที่สุด วัสดุที่เลือกใช้ในการสร้างส่วนนี้คือ Aluminium เนื่องจากวัสดุนี้มีค่า thermal conductivity ที่สูงและสามารถรองรับความเค้นได้มาก



รูปที่ 5.2 แสดงครีบริบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 ลูกสูบ

ลูกสูบของเครื่องยนต์ต้นแบบนี้ได้ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบนทำมาจาก Aluminium เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และส่วนล่างทำมาจาก ทองเหลือง(Brass) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทองเหลืองจะมีความเสียดทานน้อยทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ง่ายขึ้น



รูปที่ 5.3 แสดงลูกสูบ

### 5.1.4 ก้านสูบ

ทำมาจาก Iron Steel ASTM A36 เนื่องจากวัสดุนี้สามารถรับความเค้นได้สูงและสามารถนำไปขัดผิวทำให้มีความลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานได้ดี



รูปที่ 5.4 แสดงก้านสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.5 รอสส์ยอร์ก

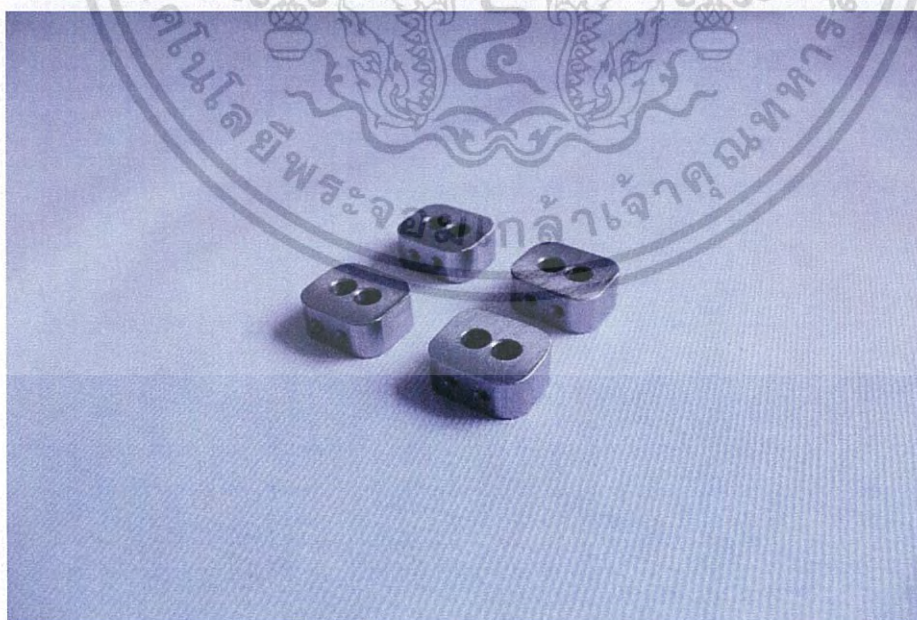
รอสส์ยอร์กทำหน้าที่เปลี่ยนแรงในแนวเส้นตรงที่เกิดจากลูกสูบให้เป็นแรงบิดเพื่อขับเคลื่อนล้อช่วยแรง โดยชิ้นส่วนนี้จะทำมาจาก Aluminium เนื่องมีน้ำหนักเบาเพื่อให้ภาระของเพลาน้อยที่สุด



รูปที่ 5.5 แสดงรอสส์ยอร์ก

### 5.1.6 เพลาช้อเหวียง

ทำมาจาก Iron Steel ASTM A36 เนื่องจากมีราคาไม่แพง สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและทนต่อความเค้นได้สูง



รูปที่ 5.6 แสดงเพลาช้อเหวียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.7 เพลาส่งกำลัง

เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ส่งผ่านแรงไปยังล้อช่วยแรง โดยทำมาจาก Iron Steel ASTM A36



รูปที่ 5.7 แสดงเพลาส่งกำลัง

### 5.1.8 ล้อช่วยแรง

ล้อช่วยแรงทำหน้าที่สะสมพลังงานเพื่อให้เครื่องยนต์สามารถเดินได้ง่ายขึ้น โดยชิ้นส่วนนี้ทำมาจาก Iron Steel ASTM A36 เนื่องจากมีน้ำหนักมาก ราคาไม่แพงและขึ้นรูปง่าย

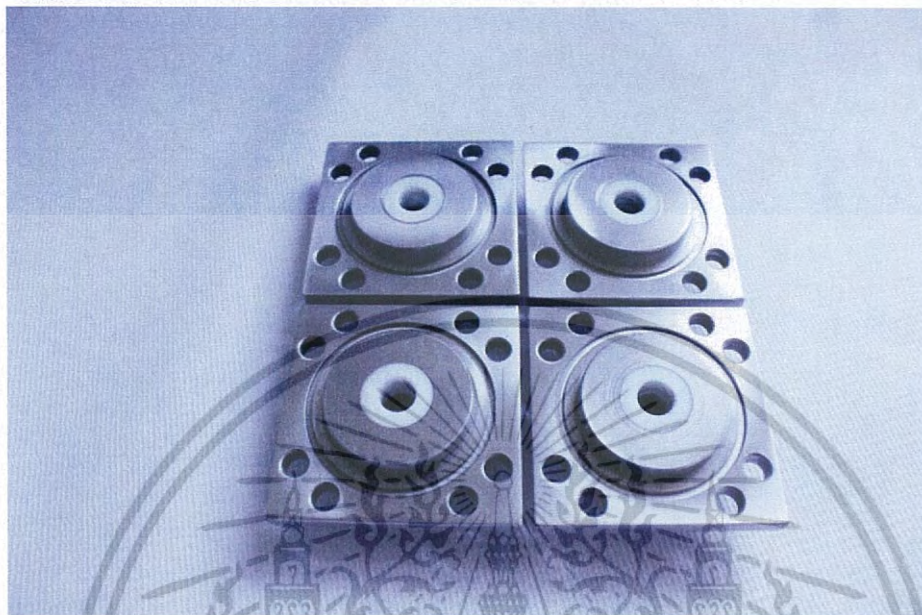


รูปที่ 5.8 แสดงล้อช่วยแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.9 ฐานรองกระบอกลูกสูบ

ฐานรองกระบอกลูกสูบทำมาจาก Stainless Steel - Grade 304 โดยชิ้นส่วนนี้จะมี Teflon ทำหน้าที่ประคองลูกสูบ และมี O-ring ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศรั่วออกจากกระบอกลูกสูบ



รูปที่ 5.9 แสดงฐานรองกระบอกลูกสูบ

### 5.1.10 ฐานรองเครื่องยนต์

ทำมาจาก Iron Steel ASTM A36 เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีน้ำหนักมากทำให้มั่นคง

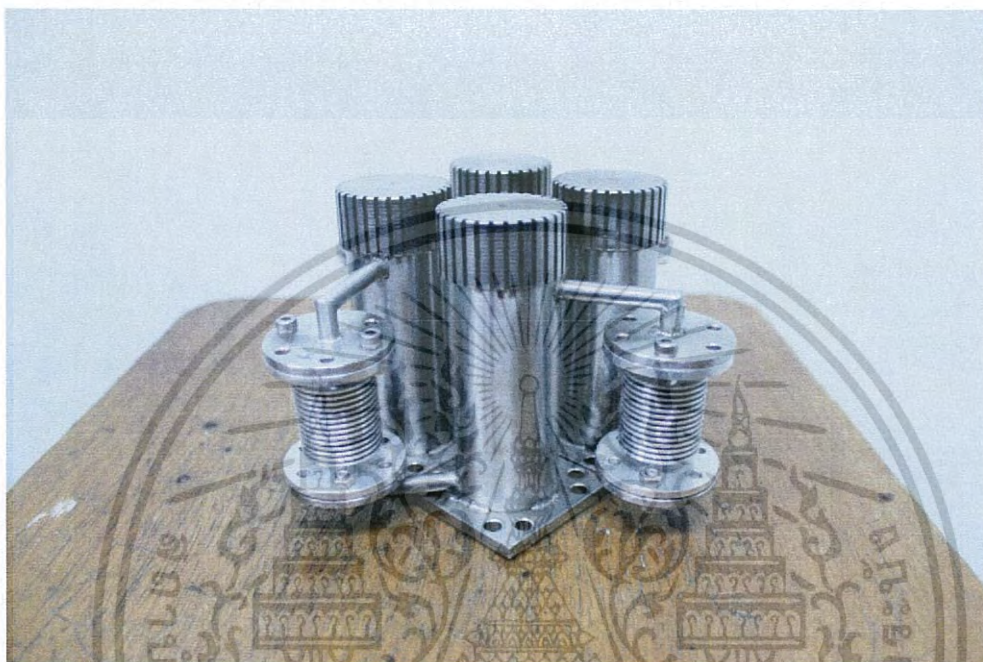


รูปที่ 5.10 แสดงฐานรองเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 รูปรวมชิ้นส่วนส่วนผลิตกำลัง

มีหน้าที่ในการผลิตกำลัง โดยรับความร้อนจากแหล่งความร้อน ทำให้เกิดการขยายตัวของของไหลทำงานภายในกระบอกสูบ เกิดแรงดันกระทำต่อลูกสูบเพื่อขับลูกสูบให้มีการเคลื่อนที่ในจังหวะขยายตัวของของไหลทำงาน เมื่อของไหลทำงานไหลไปยังส่วนระบายความร้อน ครีบริบายความร้อนจะทำให้ของไหลทำงานเย็นลง ของไหลทำงานก็จะเกิดการหดตัว โดยจะดูดลูกสูบกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น



รูปที่ 5.11ก. แสดงชิ้นส่วนส่วนผลิตกำลังประกอบด้วยกระบอกสูบและครีบริบายความร้อน

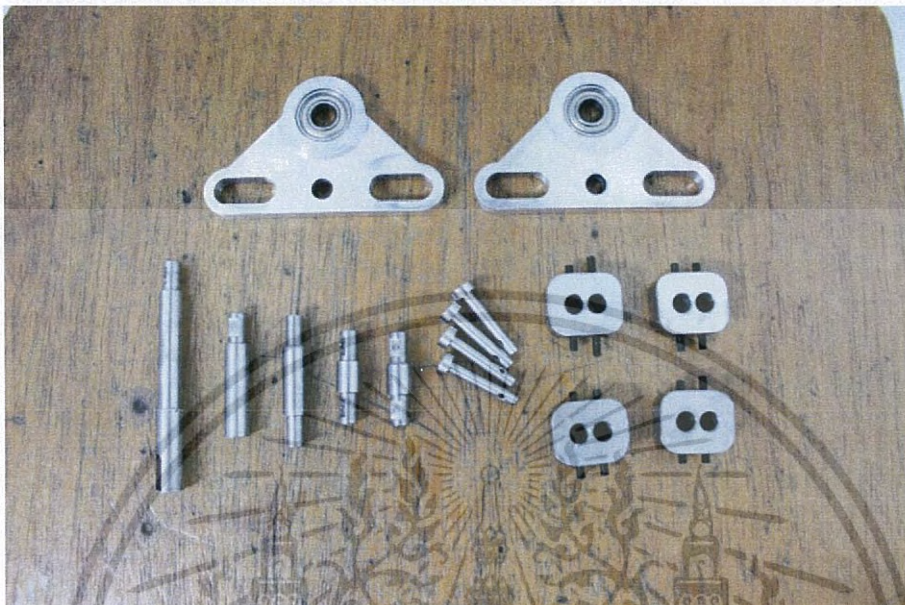


รูปที่ 5.11ข. แสดงชิ้นส่วนส่วนผลิตกำลังประกอบด้วยลูกสูบและฐานรองลูกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 รวบรวมชิ้นส่วนส่งกำลัง

มีหน้าที่ในการส่งกำลังจากส่วนผลิตกำลังไปยังล้อช่วยแรง โดยมีก้านสูบ รอสส์ยอร์ดและเพลลาข้อเหวี่ยง เพื่อส่งกำลังไปที่ล้อช่วยแรง



รูปที่ 5.12 แสดงชิ้นส่วนส่งกำลังประกอบด้วยรอสส์ยอร์ด เพลลาและเพลลาข้อเหวี่ยง

### 5.4 เครื่องยนต์ต้นแบบ

เมื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆแล้วจะได้ดังรูปที่ 5.13 ถึง 5.15



รูปที่ 5.13 แสดงเครื่องยนต์ต้นแบบที่ไม่มีลูกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 แสดงเครื่องยนต์ต้นแบบ



รูปที่ 5.15 แสดงภายในฐานเครื่องยนต์ต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

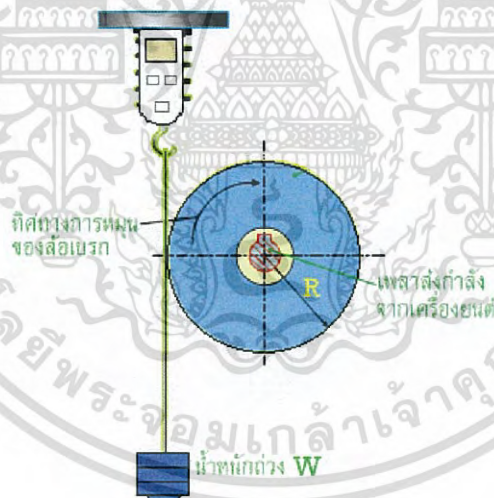
### การออกแบบการทดลอง

#### 6.1 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องยนต์

การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องยนต์มีหลายวิธี แต่ในที่นี้จะใช้วิธีทดสอบแบบ Robe Brake เพื่อหาแรงบิด ความเร็วรอบและกำลังที่เครื่องยนต์สามารถผลิตได้

##### 6.1.1 วิธีทดสอบแบบ Robe Brake

1. ให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ในอัตราคงที่ และกระตุ้นให้เครื่องยนต์ทำงาน
2. รอกกระทั่งเครื่องยนต์หมุนอย่างคงที่และใช้เครื่องวัดความเร็วรอบวัดเครื่องยนต์ จะทำให้เราทราบความเร็วรอบสูงสุดของเครื่องยนต์
3. นำเชือกไปคาดรอบล้อช่วยแรง โดยปลายข้างหนึ่งของเชือกต่ออยู่กับตุ้มน้ำหนัก และปลายอีกข้างหนึ่งยึดติดกับเครื่องชั่งน้ำหนักดังรูปที่ 6.1
4. ใส่ตุ้มน้ำหนักในปริมาณที่ตั้งไว้ รอจนเครื่องคงที่แล้วทำการบันทึกค่าจากเครื่องชั่งน้ำหนักและเครื่องวัดความเร็วรอบ
5. ทำซ้ำในข้อ 4 โดยเพิ่มน้ำหนักขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งล้อช่วยแรงหยุดหมุน



รูปที่ 6.1 แสดงวิธีการทดสอบแบบ Robe Brake

#### 6.2 การคำนวณกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์

กำลังของเครื่องยนต์ที่วัดได้จากเพลาข้อเหวี่ยงโดยตรง และเป็นกำลังที่นำไปใช้งาน ซึ่งเป็นกำลังที่เหลือจากการเอาชนะความฝืดหรือความเสียดทานต่างๆ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดหากำลังม้าเบรกเรียกว่า ไดนาโมมิเตอร์ โดยจะวัดออกมาในรูปของทอร์ก(Torque) และรอบการหมุนของเครื่องยนต์ แล้วจึงนำค่าของทอร์กที่ได้ไปคำนวณหากำลังเบรกอีกครั้งหนึ่ง สำหรับกำลังเบรกสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = (W - w)g \frac{D}{2} \quad (6.1)$$

เมื่อ	T	คือ ทอร์กที่เครื่องยนต์ส่งได้(Nm)
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าเท่ากับ $9.81 \frac{m^2}{s}$
	W	คือ มวลก้อนน้ำหนักที่ใช้แขวนบนถาด(kg)
	w	คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องชั่ง(kg)
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อช่วยแรง(m)

เมื่อทราบทอร์กแล้วเราสามารถหาค่าลิ้งเบรกได้จาก

$$P_b = \frac{2\pi TN}{60} \quad (6.2)$$

เมื่อ	$P_b$	คือ กำลังงานเบรก(W)
	T	คือ ทอร์กที่เครื่องยนต์ส่งได้(Nm)
	N	คือ ความเร็วรอบล้อช่วยแรง(rpm)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อใช้ในการศึกษาในห้องปฏิบัติการได้ โดยมีรายละเอียดของเครื่องต้นแบบดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.1 แสดงขนาดของเครื่องยนต์

ค่าขนาดของเครื่องยนต์ ชิ้นส่วน/ตัวแปร	หน่วย	ค่า/ชนิด
Working Space		
เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ	เซนติเมตร	3,2
ระยะชักลูกสูบ	เซนติเมตร	2,2
Drive		
รัศมีเพลลาข้อเหวี่ยง	เซนติเมตร	0,75
รัศมีเพลลา	เซนติเมตร	0,8
รัศมีก้านสูบ	เซนติเมตร	0,8
Dead Hot Space		
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	เซนติเมตร	3,2
ความสูง	เซนติเมตร	0,1
Heating Fin		
ความหนา	เซนติเมตร	0,2
ความลึก	เซนติเมตร	0,3
ความยาว	เซนติเมตร	2
จำนวน	ชุด	30
Connecting Tube		
เส้นผ่านศูนย์กลาง	เซนติเมตร	0.635
ความยาว	เซนติเมตร	12
Dead Cold Space		
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	เซนติเมตร	3,2
ความสูง	เซนติเมตร	0,2
Cooling Fin		
ความหนา	เซนติเมตร	0,1
ความกว้าง	เซนติเมตร	1
จำนวน	ชุด	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเครื่องยนต์ดังกล่าวยังไม่สามารถทำงานได้ตามที่คาดหวังเนื่องจากมีชิ้นส่วนบางชิ้นที่มีขนาดไม่ตรงตามแบบที่ผู้วิจัยได้ออกแบบไว้ เนื่องจากความผิดพลาดของผู้วิจัยในการสื่อสารระหว่างขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนเอง โดยชิ้นส่วนที่มีข้อบกพร่องคือ ส่วนของก้านสูบ ที่มีขนาดเล็กกว่าที่ได้ออกแบบไว้จึงทำให้เกิดการรั่วไหลของอากาศที่ก้านสูบหนึ่ง จากการที่มีอากาศรั่วไหลทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้ยากหรืออาจไม่ทำงานเลย โดยการรั่วไหลของสารทำงานเกิดจากขนาดของก้านสูบที่ออกแบบนั้นคือ 8 มิลลิเมตรซึ่งจะตรงกับขนาดของซีลพอดี้ แต่ขนาดของก้านสูบของเครื่อง ณ ตอนนี้อยู่ที่ 7.2 มิลลิเมตรสามชิ้น และชิ้นสุดท้ายมีขนาด 7 มิลลิเมตร โดยก้านสูบที่มีขนาด 7 มิลลิเมตร เมื่อถอดออกมาดูจะทราบว่า มีช่องว่างเล็กๆอยู่ระหว่างตัวก้านและซีล ซึ่งนี่คือสาเหตุหลักของการรั่วไหลของอากาศดังรูป



รูปที่ 8.1 แสดงก้านสูบที่มีปัญหา

อีกทั้งยังพบว่าเมื่อก้านสูบมีขนาดไม่ตรงตามแบบแล้ว ก้านสูบจะเคลื่อนไหวไม่คงที่ตามแนวตั้งตามได้ออกแบบไว้ เนื่องจาก ตามที่ผู้วิจัยได้ออกแบบไว้คือ จะมีวัสดุเทพลอนขนาดเท่ากับก้านเป็นตัวประกอบไม่ให้ก้านสูบเกิดการเอียงตัว แต่เมื่อก้านสูบมีขนาดเล็กกว่าเทพลอน จึงทำให้เกิดการเอียงของก้านสูบ ส่งผลให้ทั้งลูกสูบและก้านสูบเอียงได้เล็กน้อย ซึ่งจะทำให้ลูกสูบและกระบอกสูบที่มีขนาดพอดีกันเกิดความเสียดทานเพิ่มมากขึ้นขณะเคลื่อนที่ และเมื่อลูกสูบลูกสูบมีการเอียงได้แทนที่จะส่งถ่ายแรงให้โรตอร์สก็ทำได้โดยตรง จะเกิดการถ่ายแรงที่ไม่มีประโยชน์ไปทางด้านข้างในร่องของโรตอร์สก็ทำได้ ทำให้เกิดการสูญเสียงานไปโดยเปล่าประโยชน์

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

1. แก้ไขปัญหาในส่วนที่รั่วของเครื่องยนต์ โดยอาจทำการกลึง ก้านสูบขึ้นมาใหม่ตามมาตรฐานหรือ ออกแบบ กลไกในส่วนของก้านสูบใหม่โดยใช้ นิวเมตริกซิลแทนที่ซิลที่ใช้ในปัจจุบัน
2. ในส่วนของลูกสูบยังปรับปรุงได้ โดยการขีดเงากระบอกสูบ และตัวลูกสูบเพื่อลดแรงเสียดทาน
3. ในส่วนของท่อที่ใช้ในเครื่องยนต์ยังเป็นท่อฉากอยู่ ซึ่งก่อให้เกิดความดันลด จึงอาจเปลี่ยนเป็นท่อ โคงได้ แต่ต้องเป็นท่อที่ทนความร้อนได้เช่นกัน
4. ล้อช่วยแรงที่ออกแบบมานั้นไม่ได้ทำร่องสำหรับใส่สายพานหรือเชือกไว้ อาจทำในส่วนนี้เพิ่ม เพื่อให้ง่ายต่อการทดลอง Robe brake
5. แก๊ซในส่วนของก้านสูบที่ยังเอียงได้เล็กน้อย อาจทำด้วยการทำก้านใหม่เช่นเดียวกับข้อ 1.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

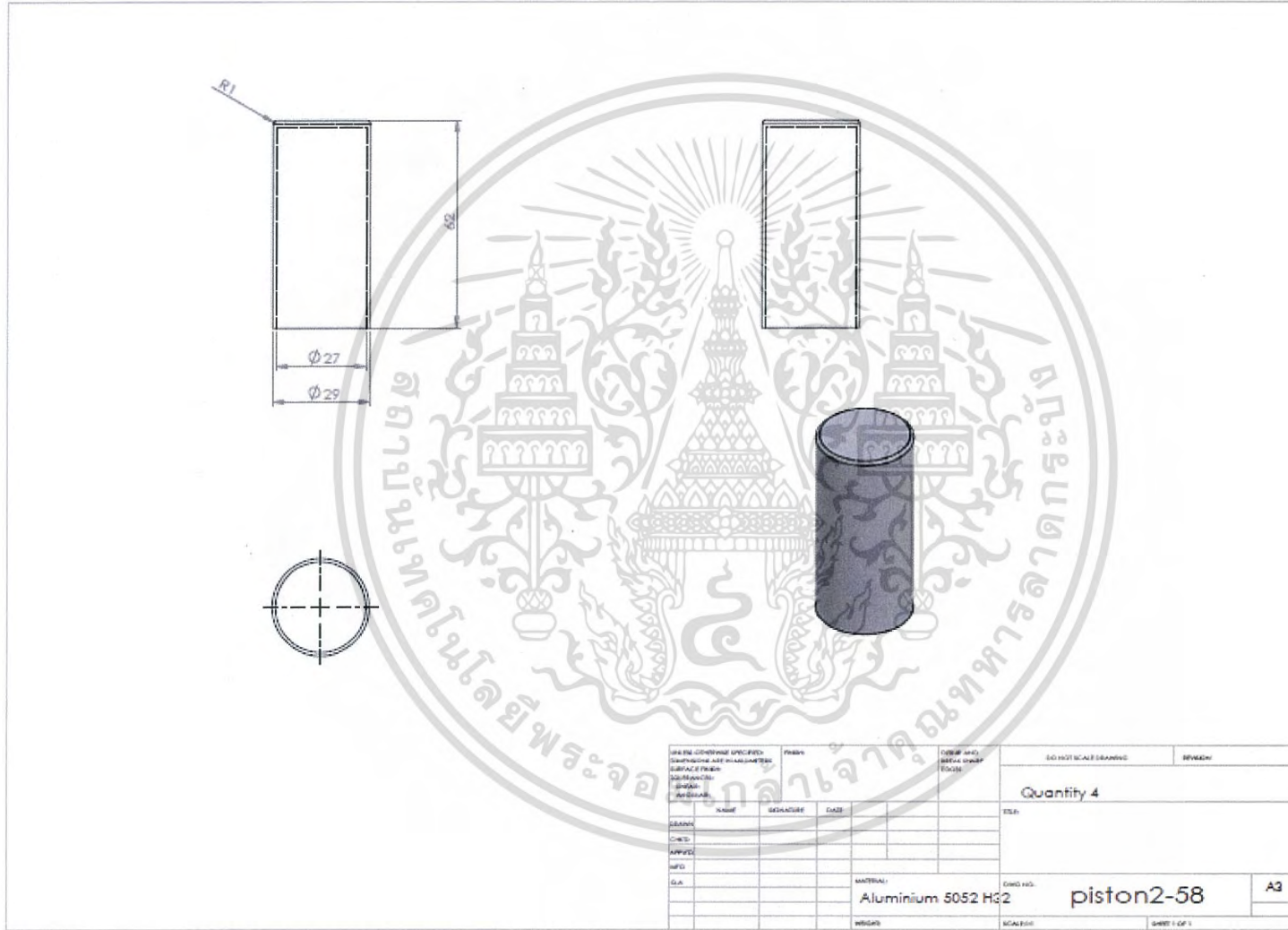
- [1] Berchowitz, D.M., Rallis, C.J., and Urieli, I. (1977),  
**A New Mathematical Model for Stirling Cycle Machine**, Proc. 12th I.E.C.E.C.,  
 pp. 1522-1527, Washington, D.C., August 28-September 2
- [2] William, M. (1978). **STIRLING ENGINE DESIGN MANUAL**. Washington, D.C.:  
 University of Washington.
- [3] Walker, G. (1980). **STIRLING ENGINE**. New York : Oxford University Press.
- [4] Kolin, I. (1991). **Stirling Motor – History, Theory, Practice**. Dubrovnik :  
 Zagreb University Publications, Ltd.
- [5] Koichi, H. (1997). **Schmidt theory for Stirling Engines**.  
 National Maritime Research Institute.
- [6] A, Ross. (2011). **Making Stirling Engines** Andy Ross.
- [7] Massachusetts Institute of Technology. (2002). **Thermodynamics and Propulsion**.  
 [cited 2015 Oct 14]. Retrieved from :  
<http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node5.html>
- [8] Israel, U. (2010). **Stirling Cycle Machine Analysis**. [cited 2015 Nov 3].  
 Retrieved from : <http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/>



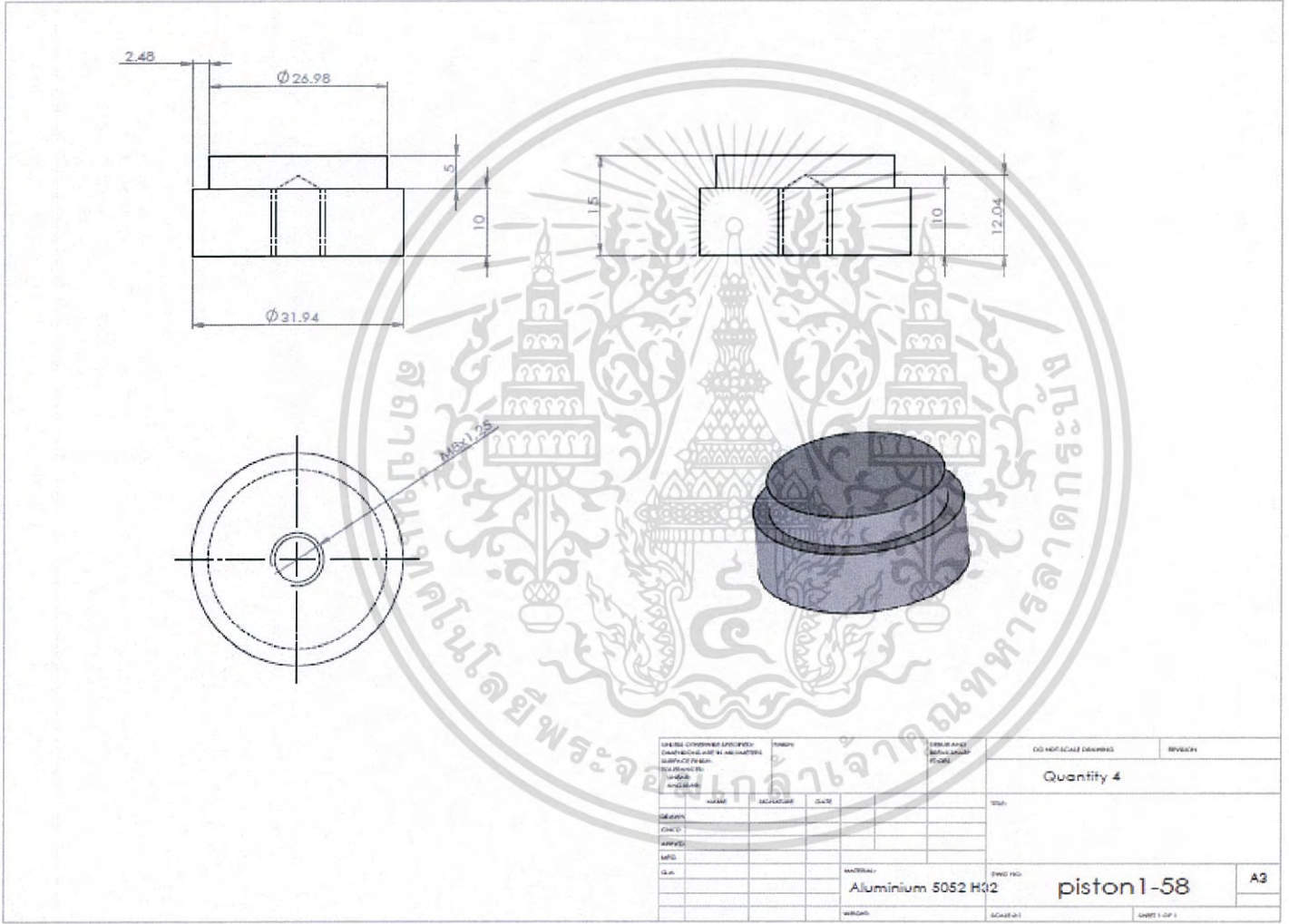


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

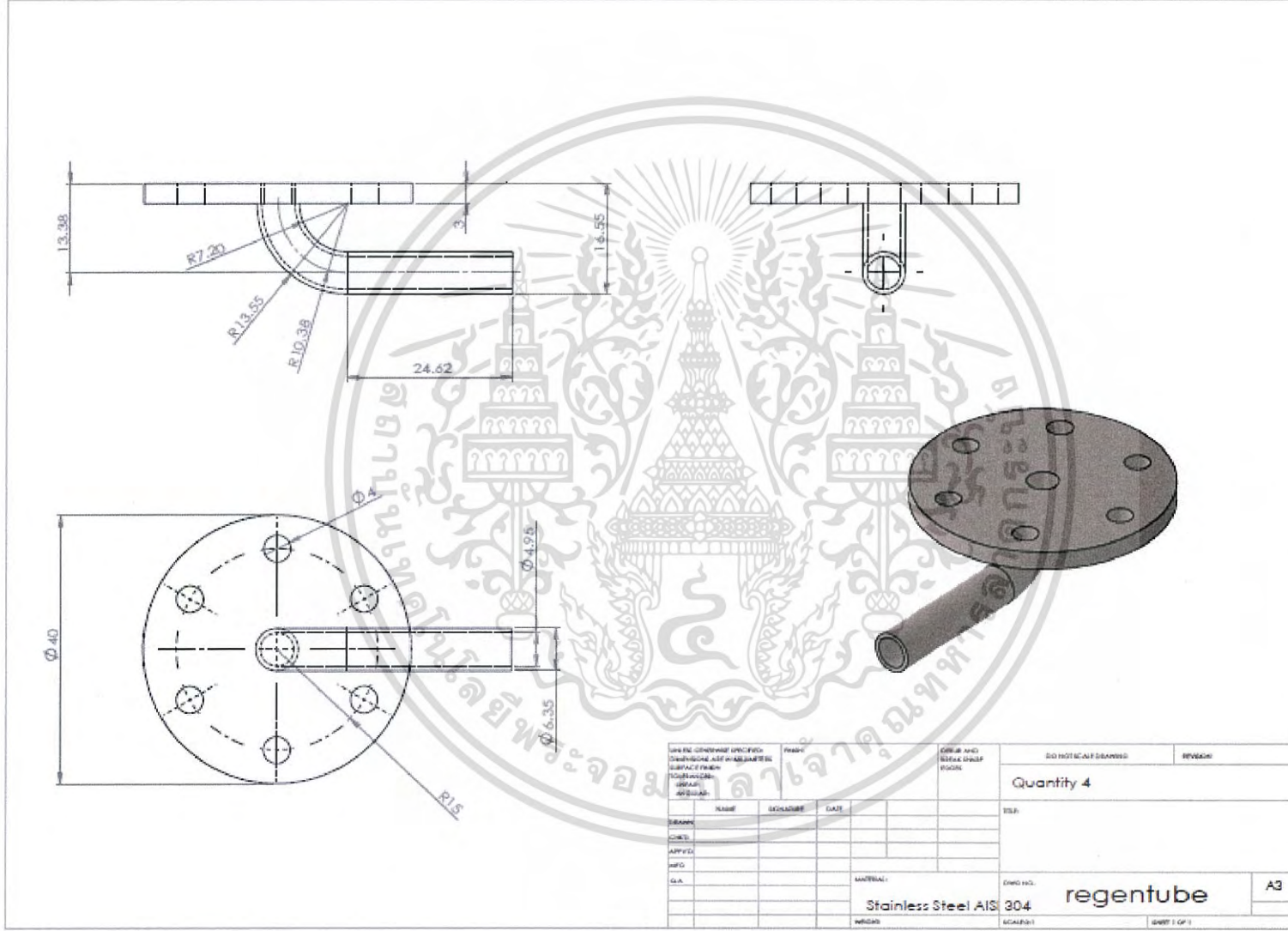




รูปที่ ก.2 Piston-2



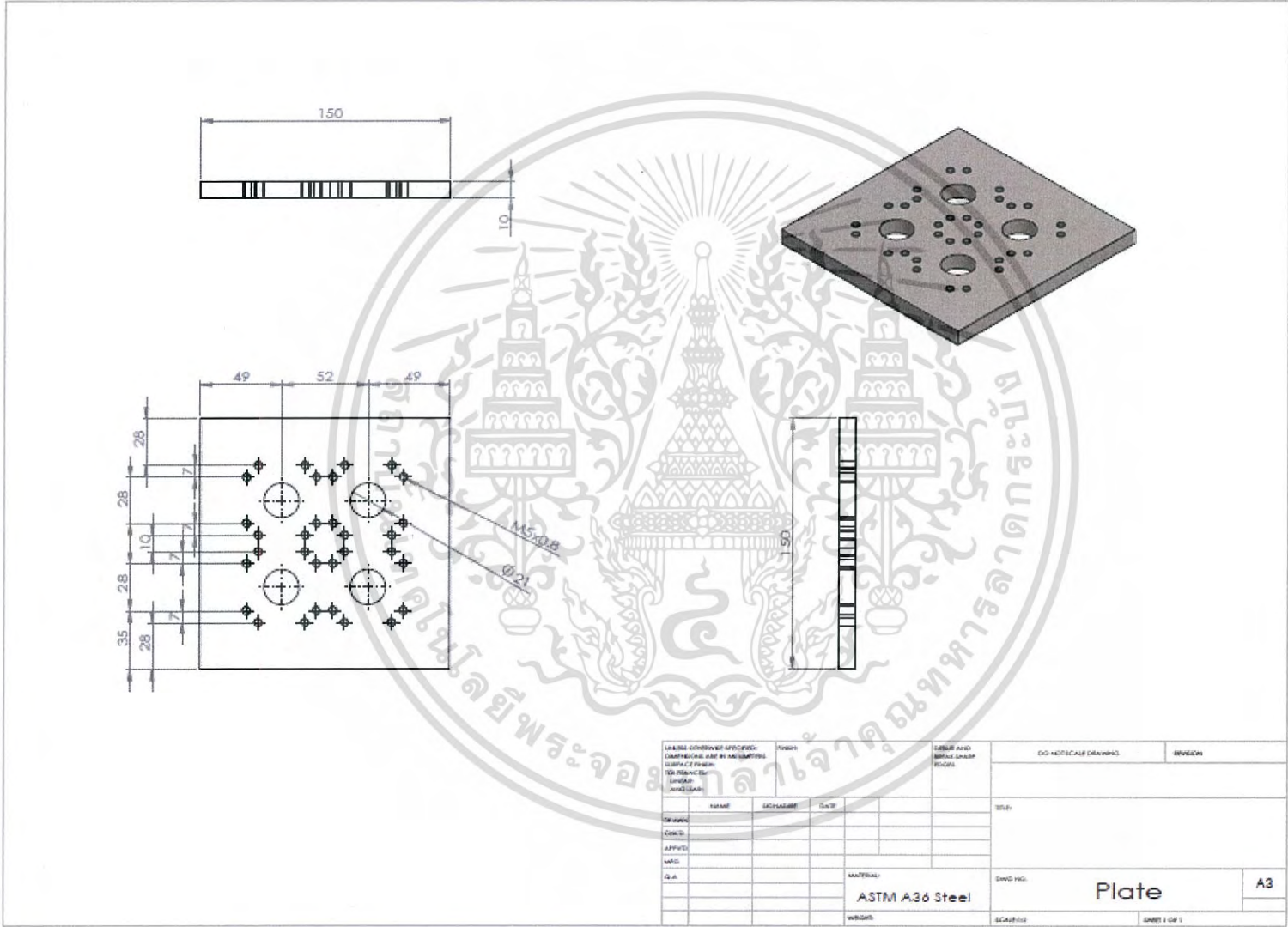
รูปที่ ก.3 Piston-1



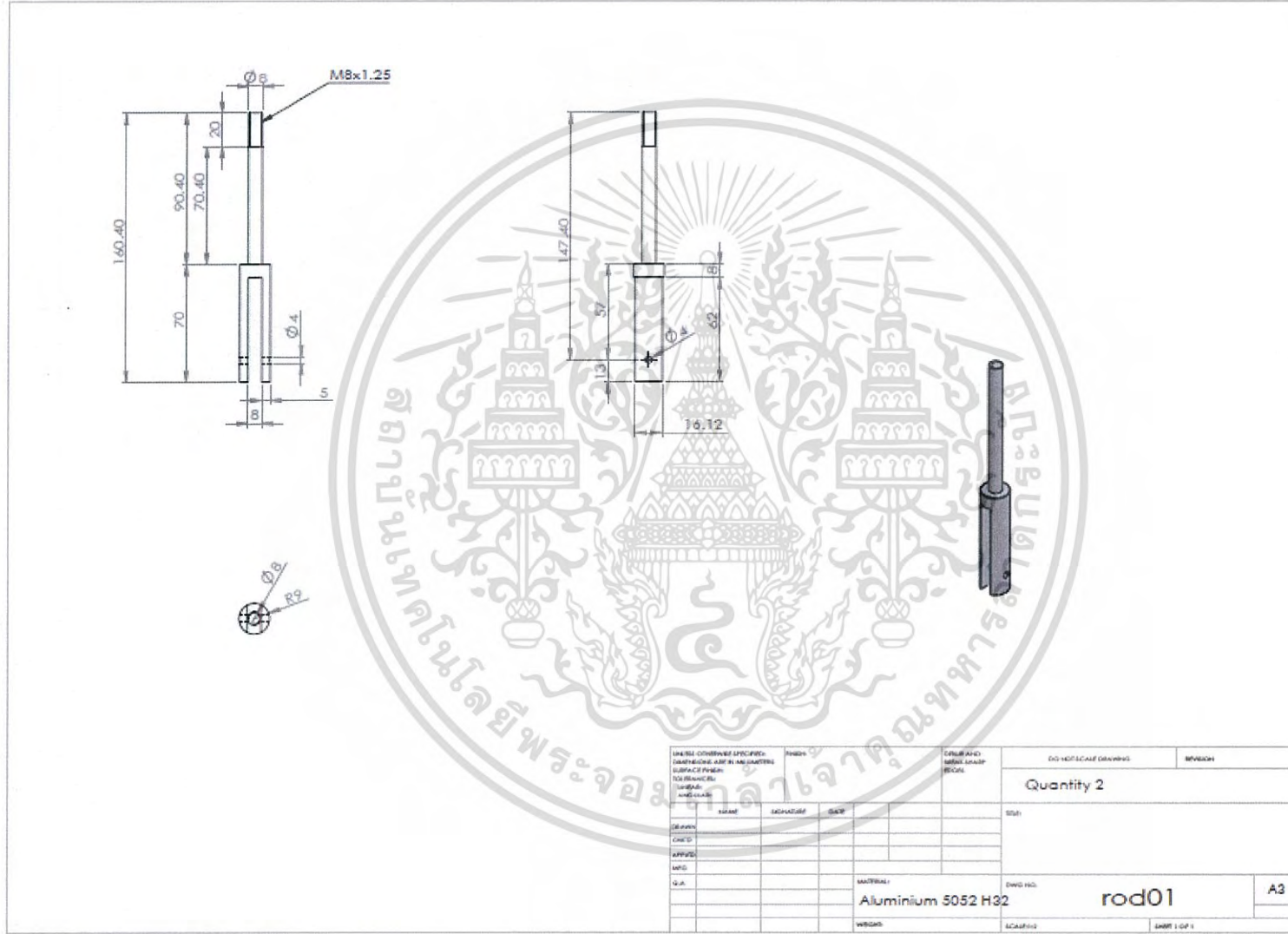
รูปที่ ก.4 Regentube







รูปที่ ก.7 Plate

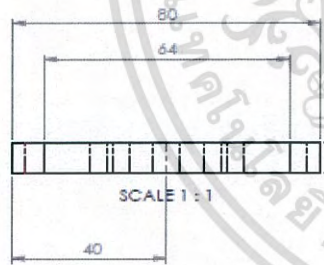
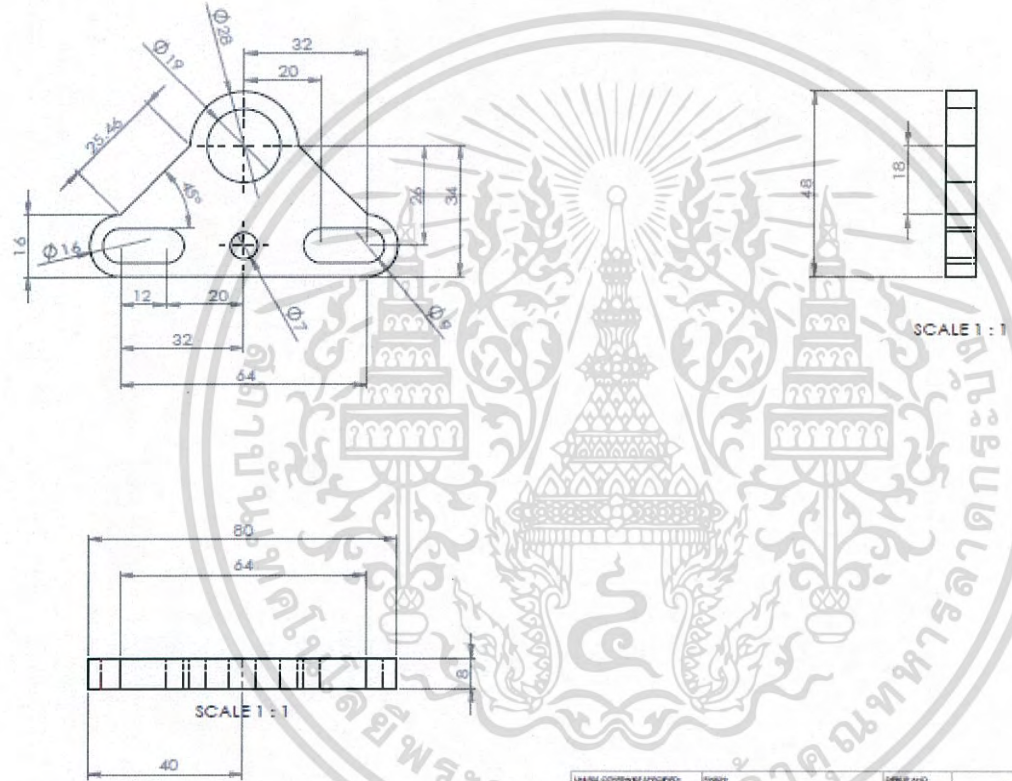


รูปที่ ก.8 Rod01

MODEL CONVENIENT SPECIFIED (เฉพาะใช้สำหรับงาน) SURFACE FINISH TO BE SPECIFIED SURFACE FINISH			INDEX	CHANGE NO. REVISION	DO NOT SCALE DRAWING	REVISED
					Quantity 2	
					SIZE	
DRAWN CHECK APPROVE MFG	NAME	SIGNATURE	DATE			
				MATERIAL	DWG NO.	A3
				Aluminium 5052 H32	rod01	
				WEIGHT	SCALE	SHEET 1 OF 1

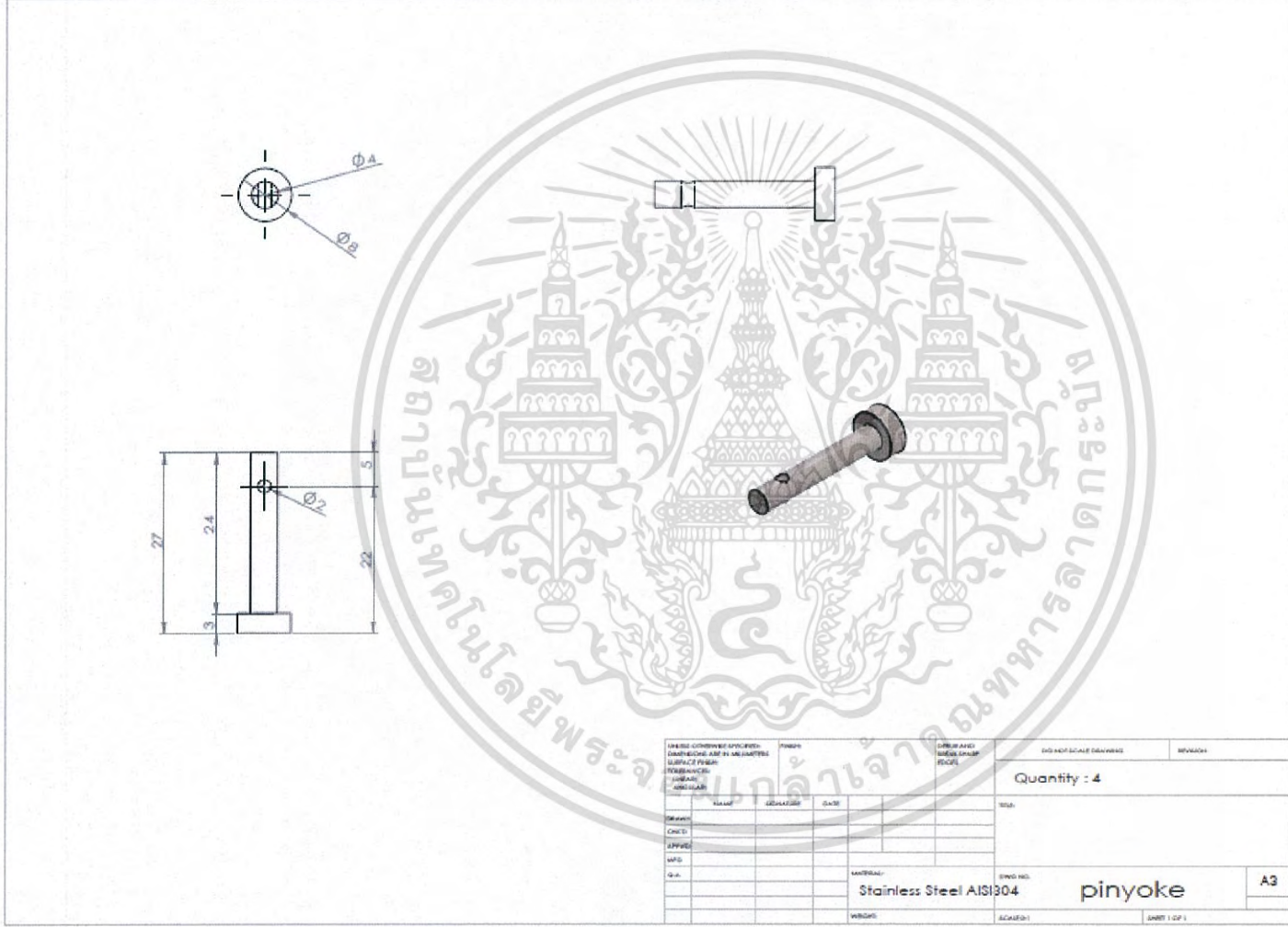






DIMENSIONS SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS UNLESS OTHERWISE SPECIFIED UNLESS OTHERWISE SPECIFIED UNLESS OTHERWISE SPECIFIED UNLESS OTHERWISE SPECIFIED			FINISH:	DIMENSIONS DIMENSIONS DIMENSIONS	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
QUANTITY : 2						
DESIGNER:	DRAWN:	CHECKED:	DATE:	TITLE:		
APPROVED:				MATERIAL:	DWG NO.:	A3
Q.A.				Aluminium 5052 H32	modirossyoke	
				WEIGHT:	SCALE:	SHEET 1 OF 1

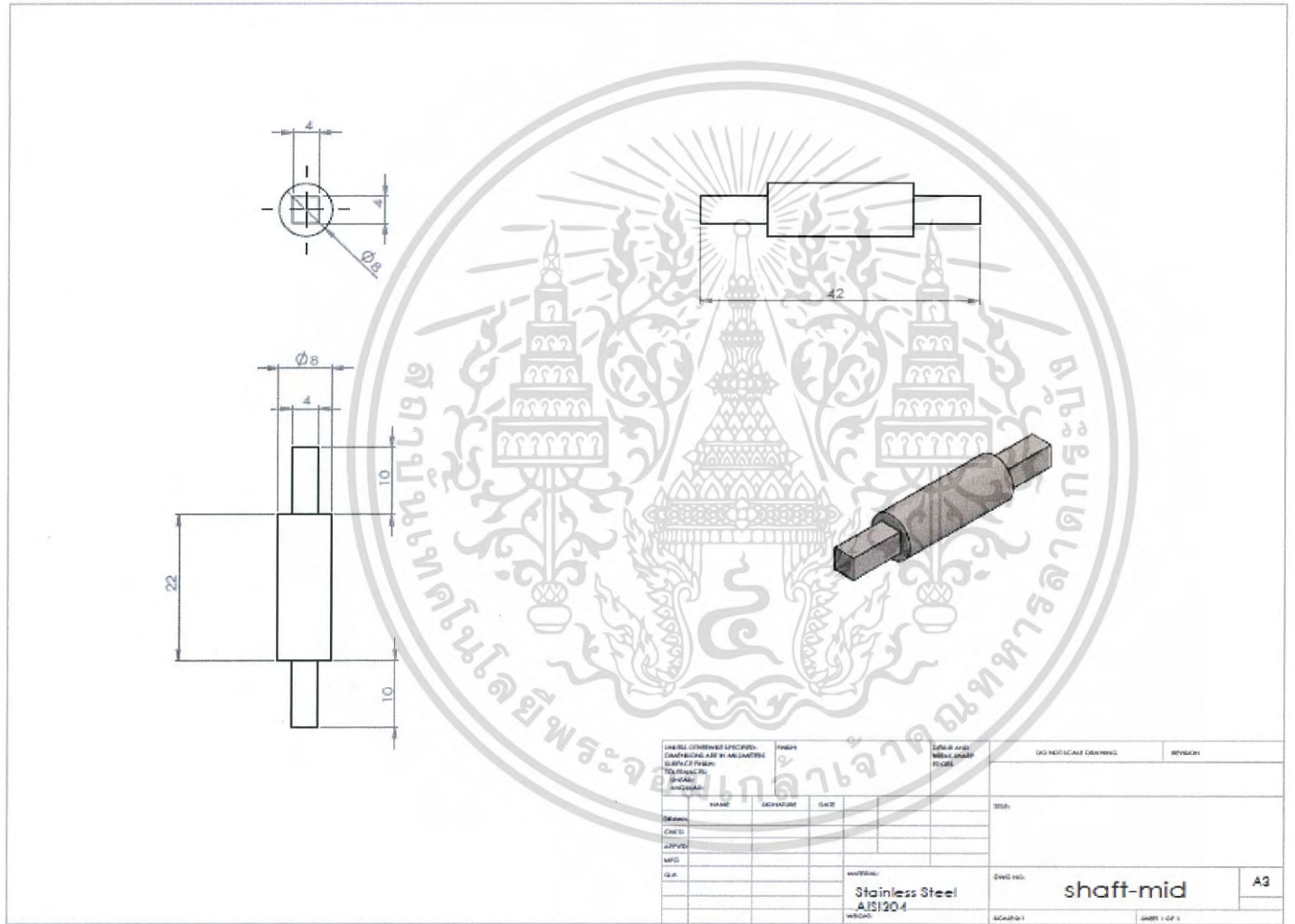
รูปที่ ก.11 Modirossyoke



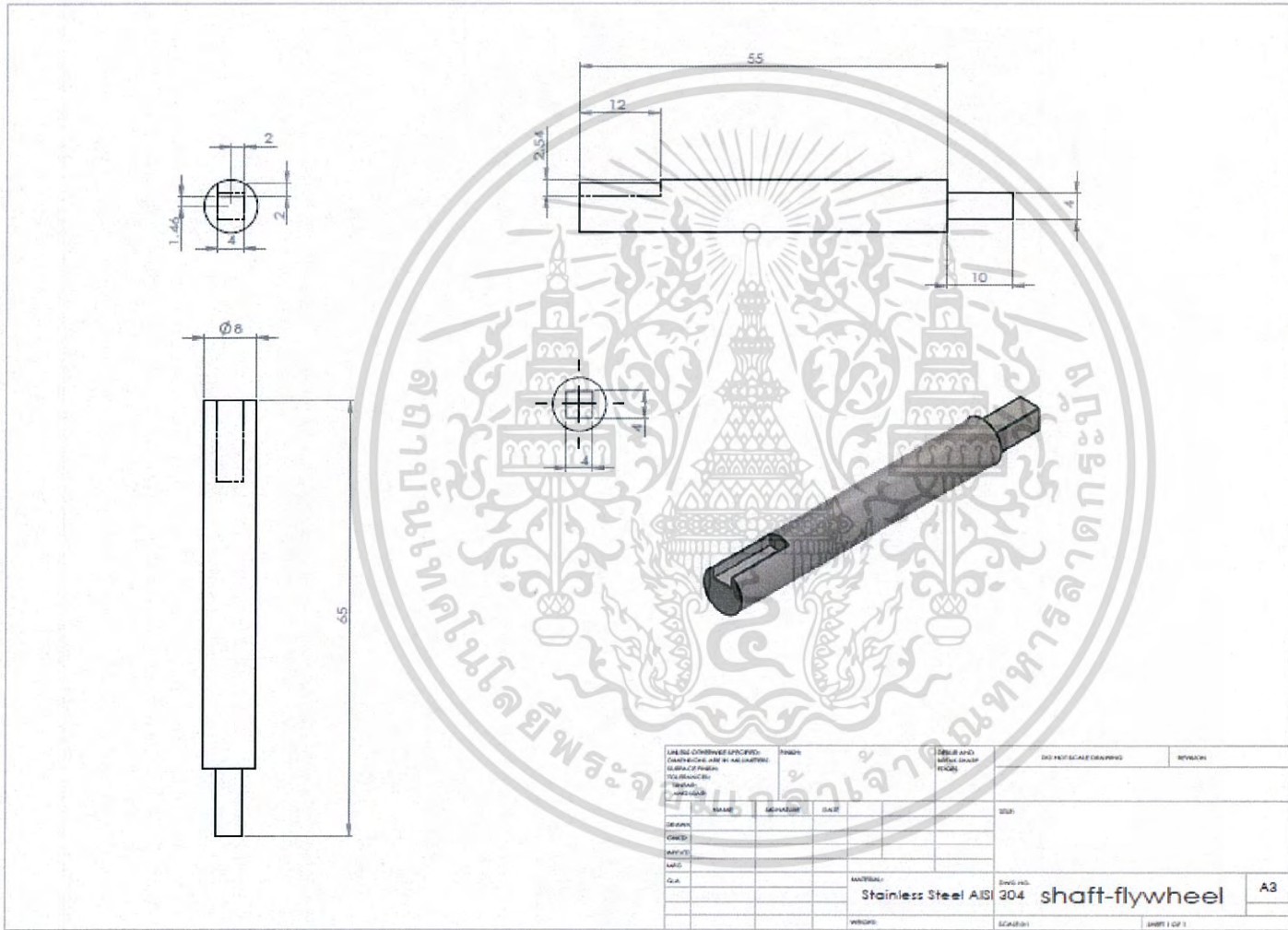
รูปที่ ก.12 Pinyoke



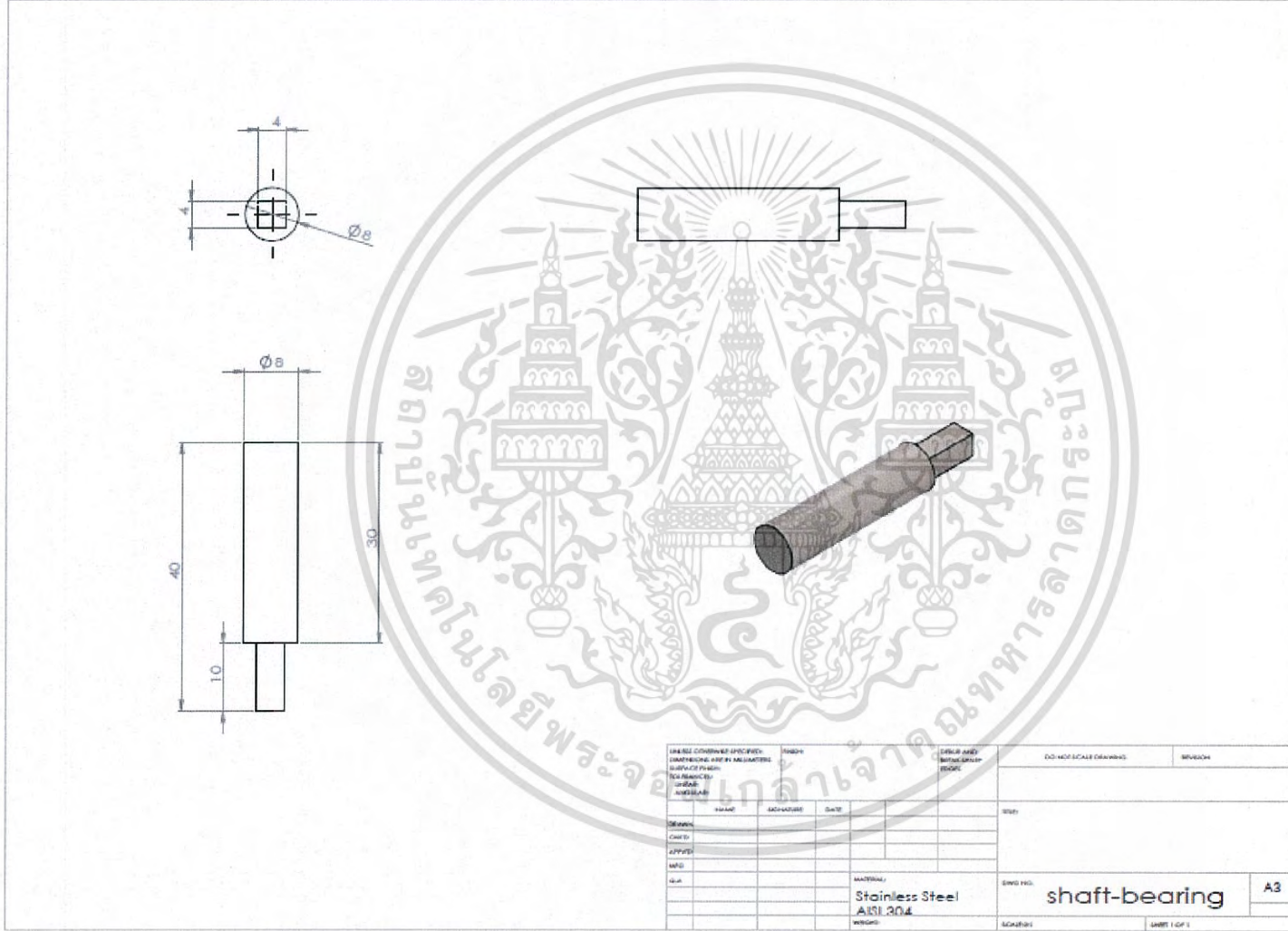




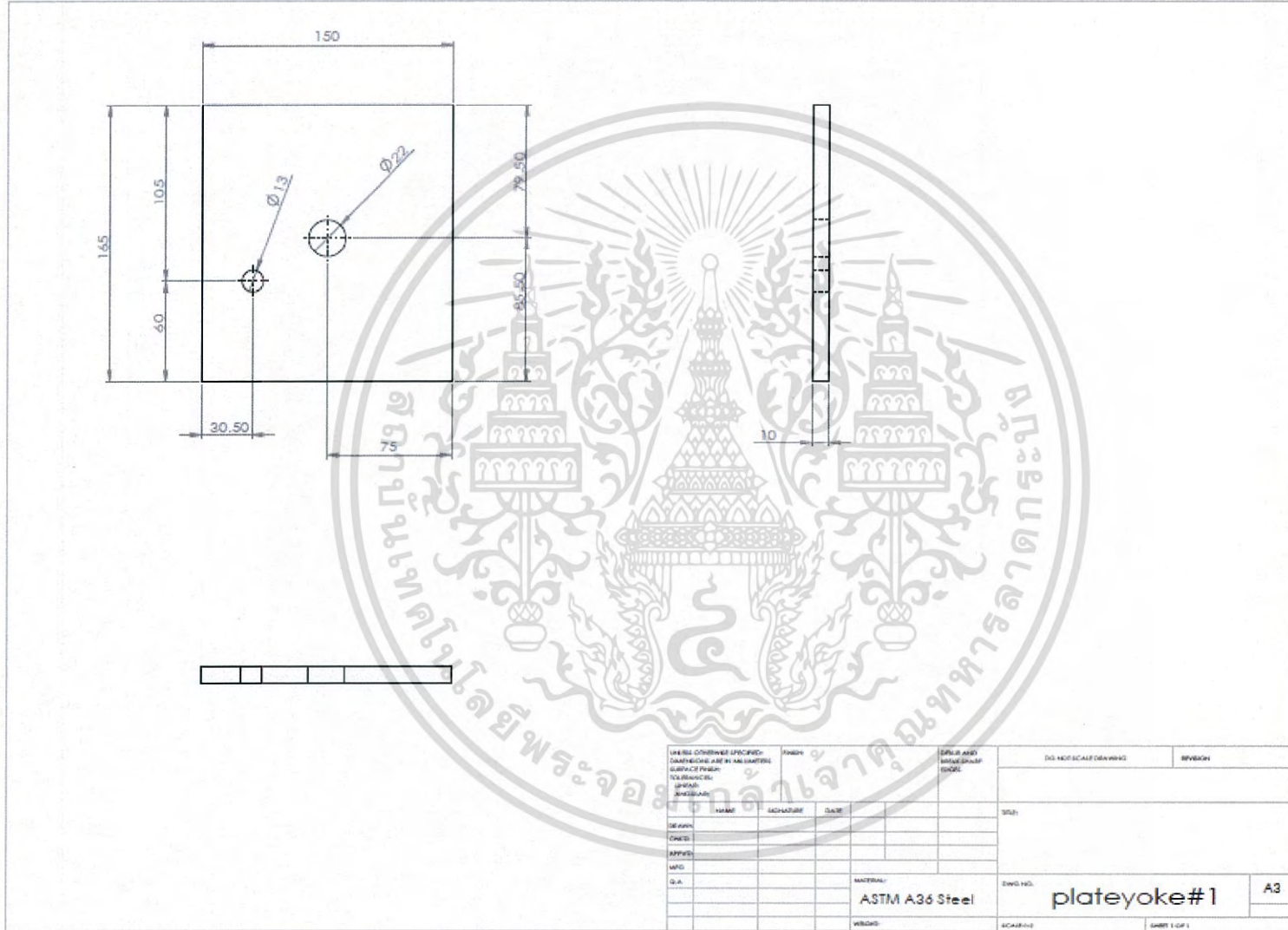
รูปที่ ก.15 Shaft-mid



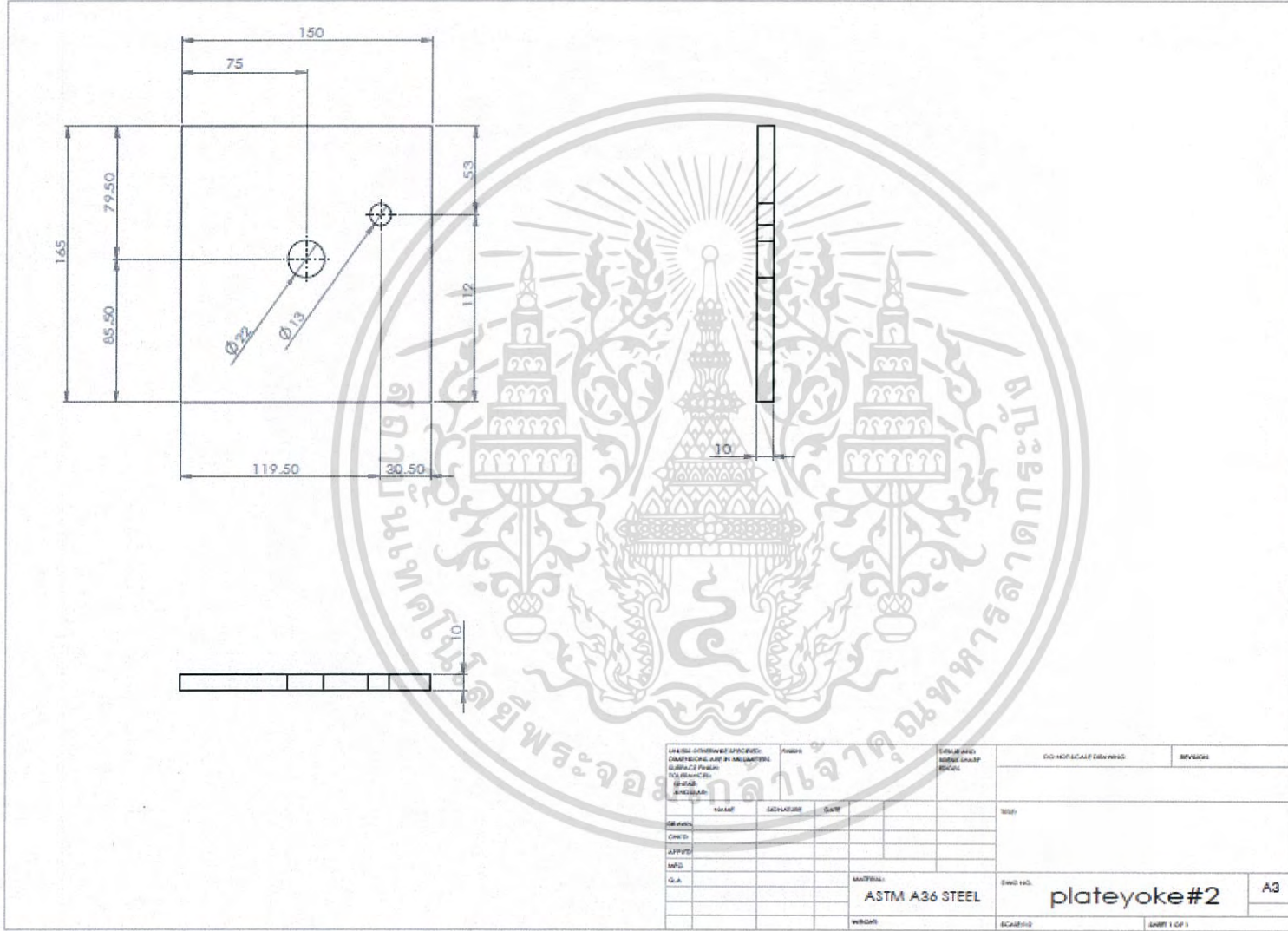
รูปที่ ก.16 Shaft-flywheel



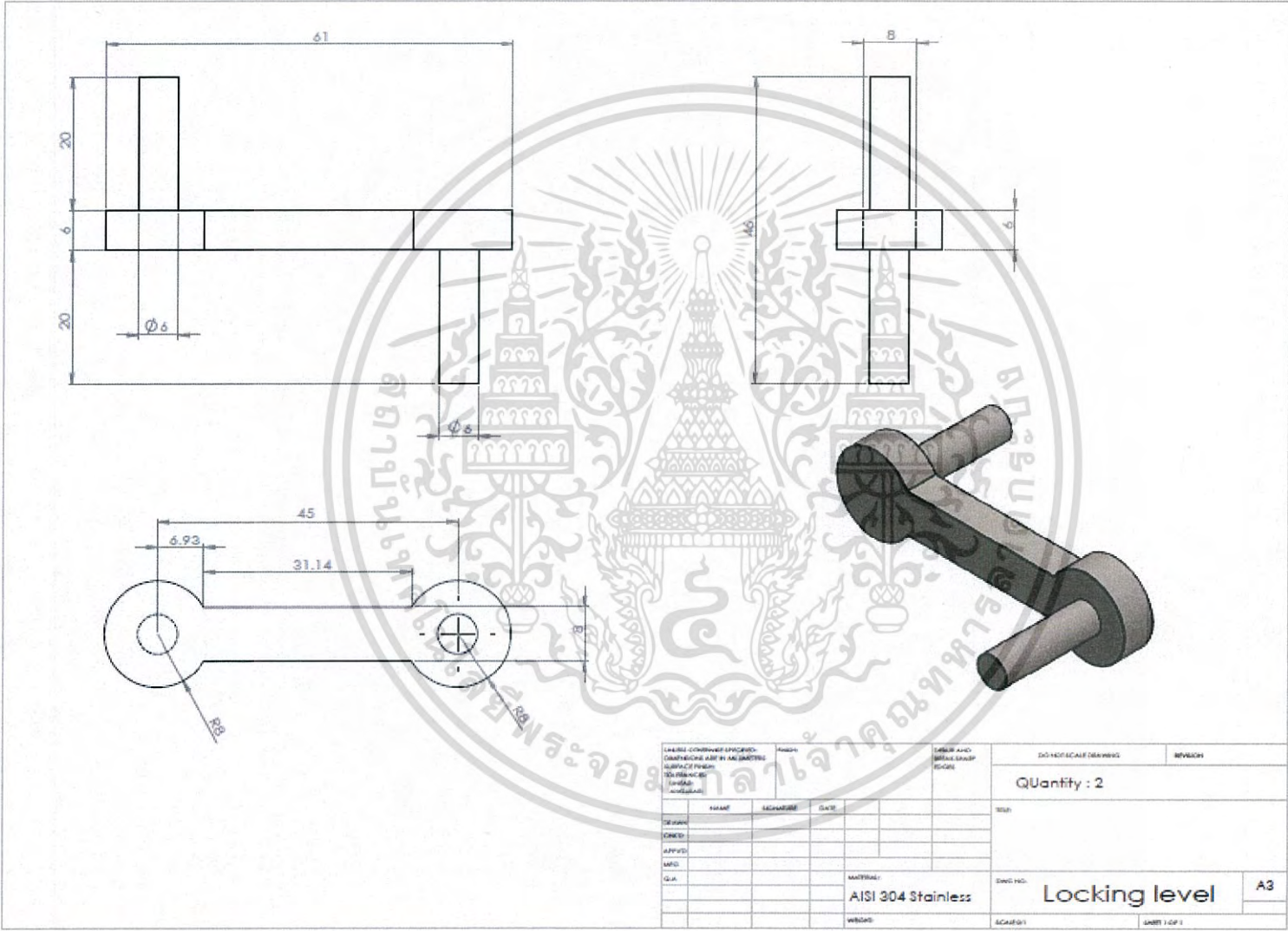
รูปที่ ก.17 Shaft-bearing



รูปที่ ก.18 Plateyoke#1



รูปที่ ก.19 Plateyoke#2



รูปที่ น.20 Locking level

