

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กแบบแกมมา  
DESIGN AND BUILD A GAMMA-TYPED STIRLING ENGINE



เลขหมู่.....  
กษทะเบียน..... 110969  
วัน,เดือน,ปี..... - 7 S.A. 2553

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND BUILD A GAMMA-TYPED STIRLING ENGINE



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2552

สาขา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กแบบแกมมา

Design and build a gamma-typed Stirling engine

ผู้จัดทำ

- |                 |                |              |          |
|-----------------|----------------|--------------|----------|
| 1. นายเบญจพล    | โตโหมด         | รหัสประจำตัว | 49010510 |
| 2. นางสาวพรพรรณ | เชียวชาญกิจการ | รหัสประจำตัว | 49010611 |
| 3. นายภาณุวัฒน์ | พรวิฑิต        | รหัสประจำตัว | 49010712 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กแบบเกมมา

เบญจพล โตโหมด

พรพรรณ เชี่ยวชาญกิจการ

ภาณุวัฒน์ พรวันชาติ

ดร.สุตาทภัทร แคว้นเขาเม็ง อาจารย์ที่ปรึกษา

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันราคาน้ำมันมีแนวโน้มพุ่งตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นำไปสู่วิกฤติการณ์ราคาน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังมีปัญหาหามลพิษทางอากาศที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายใน ซึ่งส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายนอก ข้อดีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือ ออกแบบง่าย เครื่องยนต์ทำงานเงียบ มลพิษต่ำและมีความหลากหลายของแหล่งพลังงานความร้อนที่ให้กับเครื่องยนต์ โครงการนี้จึงทำการศึกษาและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเกมมาขึ้น ซึ่งเครื่องยนต์ประกอบไปด้วย 1 กระจกอบสุบดิสเพลสเซอร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับ 2 กระจกอบสุบกำลัง และกระจกอบสุบแต่ละอันจะมีลูกสูบอยู่ซึ่งการทำงานของลูกสูบทั้งสามนี้จะถูกเชื่อมต่อด้วยเพลลาข้อเหวี่ยงที่ถูกออกแบบขึ้น โดยออกแบบให้ลูกสูบดิสเพลสเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 226 มิลลิเมตร และระยะชัก 110 มิลลิเมตร ส่วนลูกสูบกำลังนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 97.5 มิลลิเมตร และระยะชัก 48 มิลลิเมตร โดยเครื่องยนต์นี้จะมีความสามารถผลิตกำลังตามทฤษฎี 10 วัตต์ ความดันของอากาศ 1 บาร์ อุณหภูมิส่วนร้อน 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนเย็น 65 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที การทดลองนี้ได้ใช้แหล่งให้ความร้อนจากแก๊สหุงต้ม จากผลการทดลองจะได้ผลของเครื่องยนต์ทำงานที่ความดันภายในกระจกอบสุบที่ 0.15 บาร์ ทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิส่วนร้อนที่ 534.82 องศาเซลเซียสและส่วนเย็นที่อุณหภูมิ 57.6 องศาเซลเซียส วัดความเร็วรอบได้เท่ากับ 53 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Design and build a gamma-typed Stirling engine

Benjapon Tomot

Pornpun Chieochankitjakarn

Panuwat Pornwanchad

Dr.Sutapat Kwankaomeng Advisor

### Abstract

Currently, fossil fuel price is increasing continuously leading to fuel price crisis. In addition, exhaust from fossil fuel engine as in the internal combustion engine causes air pollution, green house effect, and global warming. Stirling engine is a hot gas engine that offers good advantages over conventional engine in fuel choice, simple design, quiet, and low pollution. This project aimed to study, design, build and test the gamma-typed Stirling engine. The gamma configuration of the engine consists of one displacer's cylinder which connected with two power piston's cylinders. The working mechanism of the displacer and the power pistons were designed as slider crank with two flywheels storing energy for each of them. The engine specifications consist of the displacer diameter and stroke of 226 mm and 110 mm, respectively, and the power piston diameter and stroke of 97.5 mm and 48 mm, respectively. The engine can produce the theoretical power of 10 watts with air as the working gas at 1 bar, heater temperature of  $500^{\circ}\text{C}$ , cooler temperature of  $65^{\circ}\text{C}$ , and engine speed of 60 rpm. The prototype was built and tested. LPG tank was used as the heat source. In the proof of concept device, the experiments were conducted with heater temperature of  $534.80^{\circ}\text{C}$ , cooler temperature of  $57.6^{\circ}\text{C}$  providing engine speed at 53 rpm.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง เป็นอย่างสูง ซึ่งได้ให้คำแนะนำถึงประเด็นต่างๆในการศึกษาและชี้แนวทางในการแก้ปัญหา การค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม อันเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา รวมทั้งการแก้ไขงานให้สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังต้องขอบพระคุณอาจารย์บัญชา คังตระกูลที่ได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ และอาจารย์รัฐพล ปานพรมมินทร์ที่ได้ให้คำแนะนำในการทดสอบเครื่องยนต์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต รวมไปถึงการสนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์ในการวิจัยและให้กำลังใจที่ดีเสมอมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VII
รายการสัญลักษณ์	IX
<b>บทที่ 1. บทนำ</b>	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
<b>บทที่ 2. วัฏจักรสเตอริงและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 วัฏจักรสเตอริงในอุดมคติ	4
2.2 ลักษณะของเครื่องยนต์สเตอริง	6
2.3 พื้นฐานของเครื่องยนต์ความร้อน	7
2.4 เครื่องยนต์แบบผลต่างอุณหภูมิต่ำ	12
2.5 คิสเพลสเซอร์	13
2.6 รีเจนเนอเรเตอร์	16
2.7 สารทำงาน	17
2.8 การวิเคราะห์ห้วงกัทฤษฎีของเครื่องยนต์สเตอริง	17
2.9 พัฒนาการของเครื่องยนต์สเตอริง	19
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
<b>บทที่ 3. การออกแบบและการคำนวณ</b>	25
3.1 สมการการประเมินกำลังของเครื่องยนต์	26
3.2 การวิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์	28
3.3 ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอริง	31
<b>บทที่ 4. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง</b>	39
4.1 อุปกรณ์การทดลอง	39
4.2 วิธีการทดลอง	41
4.3 ผลการทดลอง	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	43
5.1 สรุปผลการทดลอง	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	46
ภาคผนวก ก. ตารางผลการทดลอง	47
ภาคผนวก ข. แบบเขียนและขนาดส่วนประกอบต่างๆของชิ้นงาน	49
ภาคผนวก ค. บทความประกอบการนำเสนอโครงงาน	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

3.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ส์เตอร์ลิงชนิดเกมม่าที่ออกแบบ

38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วัฏจักรสเตอริง	5
2.2 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันในจังหวะเริ่มต้นการทำงาน	9
2.3 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันในขณะที่ให้ความร้อน	9
2.4 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันในขณะที่ให้ความร้อนและลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ออก	10
2.5 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันในขณะที่ลูกสูบหยุดการเคลื่อนที่	10
2.6 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันขณะระบายความร้อน	11
2.7 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันขณะระบายความร้อนแบบลูกสูบกำลังเคลื่อนที่เข้า	12
2.8 ลักษณะเครื่องยนต์แบบผลต่างอุณหภูมิค่า	13
2.9 ตำแหน่งเริ่มต้นการทำงานของดีสเพลสเซอร์	14
2.10 ตำแหน่งดีสเพลสเซอร์อยู่ทางด้านร้อน	14
2.11 ตำแหน่งดีสเพลสเซอร์อยู่ทางด้านเย็น	15
2.12 การต่อก้านดีสเพลสเซอร์เข้ากับดีสเพลสเซอร์	15
2.13 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ประดิษฐ์โดย โรเบิร์ต สเตอริง	19
2.14 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในการประชุมนานาชาติ ครั้งที่ 6	20
2.15 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงของบริษัทฟิลลิปส์ในยุคแรก	20
3.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Beale number กับอุณหภูมิความร้อนที่ป้อนสำหรับการ การออกแบบเบื้องต้น	25
3.2 ลักษณะของล้อยช่วยแรงที่ออกแบบ	27
3.3 แผนภาพ P-V และ T-S ของวัฏจักรสเตอริง	28
3.4 ลูกสูบกำลัง	31
3.5 ครอบลูกสูบกำลัง	32
3.6 ดีสเพลสเซอร์	33
3.7 ครอบลูกสูบดีสเพลสเซอร์	34
3.8 เฟลท	35
3.9 ก้านสูบ	36
3.10 ล้อยช่วยแรง	37
4.1 เตาแก๊ส	39
4.2 เครื่องวัดรอบ	39
4.3 อุปกรณ์วัดความดัน	40
4.4 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด	40
4.5 กราฟแสดงผลต่างอุณหภูมิส่วนร้อนและส่วนเย็น	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข. 1 แบบเขียนและขนาดของแผ่นเพลทหลัก	50
ข. 2 แบบเขียนและขนาดของลูกสูบคิสเพลสเซอร์	51
ข. 3 แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบคิสเพลสเซอร์	52
ข.4 แบบเขียนและขนาดของลูกสูบกำลัง	53
ข.5 แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบกำลัง	54
ข.6 แบบเขียนและขนาดของขาตั้งรองรับ	55
ข.7 แบบเขียนและขนาดของล้อช่วยแรง	56
ข.8 แบบเขียนและขนาดของแผ่นเพลทเชื่อมต่อบนส่วนครอบฝาสูบกำลัง	57
ข.9 แบบเขียนและขนาดของก้านสูบกำลัง	58
ข.10 แบบเขียนและขนาดของก้านสูบคิสเพลสเซอร์	59
ข.11 แบบเขียนและขนาดของคิสเพลสเซอร์ ไกด์	60
ข.12 แบบเขียนและขนาดของฝาครอบลูกสูบกำลัง	61
ข.13 แบบเขียนและขนาดของตัวประกบแบริ่ง	62
ข.14 แบบเขียนและขนาดของแผ่นเพลทรองรับเพลลาข้อเหวี่ยง	63
ข.15 แบบเขียนและขนาดของข้อต่อก้านสูบกำลัง	64
ข.16 แบบเขียนและขนาดของข้อต่อลูกสูบคิสเพลสเซอร์	65
ข.17 แบบเขียนและขนาดของหมุดเชื่อมข้อต่อลูกสูบคิสเพลสเซอร์	66
ข.18 แบบเขียนและขนาดของหมุดเชื่อมข้อต่อลูกสูบกำลัง	67
ข.19 แบบเขียนและขนาดของหมุดเชื่อมต่อบนล้อช่วยแรง	68
ข.20 แบบเขียนและขนาดของเพลลาข้อเหวี่ยง	69
ข.21 แบบเขียนและขนาดของข้อต่อก้านสูบคิสเพลสเซอร์	70
ข.22 แบบเขียนและขนาดของข้อต่อก้านลูกสูบกำลัง	71

## รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
$A_d$	พื้นที่หน้าตัดคิสเพลสเซอร์ ( $mm.^2$ )
$A_p$	พื้นที่หน้าตัดลูกสูบกำลัง ( $mm.^2$ )
$C_v$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
$D_d$	เส้นผ่านศูนย์กลางคิสเพลสเซอร์ ( $mm.$ )
$D_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบกำลัง ( $mm.$ )
$L_d$	ความยาวก้านสูบคิสเพลสเซอร์ ( $mm.$ )
$L_p$	ความยาวก้านสูบลูกสูบกำลัง ( $mm.$ )
$N$	รอบของเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที)
$P$	กำลังงาน ( $watt$ )
$P_a$	ความดันบรรยากาศ ( $P_a$ )
$P_{max}$	ความดันสูงสุดในระบบ ( $P_a$ )
$P_{mean}$	ความดันเฉลี่ยในระบบ ( $P_a$ )
$Q$	พลังงานความร้อน ( $Joule$ )
$R$	ค่าคงที่จำเพาะของอากาศ ( $0.287 kJ/kg \cdot K$ )
$S$	เอนโทรปี (entropy, $kJ/kg \cdot K$ )
$S_d$	ระยะชักคิสเพลสเซอร์ ( $mm.$ )
$S_p$	ระยะชักลูกสูบกำลัง ( $mm.$ )
$T$	แรงบิด ( $N \cdot m$ )
$T_H$	อุณหภูมิส่วนร้อน (Heater temperature $^{\circ}C, K$ )
$T_L$	อุณหภูมิส่วนเย็น (Cooler temperature $^{\circ}C, K$ )
$T_{max}$	อุณหภูมิสูงสุดในระบบ ( $^{\circ}C, K$ )
$T_{min}$	อุณหภูมิต่ำสุดในระบบ ( $^{\circ}C, K$ )
$T_0$	อุณหภูมิห้อง ( $^{\circ}C, K$ )
$V$	ปริมาตร ( $mm.^3$ )
$V_d$	ปริมาตรคิสเพลสเซอร์ ( $mm.^3$ )
$V_p$	ปริมาตรลูกสูบกำลัง ( $mm.^3$ )
$V_x$	ปริมาตรนิ่ง ( $mm.^3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อ/ความหมาย
$V_{\max}$	ปริมาตรสูงสุด ( $mm.^3$ )
$V_{\min}$	ปริมาตรต่ำสุด ( $mm.^3$ )
$W$	งาน ( <i>Joule</i> )
$f$	รอบของเครื่องชนิด ( <i>Hz</i> )
$r$	$V_{\max} / V_{\min}$ คือ อัตราส่วนการอัด

### สัญลักษณ์กรีก (Greek symbols)

$\tau$   $T_{\max} / T_{\min}$  คือ อัตราส่วนอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันราคาเชื้อเพลิงที่ผลิตมาจากฟอสซิล ได้มีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเพราะเชื้อเพลิงเหล่านี้ล้วนอยู่ที่พิภพต้องทำการขุดเจาะออกมา แหล่งที่พบมากจะอยู่ในตะวันออกกลาง กลุ่มประเทศเหล่านี้ได้จำกัดปริมาณการผลิตซึ่งไม่พอเพียงกับความต้องการใช้ และเมื่อนำมาใช้ก็มีโอกาสจะหมดไป จนมีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการใช้งานเครื่องยนต์สันดาปภายใน อย่างเช่น เครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เครื่องยนต์สันดาปภายในนี้จะใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิง เมื่อภายในกระบอกสูบเกิดการเผาไหม้โดยเชื้อเพลิงจะให้พลังงานความร้อนออกมา แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้จะขยายตัวไปดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ก่อให้เกิดพลังงานกลเพื่อนำไปใช้ขับเคลื่อนระบบ ส่วนแก๊สที่ถูกเผาไหม้หลังจากคันลูกสูบแล้วก็จะถูกระบายออกสู่บรรยากาศเรียกว่าแก๊สไอเสีย ความต้องการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีจำนวนมากทุกวัน ส่งผลได้จากการใช้รถยนต์กันอย่างมากมาย เหตุนี้เองทำให้เกิดแก๊สไอเสียเพิ่มมากขึ้นจนเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดปัญหาทางสุขภาพตามมา

การพัฒนาเครื่องยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ต่ำ และการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสมบูรณ์ที่สุด นั้นก็ยังเป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ การแก้ปัญหาที่แท้จริงควรพยายามคิดค้น ปรับปรุง พัฒนาเครื่องยนต์ชนิดใหม่ๆที่ใช้เชื้อเพลิงราคาถูก แก๊สไอเสียไม่ก่อมลพิษ จะทำให้เกิดประโยชน์อย่างมาก โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งต้องนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศในราคาสูง เพื่อสนองความต้องการใช้ภายในประเทศ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่เป็นต้นแบบของเครื่องยนต์สันดาปภายนอก โดยมีการทำงานเป็นระบบปิดภายใต้วัฏจักรสเตอร์ลิง โดยมีแก๊สที่บรรจุในกระบอกสูบเป็นสารทำงาน ดำเนินการโดยอาศัยหลักความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยจะแบ่งออกเป็นส่วนร้อนและส่วนเย็น ในวัฏจักรสเตอร์ลิงประกอบด้วยการทำงานตามกระบวนการอัด กระบวนการรับความร้อน กระบวนการขยายตัว และกระบวนการคายความร้อน เมื่อแก๊สได้รับความร้อนจากภายนอกทำให้แก๊สในระบบมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเกิดเป็นวัฏจักร การไหลของแก๊สภายในระบบถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล เครื่องยนต์ชนิดนี้เป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกสามารถรับความร้อนจากแหล่งใดก็ได้ เช่น ความร้อนจากแสงอาทิตย์ ความร้อนจากการเผาไหม้หรือความร้อนจากกระบวนการอุตสาหกรรม เป็นต้น แหล่งพลังงานความร้อนดังกล่าวนี้หาง่าย ราคาถูก และบางอย่างเป็นการนำพลังงานที่ทิ้งแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ นอกจากนั้นเครื่องยนต์ชนิดนี้เป็นเครื่องยนต์ที่มีเสียงเงียบ ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ มีกลไกการทำงานน้อย ดังนั้นจึงสามารถนำมาเป็นทางเลือกในการหาพลังงานทดแทนในปัจจุบัน

ในช่วงต้นของการปฏิวัติอุตสาหกรรมปัญหาเครื่องยนต์ไอน้ำ (Steam Engine) เกิดการระเบิดนั้นเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเสมอ ทำให้ผู้คนบาดเจ็บและล้มตายเป็นจำนวนมาก เนื่องจากในสมัยนั้นความรู้ด้านวิทยาศาสตร์ยังไม่ดีพอ จากปัญหานี้ ในปี ค.ศ. 1816 โรเบิร์ต สเตอร์ลิง (Robert Stirling) ได้ประดิษฐ์สิ่งทีเรียกว่า “A New Type of Hot Air Engine with Economizer” ขึ้นมา ซึ่งเครื่องยนต์ชนิดนี้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และเป็นทางเลือกใหม่แทนเครื่องจักรไอน้ำ โดยเครื่องยนต์ชนิดนี้จะสามารถแก้ปัญหาการระเบิดของเครื่องยนต์ได้ นอกจากนั้นเครื่องยนต์ชนิดนี้ยังใช้เชื้อเพลิงน้อย และให้พลังงานมากกว่าเครื่องยนต์ไอน้ำอื่นๆ ในยุคนั้นอีกด้วย ซึ่งหลังจากนั้นได้มีบุคคลอื่นนำไปพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่ปัญหาหลักที่พบมากที่สุดที่ยุคนั้นก็คือ วัสดุที่นำมาใช้สร้างเครื่องยนต์นั้นเอง เนื่องจากในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้น ด้านร้อนของเครื่องยนต์ (hot end) จะถูกให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อน และมันจะยังคงรักษาอุณหภูมินั้นไว้ เป็นผลให้วัสดุนั้นไม่สามารถเย็นลงในช่วงเวลาระหว่างการเดินเครื่อง ในช่วงที่โรเบิร์ต สเตอร์ลิง ได้สร้างเครื่องยนต์เครื่องแรกขึ้นมานั้น วัสดุที่หาได้มีเพียงแคเหล็กหล่อ (cast iron) เท่านั้น และเมื่อด้านร้อนของเหล็กหล่อถูกทำให้ร้อนจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (oxidize) อย่างรวดเร็ว ผลก็คือ การเกิดรูใหม่บนเหล็กหล่อ ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง เป็นสาเหตุให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำ ทั้ๆ ที่ปัญหาความยุ่งยากในเรื่องวัสดุยังไม่สามารถแก้ไขได้นั้น เครื่องยนต์สเตอร์ลิงบางส่วนก็ถูกนำไปใช้ในการเดินเครื่องกลเล็กๆ (small machines) ปั๊ม (pump) และการหมุนพัดลม (fan) จนกระทั่งในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 ได้มีการสร้างเครื่องยนต์แก๊สโซลีน และเครื่องยนต์ดีเซล และปลายศตวรรษที่ 19 มอเตอร์ไฟฟ้าได้ถูกสร้างมีการพัฒนาทั้งเครื่องยนต์สันดาปภายในและมอเตอร์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว รวมถึงทั้งสองอย่างมีกำลังงานมากกว่าเครื่องจักรไอน้ำและเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเมื่อมีขนาดเท่ากัน ทำให้การพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้หยุดลง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และผลิตได้ง่ายกว่า เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในแบบลูกสูบ ในกรณีที่มีการผลิตจำนวนมากก็จะมีราคาถูกกว่าเช่นกัน และสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนา สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานต้นทุนต่ำได้และมีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ถึงแม้ว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงอาจจะมีประสิทธิภาพต่ำ แต่ก็มีความปลอดภัยสูงและราคาถูก ซึ่งจุดนี้ทำให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีคุณค่าต่อการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

สำหรับในประเทศไทย เทคโนโลยีเกี่ยวกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงยังไม่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย แต่ก็มีการศึกษาและวิจัยจากมหาวิทยาลัยต่างๆ และหน่วยงานของรัฐ ที่เห็นความสำคัญของการใช้พลังงานทดแทน ซึ่งก็เป็นจุดเริ่มของการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ในประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาหลักการทำงานและการออกแบบเครื่องยนต์ความร้อนสเตอร์ลิง
- 1.2.2 สร้างแบบจำลองของเครื่องยนต์ที่ได้จากการศึกษาหาความรู้และทำการออกแบบขึ้น โดยใช้โปรแกรมออกแบบทางวิศวกรรม
- 1.2.3 สร้างเครื่องยนต์จริงตามแบบ
- 1.2.4 ทดสอบการทำงานของเบื้องต้นของเครื่องยนต์

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

สำหรับโครงการนี้ จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สามารถให้กำลังได้ 10 วัตต์ โดยอาศัยการทำงานตามวัฏจักรสเตอร์ลิง โดยมีการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์พร้อมทั้งใช้การวิเคราะห์ต่างๆเพื่อให้ได้กำลังตามที่คาดหวังไว้ โดยจะต้องเหมาะสมกับต้นทุนที่มีอยู่ด้วย

## 1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและค้นคว้างานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง
- 1.4.2 วิเคราะห์การทำงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์ชนิดแกมมา
- 1.4.3 คำนวณและออกแบบ โดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม
- 1.4.4 ดำเนินการวัสดุและทำการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงตามทีออกแบบพร้อมทั้งแก้ไขแบบให้สมบูรณ์
- 1.4.5 ทดสอบการทำงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์
- 1.4.6 สรุปผลและวิเคราะห์แนวทางแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### วัฏจักรสเตอร์ลิงและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ความร้อน (Heat engine) ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล หรือ งานได้ ความร้อนเป็นสิ่งที่ต้องป้อนให้กับเครื่องยนต์ โดยแหล่งพลังงานความร้อนนั้นสามารถเลือกใช้ได้อย่างหลากหลาย และสิ่งที่ออกมาจากเครื่องยนต์ความร้อนนั้นก็คือ พลังงานกล หรืองานนั่นเอง

#### 2.1 วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ (The Ideal Stirling Cycle)

วัฏจักรสเตอร์ลิงมีความคล้ายคลึงกับวัฏจักรคาร์โนต์อยู่บ้าง จากรูป 2.1(ข) พิจารณากระบอกสูบซึ่งมีสองลูกสูบที่มีตำแหน่งตรงข้ามกัน ส่วนรีเจนเนอเรเตอร์จะอยู่ระหว่างลูกสูบทั้งสอง รีเจนเนอเรเตอร์นั้นทำหน้าที่ดูดซับและปลดปล่อยความร้อน หนึ่งในสองของปริมาตรที่อยู่ระหว่างรีเจนเนอเรเตอร์กับลูกสูบจะเรียกว่า ปริมาตรขยาย ซึ่งจะรักษาระดับอุณหภูมิสูง ( $T_{max}$ ) ไว้ ส่วนปริมาตรอีกด้านจะเรียกว่า ปริมาตรอัด ซึ่งจะรักษาระดับอุณหภูมิต่ำ ( $T_{min}$ ) ทั้งหมดกำหนดให้ไม่มีการนำความร้อน ลูกสูบทั้งสองเคลื่อนที่โดยปราศจากแรงเสียดทาน และไม่เกิดการรั่วของสารทำงาน

การทำงานของวัฏจักรสเตอร์ลิงเริ่มจากกำหนดให้ลูกสูบที่อยู่ในส่วนปริมาตรขยายอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบนและลูกสูบที่อยู่ในส่วนปริมาตรอัดอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายล่าง ในช่วงนี้จะมีปริมาตรมากที่สุดดังนั้นความดันและอุณหภูมิจะมีค่าน้อยที่สุด ดังรูป 2.1(ก) บนแผนภาพ P-V และ T-S จากรูป (ก)

ขบวนการอัด (1-2) ลูกสูบในส่วนปริมาตรอัดจะค่อยๆเคลื่อนที่มาอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน ส่วนลูกสูบในส่วนปริมาตรขยายอยู่นิ่ง สารทำงานจะถูกอัดในส่วนปริมาตรอัดทำให้ความดันเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิจะคงที่เพราะมีการคายความร้อนจากปริมาตรอัดมายังสิ่งแวดล้อม

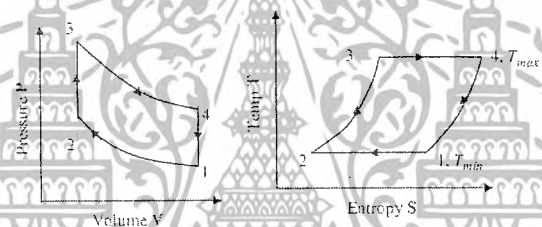
ขบวนการขยาย (2-3) ลูกสูบที่อยู่ในส่วนปริมาตรอัดและปริมาตรขยายจะเคลื่อนที่พร้อมๆกัน โดยลูกสูบที่อยู่ในปริมาตรอัดจะเคลื่อนที่ไปยังรีเจนเนอเรเตอร์ (ลูกสูบที่อยู่ในปริมาตรขยายจะเคลื่อนที่ออกไปจากรีเจนเนอเรเตอร์) ทำให้ปริมาตรในขบวนการนี้คงที่ สารทำงานจะเคลื่อนที่จากส่วนปริมาตรอัดผ่านรีเจนเนอเรเตอร์มายังส่วนปริมาตรขยาย ซึ่งเดิมมีอุณหภูมิต่ำจะค่อยๆเปลี่ยนเป็นอุณหภูมิสูง โดยจะได้รับการถ่ายเทความร้อนจากรีเจนเนอเรเตอร์ ขบวนการนี้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาตรคงที่และความดันเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

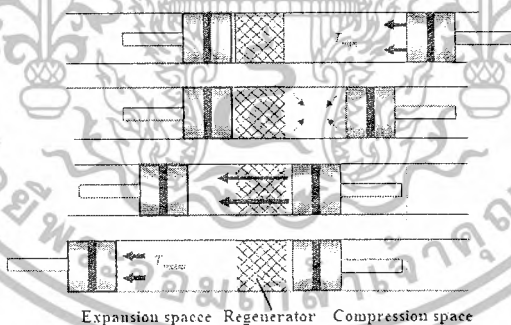
ขบวนการอัด(3-4) ลูกสูบที่อยู่ในปริมาตรขยายค่อยๆเคลื่อนตัวออกจากรีเจนเนอเรเตอร์มายังศูนย์ตายล่าง ขณะที่ลูกสูบในส่วนอัดอยู่นิ่งที่ศูนย์ตายบน (ติดกับรีเจนเนอเรเตอร์) ขบวนการนี้ความดันลดลง ขณะที่ปริมาตรสูงขึ้น อุณหภูมิมีค่าคงที่เพราะมีการได้รับความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนภายนอก

ขบวนการขยาย(4-1) ในระหว่างที่ลูกสูบทั้งสองกำลังเคลื่อนที่กลับพร้อมๆกัน สารทำงานจะเคลื่อนที่ผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ (ปริมาตรคงที่) ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากสารทำงานสู่รีเจนเนอเรเตอร์ ทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิตกลงจนอุณหภูมิต่ำสุด ( $T_{min}$ ) ความร้อนที่ถูกถ่ายเทสู่รีเจนเนอเรเตอร์นั้น จะถูกใช้ในขบวนการ (2-3) เพื่อถ่ายเทความร้อนสู่สารทำงานอีกครั้ง

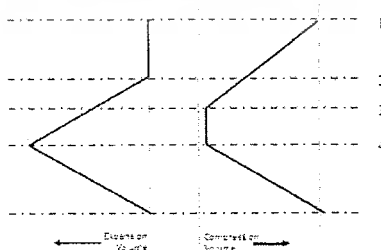
การเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลังและคิสเพลสเซอร์ต้องมีการเคลื่อนที่ต่างกัน โดยระยะชักของคิสเพลสเซอร์ต้องนำหน้าลูกสูบกำลังประมาณ 90 องศา เพื่อทำหน้าที่ในการถ่ายเทสารทำงานจากกระบอกสูบหนึ่งไปอีกระบอกสูบหนึ่ง หน้าที่ของลูกสูบกำลังคือการเปลี่ยน การขยายตัวของสารทำงานที่ความดันสูง และการอัดตัวที่อุณหภูมิต่ำไปสู่การเคลื่อนที่ โดยผ่านเพลทข้อเหวี่ยงและล้อช่วยแรง



(ก)



(ข)



(ค)

## รูปที่ 2.1 วัฏจักรสเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ก) P-V และ T-S diagrams.
- (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกสูบในวัฏจักร
- (ค) Time-displacement diagram.

สามารถพิจารณาข้อกำหนดต่างๆดังนี้

- 1) เครื่องยนต์ความร้อน (Heat engine) เป็นการทำงานระหว่างแหล่งอุณหภูมิสูง ( $T_{max}$ ) และอุณหภูมิต่ำ ( $T_{min}$ )
- 2) สำหรับวัฏจักรของเครื่องยนต์ความร้อนเป็นขบวนการย้อนกลับได้
- 3) ผลต่างระหว่างอุณหภูมิกับสารทำงาน (Working fluid) และแหล่งจ่ายพลังงานความร้อนหรือแหล่งรับพลังงานความร้อน ไม่ควรเกินผลต่างระหว่างปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในขบวนการ
- 4) ขบวนการรับความร้อน (Heat addition) และขบวนการถ่ายเทความร้อน (Heat rejection) ระหว่างวัฏจักรจะต้องอยู่ในขบวนการอุณหภูมิคงที่ (Isothermal process)
- 5) ขบวนการระหว่างความร้อนที่ถ่ายเทจากสารทำงาน ไปยังส่วนหนึ่งของวัฏจักรแล้วถ่ายเทความร้อนกลับจากวัฏจักรมายังสารทำงาน เรียกว่า รีเจนเนอเรเตอร์

วัฏจักรสเตอร์ลิง (Stirling cycle) ประกอบด้วยดังนี้

- ขบวนการ 1-2 เป็นขบวนการอัดตัวโดยอุณหภูมิคงที่ ความร้อนจะถ่ายเทออกสู่แหล่งระบายความร้อน
- ขบวนการ 2-3 เป็นขบวนการถ่ายเทความร้อนให้สารทำงานโดยปริมาตรคงที่ ความร้อนถ่ายเทจากรีเจนเนอเรเตอร์กลับสู่สารทำงาน
- ขบวนการ 3-4 เป็นขบวนการขยายตัวโดยอุณหภูมิคงที่ ความร้อนเข้าสู่ระบบจากแหล่งให้ความร้อน
- ขบวนการ 4-1 เป็นขบวนการถ่ายเทความร้อนออกจากสารทำงานโดยปริมาตรคงที่ ความร้อนถ่ายเทจากสารทำงานมายังรีเจนเนอเรเตอร์

## 2.2 ลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ต่างๆ ได้ถูกประกอบรวมกันเพื่อให้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถทำงานได้ตามวัฏจักรสเตอร์ลิง ซึ่งวัฏจักรสเตอร์ลิงประกอบด้วยกระบวนการคงที่ ขณะที่มีการไหลของสารทำงานระหว่างส่วนร้อนและส่วนเย็น และกระบวนการอุณหภูมิคงที่ ขณะที่มีการรับความร้อนและคายความร้อน ในช่วงที่มีการอัดและขยายตัว กระบวนการอัดและขยายนี้จะเกิดในกระบอกสูบที่มีลูกสูบกำลัง (Power piston) ส่วนลูกสูบดันแก๊สหรือลูกสูบเบ้า (Displacer) ผลักดันแก๊สให้เคลื่อนที่ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกลับระหว่างส่วนร้อน รีเจนเนอเรเตอร์ และส่วนเย็นที่ปริมาตรคงที่ดังรูป เมื่อดิสเพลสเซอร์ เคลื่อนที่ไปยังส่วนเย็น จะดันแก๊สจากส่วนเย็นให้ไหลไปยังส่วนร้อนและเป็นเช่นนี้ในทางกลับกัน ลักษณะของเครื่องยนต์ต่างๆ นั้น มีชื่อว่า แอลฟา (alpha) เบต้า (beta) และแกมมา (gamma) ซึ่งมีการออกแบบที่ แตกต่างกัน

### 2.2.1 แบบแอลฟา (alpha)

รูปแบบนี้จะไม่มีการดิสเพลสเซอร์ แต่มีสองลูกสูบ โดยเรียกลูกสูบร้อนและลูกสูบเย็น ลูกสูบ ทั้งสองมีการเคลื่อนที่ในลักษณะที่ทำให้ปริมาตรในระบบคงที่ เมื่อสารทำงานทั้งหมดถูกดันให้อยู่ใน ครอบสูบเดียว อีกลูกสูบหนึ่งจะหยุด และอีกลูกจะเคลื่อนที่ขยายหรืออัดสารทำงาน งานที่เกิดขึ้น จะได้จากการทำงานของลูกสูบร้อน

### 2.2.2 แบบเบต้า (beta)

รูปแบบนี้มีดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังในครอบสูบเดียวกัน ดิสเพลสเซอร์จะดันสารทำงาน ระหว่างส่วนร้อนและส่วนเย็นของครอบสูบให้ผ่านฮีตเตอร์ รีเจนเนอเรเตอร์ และคูลเลอร์ ลูกสูบ เย็นอยู่ในส่วนเย็นของครอบสูบ ทำหน้าที่อัดสารทำงานเมื่อสารทำงานอยู่ในส่วนเย็น และขยายตัว เมื่อสารทำงานเคลื่อนที่ไปยังส่วนร้อน

### 2.2.2 แบบแกมมา (gamma)

รูปแบบนี้มีครอบสูบแยกกันสำหรับดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังโดยทั้งสองครอบสูบ เชื่อมต่อกันและมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับแบบเบต้า แบบแกมมามีการส่งกำลังจากทั้งสองลูกสูบ ไปที่เพลลาข้อเหวี่ยงเดียวกัน ครอบสูบควรออกแบบให้อยู่ในแนวตั้งเพื่อลดแรงเสียดทาน

## 2.3 พื้นฐานของเครื่องยนต์ความร้อน [2]

พิจารณาครอบสูบซึ่งด้านหนึ่งปิดสนิท ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปิดด้วยลูกสูบที่สามารถ เคลื่อนที่ได้ โดยภายในครอบสูบจะมีอากาศบรรจุอยู่ ซึ่งอากาศภายในครอบสูบไม่สามารถ รั่วไหลออกมาภายนอกได้ สมมติให้อุปกรณ์ทั้งหมดอยู่ภายในห้องซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ และอยู่ที่ความดัน บรรยากาศปกติ ในตอนแรกนี้อากาศภายในครอบสูบจะมีอุณหภูมิและความดันเท่ากับอุณหภูมิและ ความดันภายนอกครอบสูบ ซึ่งลูกสูบจะอยู่ในตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.2

ในขั้นตอนนี้ต่อไปนี้จะให้ความร้อนแก่ครอบสูบเมื่อให้ความร้อนแก่ครอบสูบจะทำให้ อุณหภูมิของอากาศภายในครอบสูบสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นจะทำให้ความดันของ อากาศเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน เมื่อความดันของอากาศภายในครอบสูบสูงขึ้นก็สามารถผลักดัน ลูกสูบให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้

ในการพิจารณาลักษณะนี้คือ การเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานภายใน แต่สิ่งที่

ต้องการคืองานที่ได้ออกมาจากอุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง งานที่ได้เกิดจากการขยายตัวของอากาศร้อนซึ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรจุอยู่ในกระบอกสูบเพียงอย่างเดียว ถ้าลูกสูบเคลื่อนที่เนื่องจากการขยายตัวของอากาศร้อนภายใน กระบอกสูบมากเกินไป ลูกสูบก็จะหลุดออกจากกระบอกสูบ นั่นก็แสดงว่าสิ้นสุดการทำงาน ก็จะไม่เกิดงานอีกต่อไป ดังนั้นจึงต้องมีการทำให้อากาศภายในกระบอกสูบเย็นตัวลง เพื่อที่จะทำให้ลูกสูบสามารถเคลื่อนที่กลับมาได้ ก่อนที่จะหลุดจากกระบอกสูบ ในการทำให้กระบอกสูบเย็นตัวลง อุณหภูมิของอากาศภายในกระบอกสูบก็จะเย็นลงตามไปด้วย ซึ่งส่งผลทำให้แรงดันภายในกระบอกสูบต่ำกว่าแรงดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ ดังนั้นแรงดันบรรยากาศภายนอกก็จะสามารถดันลูกสูบให้เคลื่อนที่กลับมาได้ และการขยายตัวของอากาศจะต้องหยุดก่อนที่ลูกสูบจะหลุดออกจากกระบอกสูบ ถ้าเราทำให้กระบอกสูบมีความยาวมากๆ ลูกสูบก็จะสามารถเคลื่อนที่ไปได้มาก แต่ก็จะมีขีดจำกัดของการเคลื่อนที่ของลูกสูบคือ ลูกสูบสามารถเคลื่อนที่ออกไปได้จนกระทั่งความดันของอากาศภายในกระบอกสูบมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ

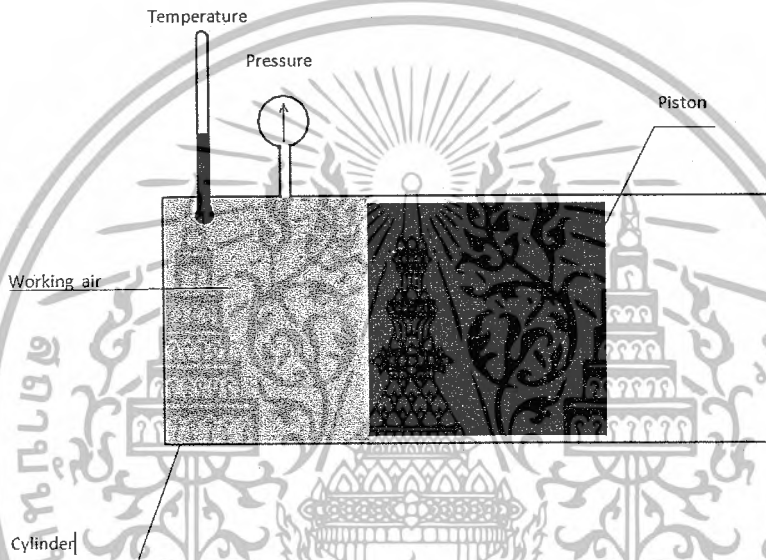
งานที่ต้องการ จะได้จากการให้ความร้อนแก่อุปกรณ์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้นการทำงาน จึงมีขีดจำกัดที่เกิดขึ้นจากตัวอุปกรณ์เองและ สารทำงาน อย่างเช่นขีดจำกัดในการทำงานของอุปกรณ์ ขึ้นอยู่กับความยาวของกระบอกสูบ อุณหภูมิของแหล่งจ่ายพลังงานความร้อน และขึ้นกับความดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ ส่วนขีดจำกัดในการทำงานของสารทำงาน (Working fluid) ไม่สามารถทำงานต่อไปได้ถ้าลูกสูบหลุดออกจากกระบอกสูบ หรือความดันของอากาศภายในกระบอกสูบมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ

สมมติให้การขยายตัวของอากาศที่เกิดขึ้นเนื่องจากการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น อุณหภูมิของอากาศภายในกระบอกสูบก็จะมีความร้อนเท่ากับอุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อนภายนอก และแรงดันของอากาศภายในกระบอกสูบก็จะสูง ถ้ารักษาระดับแรงดันภายในของอากาศให้สูงไว้ในขณะขบวนการขยายตัว ดังนั้นแรงดันภายในจะลดลงต่อเมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ออก แต่ก็ยังคงมีแรงดันภายในสูงกว่าแรงดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ แรงดันของอากาศภายในกระบอกสูบก็จะดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ ดังนั้นถ้าสามารถทำให้กระบอกสูบมีความยาวเพียงพอ การขยายตัวก็จะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆจนกระทั่ง แรงดันอากาศภายในกระบอกสูบมีค่าเท่ากับแรงดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ ดังนั้นก็จะได้งานออกมามากที่สุดในหนึ่งครั้งของการให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ ในขณะเดียวกันเราต้องการการทำงานที่ต่อเนื่อง คืองานต้องได้มากกว่าหนึ่งครั้ง ดังนั้นต้องทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ฉะนั้นจึงต้องให้ความร้อนแก่อุปกรณ์ใหม่อีก

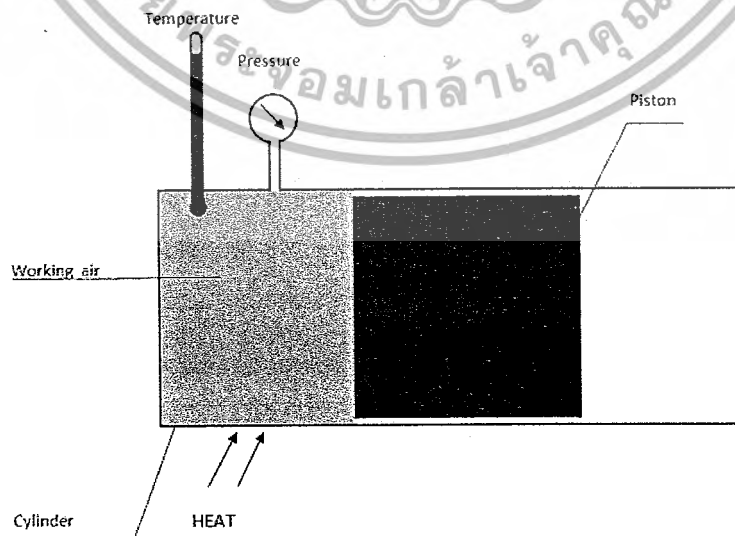
ในการทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับสู่สถานะเริ่มต้นจะกระทำโดย หลังจากขบวนการขยายตัวจบ สิ้นลงจะต้องทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับด้วยวิธีระบายความร้อนออกจากกระบอกสูบโดยทำให้อุณหภูมิรอบๆกระบอกสูบต่ำลงดังนั้นภายในกระบอกสูบก็จะต่ำลงกว่าแรงดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ ความแตกต่างของความดันทั้งสองนี้จะทำให้ลูกสูบสามารถเคลื่อนที่กลับมาได้ ลูกสูบจะเคลื่อนที่กลับมาจนกระทั่งแรงดันภายในของกระบอกสูบสูงขึ้นเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ ลูกสูบก็จะกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นอีกครั้ง เรียกขบวนการนี้ว่า ขบวนการอัดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนการอัดตัว แรงดันของอากาศภายในกระบอกสูบจะเพิ่มสูงขึ้น ส่วนอุณหภูมิอากาศภายในกระบอกสูบจะลดต่ำลงเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้น ขบวนการนี้จะหยุดก็ต่อเมื่อแรงดันอากาศภายในกระบอกสูบมีค่าเท่ากับแรงดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ ถ้าลูกสูบมีความเหมาะสม ก็สามารถดูดอากาศภายในกระบอกสูบ ไม่ให้มีการรั่วออกไปภายนอกหรือสามารถทำให้อากาศภายนอกไม่สามารถรั่วเข้ามาได้ ลูกสูบก็จะกลับมาอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นอีกครั้ง และอากาศภายในกระบอกสูบจะมีสถานะเหมือนกับตอนเริ่มต้นขบวนการคือ มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง และมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบเหมือนรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันในจังหวะเริ่มต้นการทำงาน

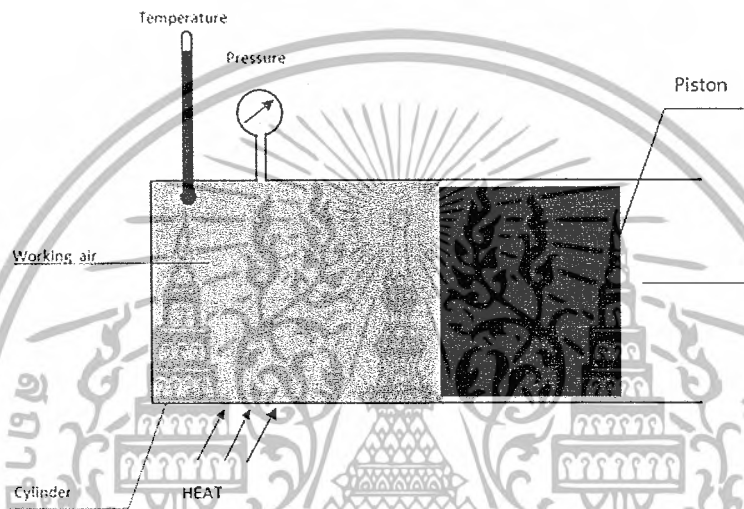


รูปที่ 2.3 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันในขณะที่ให้ความร้อน

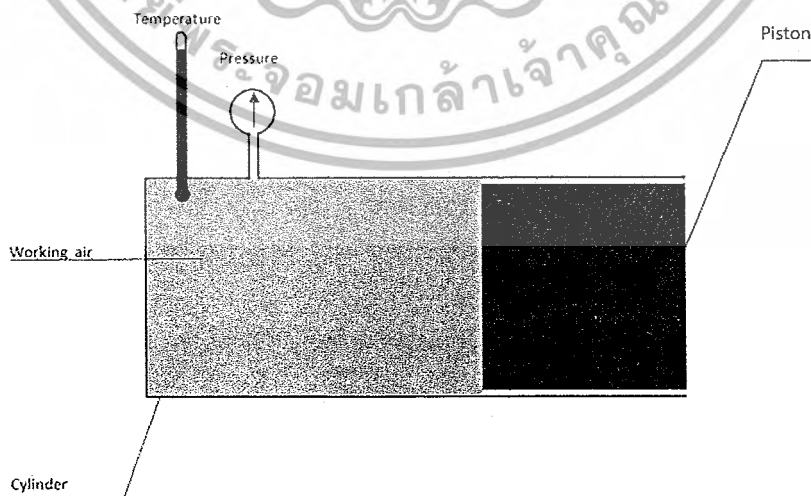
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาเป็ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบอกสูบซึ่งบรรจุอากาศ มีปลายด้านหนึ่งถูกปิดด้วยลูกสูบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของกระบอกสูบจะถูกปิดสนิท อากาศภายในกระบอกสูบมีอุณหภูมิและความดันเท่ากับอุณหภูมิและความดันของบรรยากาศภายนอก

ให้ความร้อนแก่กระบอกสูบ ซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิและความดันของอากาศภายในกระบอกสูบสูงกว่าอุณหภูมิและความดันบรรยากาศของอากาศภายนอกกระบอกสูบ



รูปที่ 2.4 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันในขณะที่ให้ความร้อนและลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ออก

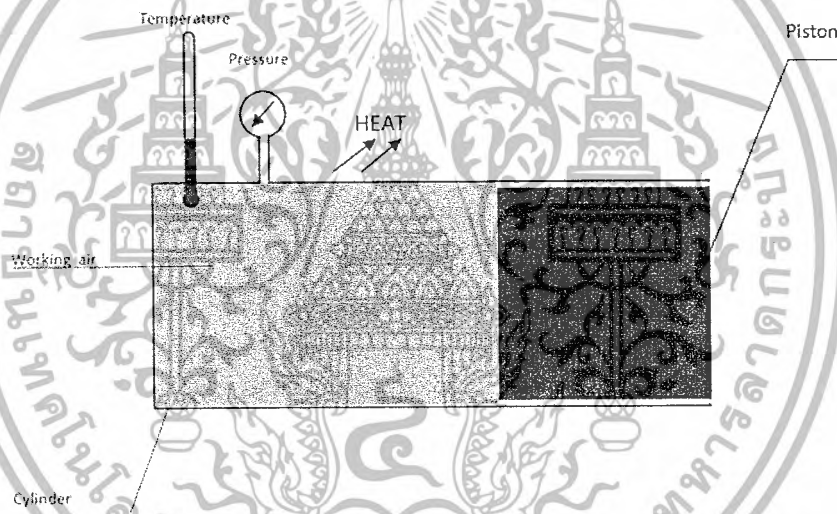


รูปที่ 2.5 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันในขณะที่ลูกสูบหยุดการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

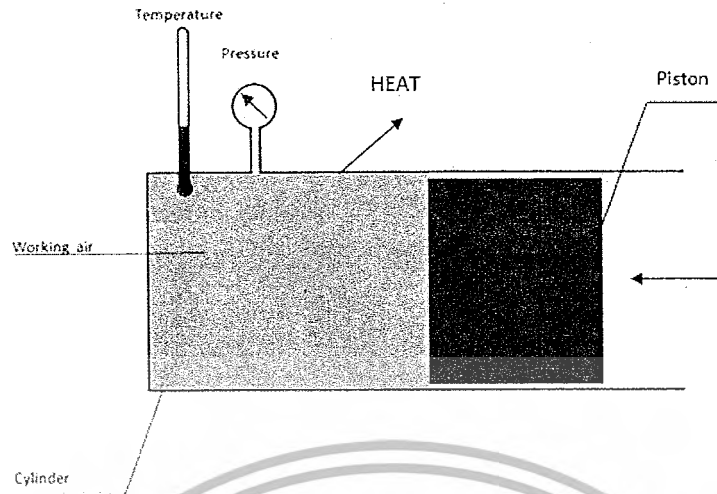
ความดันของอากาศภายในกระบอกสูบจะสูงกว่าความดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ จึงมีผลทำให้ลูกสูบสามารถเคลื่อนที่ได้เนื่องจากแรงดันของอากาศภายในกระบอกสูบมากกว่าแรงดันภายนอก ในขั้นตอนนี้จะยังคงให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องในระหว่างการขยายตัว เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของอากาศภายในกระบอกสูบให้สูงไว้ ส่วนความดันของอากาศในกระบอกสูบจะค่อยๆ ลดลงไปเรื่อยๆ ในขณะที่ปริมาตรของอากาศภายในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ

อากาศที่อยู่ภายในกระบอกสูบจะขยายตัว ไปดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งความดันของอากาศภายในกระบอกสูบลดลง จนมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบอีกครั้ง ลูกสูบก็จะหยุดการเคลื่อนที่ ในขั้นตอนนี้จะยังให้ความร้อนแก่อากาศภายในกระบอกสูบอยู่ เพื่อรักษาระดับของอุณหภูมิไว้



รูปที่ 2.6 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันขณะระบายความร้อน

ความร้อนจะถูกถ่ายเทออกจากกระบอกสูบ กระบอกสูบจะเย็นตัวลงอีกครั้ง โดยทำให้ อุณหภูมิของกระบอกสูรมีอุณหภูมิต่ำกว่าตอนเริ่มต้น ดังนั้นอุณหภูมิของอากาศภายในกระบอกสูบจะต่ำกว่าอุณหภูมิกายนอกระบอกสูบและความดันของอากาศภายในกระบอกสูบจะลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ เนื่องจากการขยายตัวของอากาศภายในกระบอกสูบ



รูปที่ 2.7 ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันขณะระบายความร้อนและลูกสูบกำลังเคลื่อนที่เข้า

ลูกสูบจะถูกดันกลับด้วยแรงดันจากความดันบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ ในขณะที่เดียวกันก็ต้องทำให้อุณหภูมิจากอากาศภายในกระบอกสูบเย็นตัวลงอย่างต่อเนื่อง เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของอากาศภายในกระบอกสูบไว้ให้คงที่ ส่วนความดันของอากาศภายในกระบอกสูบจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ เนื่องจากการอัดตัวของลูกสูบ การอัดจะหยุดตัวลงก็ต่อเมื่อความดันของอากาศภายในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นจนเท่ากับความดันของบรรยากาศภายนอกกระบอกสูบ ลูกสูบก็จะหยุดการเคลื่อนที่

#### 2.4 เครื่องยนต์แบบผลต่างอุณหภูมิต่ำ (Low temperature differential engine)

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิต่ำ (ใช้คำย่อ LTD แทน ผลต่างอุณหภูมิต่ำ) สามารถทำงานได้เมื่อมีอุณหภูมิต่างกันระหว่างส่วนร้อนและเย็นของดิสเพลสเซอร์ต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากรูปแบบอื่นๆ ตรงที่ต้องมีอุณหภูมิต่างกันระหว่างสองส่วนที่ต่างกันมาก แต่ก็ให้กำลังงานที่มากเช่นกัน

เครื่องยนต์แบบ LTD สามารถออกแบบได้สองรูปแบบ แบบแรกจะมีเพียงลูกสูบกำลังที่ต่อกับเพลลาข้อเหวี่ยง เรียกว่า “เครื่องยนต์ริงบอม (Ringbom engine)” เป็นเครื่องยนต์ที่พบเห็นได้มากมีลักษณะเด่นคือ ดิสเพลสเซอร์มีขนาดใหญ่และบาง และมีก้านสูบอยู่ในร่องที่มีขนาดพอดีกับก้านสูบ เป็นการแทนที่การต่อก้านสูบไปยังเพลลาข้อเหวี่ยง ลักษณะนี้โดยทั่วไปเรียกว่า “free piston engine” ส่วนแบบที่สองทั้งลูกสูบกำลังและดิสเพลสเซอร์จะต่อกันที่เพลลาข้อเหวี่ยงเดียวกัน โดยปกติรูปแบบแกมมา จะมีมุมระหว่างลูกสูบทั้งสองต่างกันประมาณ 90 องศา

ลักษณะบางประการของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบ LTD

- 1.) อัตราส่วนระหว่างปริมาตรกวาด (swept volume ratio) ของดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังมีค่ามาก
- 2.) ดิสเพลสเซอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่
- 3.) ดิสเพลสเซอร์มีลักษณะบาง
- 4.) ผิวกระบอกสูบของดิสเพลสเซอร์มีการถ่ายเทความร้อนสูง
- 5.) ระยะเวลา (stroke) ของดิสเพลสเซอร์สั้น
- 6.) เวลาขณะดิสเพลสเซอร์หมดระยะชักใช้เวลานานกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทั่วไป
- 7.) มีรอบการทำงานต่ำ

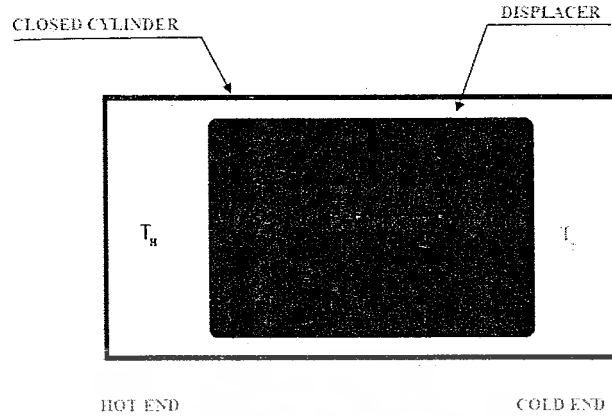


รูปที่ 2.8 ลักษณะเครื่องยนต์แบบผลต่างอุณหภูมิต่ำ

## 2.5 ดิสเพลสเซอร์

พิจารณากระบอกสูบซึ่งปิดปลายทั้งสองด้านสนิท ส่วนภายในกระบอกสูบจะมีอากาศกับแท่งกระบอกยาวประมาณครึ่งหนึ่งของกระบอกสูบดังรูป 2.9 ผิวของทรงกระบอกไม่แนบสนิทกับผิวของกระบอกสูบ โดยจะมีช่องว่างระหว่างผิวไว้เพื่อให้อากาศสามารถไหลผ่านไปด้านใดด้านหนึ่งของกระบอกสูบได้ และเราเรียกทรงกระบอกนี้ว่า ดิสเพลสเซอร์

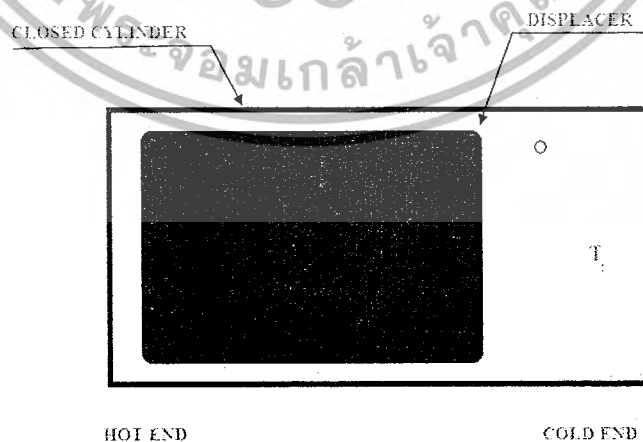
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งเริ่มต้นการทำงานของดิสเพลสเซอร์

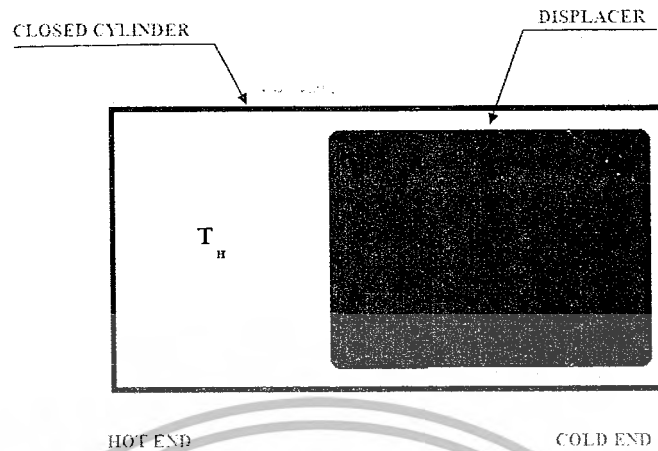
สมมติให้ด้านหนึ่งของกระบอกสูบร้อนและอีกด้านหนึ่งของกระบอกสูบเย็น เมื่อดิสเพลสเซอร์ไปอยู่ทางด้านร้อน ดังรูป 2.10 อากาศที่ไหลมาอยู่ทางด้านเย็น ดังนั้นอากาศจะมีอุณหภูมิและความดันต่ำและเมื่อดิสเพลสเซอร์ไปอยู่ทางด้านเย็น อากาศก็จะไหลไปอยู่ด้านร้อนดังรูป 2.11 ดังนั้นอากาศจะมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น ดังนั้นการเคลื่อนที่ของดิสเพลสเซอร์จะทำให้อากาศสามารถสลับจากอุณหภูมิและความดันสูงมาเป็นอากาศที่มีอุณหภูมิและความดันต่ำ และสลับจากอุณหภูมิและความดันต่ำมาเป็นอากาศที่มีอุณหภูมิและความดันสูงได้

คุณสมบัติที่ดีของดิสเพลสเซอร์ ก็คือ สามารถที่จะทำให้เรารักษาอุณหภูมิของกระบอกสูบให้ด้านหนึ่งร้อนและอีกด้านหนึ่งเย็น ได้ตลอดเวลา แต่อากาศในกระบอกสูบจะสามารถเปลี่ยนอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว โดยการที่อากาศไหลผ่านผิวของดิสเพลสเซอร์นั่นเอง



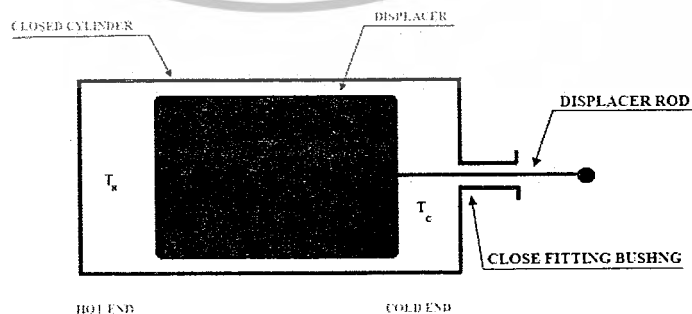
รูปที่ 2.10 ตำแหน่งดิสเพลสเซอร์อยู่ทางด้านร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งคิสเพลสเซอร์อยู่ทางด้านเย็น

ตามปกติคิสเพลสเซอร์จะเคลื่อนที่ โดยก้านของคิสเพลสเซอร์ซึ่งปลายด้านหนึ่งติดต่อกับตัวของ คิสเพลสเซอร์ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะเจาะทะลุออกทางด้านเย็นของกระบอกสูบ จะต้องทำการอุดอย่างดี เพื่อมิให้อากาศภายในและความดันภายในรั่วไหลออกไป แต่ในขณะเดียวกันตรงบริเวณผิวสัมผัสของก้านคิสเพลสเซอร์กับผิวของกระบอกสูบจะต้องทำให้มีแรงเสียดทานต่ำที่สุด เพื่อให้มีการเคลื่อนที่ได้สะดวก อากาศและ คิสเพลสเซอร์ อยู่ในกระบอกสูบที่มีปลายปิดสนิททั้งสองข้าง โดยอากาศไม่มีการรั่วไหลออกไปภายนอกกระบอกสูบ และทำให้ความร้อนแก่กระบอกสูบด้านหนึ่งส่วนอีกด้านหนึ่งจะทำให้เย็น เมื่อให้คิสเพลสเซอร์เคลื่อนที่มาจากด้านร้อนของกระบอกสูบ อากาศที่อยู่ภายในกระบอกสูบส่วนมากจะมาอยู่ทางด้านเย็นของกระบอกสูบ ดังนั้นอากาศภายในกระบอกสูบจะมีอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ



รูปที่ 2.12 การต่อก้านคิสเพลสเซอร์เข้ากับคิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้คิสเพลสเซอร์เคลื่อนที่มาอยู่ทางด้านเย็นของกระบอกสูบ อากาศที่อยู่ภายใน กระบอกสูบส่วนมากจะมาอยู่ทางด้านร้อนของกระบอกสูบ ดังนั้นอากาศภายในกระบอกสูบจะมีอุณหภูมิสูงและมีความดันสูง

การเคลื่อนที่ไปกลับของคิสเพลสเซอร์ จะเคลื่อนที่โดยก้านของคิสเพลสเซอร์จะผ่านออกไปทางด้านเย็นของกระบอกสูบ และมีการอุคเป็นอย่างดีโดยไม่มีการรั่วของอากาศและความดันภายในกระบอกสูบ

## 2.6 รีเจนเนอเรเตอร์

ในการให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์สเตอร์ลิง จะมีความร้อนภายในกระบอกสูบสูญเสียไป ความสูญเสียที่สำคัญเกิดขึ้นจาก วัฏจักรการรับความร้อนและการระบายความร้อนของอากาศในเครื่องยนต์ วัฏจักรการรับความร้อน และระบายความร้อน เป็นสิ่งจำเป็นต่อขบวนการอัดตัวและขบวนการขยายตัวของอากาศในวัฏจักร จึงจะทำให้ได้งานสูงสุดออกจากเครื่องยนต์ และวิธีการให้ความร้อนและการระบายความร้อนยังมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ด้วย

ในเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ที่ประกอบด้วย คิสเพลสเซอร์ แบบเรียบการรับความร้อนและการระบายความร้อนที่ทำให้เกิดงานนั้น ความร้อนจะไม่สามารถเปลี่ยนเป็นงาน ได้ทั้งหมด ดังนั้นวิธีแก้ไขก็คือ การให้ความร้อนแก่อากาศภายในกระบอกสูบบางส่วนก่อนที่จะถึงขบวนการขยายตัว หลังจากขบวนการขยายตัว อากาศซึ่งร้อนจะไหลไปทางด้านระบายความร้อนและความร้อนบางส่วนจะต้องถูกระบายทิ้งก่อนถึงขบวนการอัดตัว ในการที่จะทำเช่นนี้ได้จะต้องมีวัสดุที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีติดอยู่กับผิวของคิสเพลสเซอร์ หรือใช้วัสดุนั้นทำเป็น คิสเพลสเซอร์ก็ได้ การที่อากาศร้อนขึ้นก่อนขบวนการขยายตัว หรือเย็นลงก่อนขบวนการอัดตัวนี้เราเรียกว่า รีเจนเนอเรเตอร์

ในเครื่องยนต์ของ โรเบิร์ต สเตอร์ลิง เครื่องหนึ่งได้ทำการติด Fine Wire เข้าที่ผิวด้านนอกของคิสเพลสเซอร์ ซึ่งตัว Fine Wire จะช่วยทำให้อากาศภายในกระบอกสูบเมื่อไหลผ่านตัวมันจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือลดลงก็ได้แล้วแต่ขบวนการ ซึ่งตัว Fine Wire ตัวนี้จะทำหน้าที่เป็น รีเจนเนอเรเตอร์

พิจารณาเครื่องจักรที่กำลังทำงาน ซึ่งปลายด้านหนึ่งถูกทำให้ร้อน และส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะถูกทำให้เย็น ภายในมีคิสเพลสเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็น รีเจนเนอเรเตอร์

หลังขบวนการขยายตัว อากาศที่อยู่ภายในห้องของคิสเพลสเซอร์จะร้อน ส่วนตัวคิสเพลสเซอร์จะเคลื่อนที่มาจากด้านร้อน (ก่อนหน้านี้นี้คิสเพลสเซอร์อยู่ทางด้านเย็น) ดังนั้นอากาศร้อนจะเคลื่อนผ่านผิวของคิสเพลสเซอร์ ซึ่งเป็นตัวรีเจนเนอเรเตอร์ไปทางด้านเย็น เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านคิสเพลสเซอร์ซึ่งเย็นอากาศก็จะสามารถเย็นลงบางส่วนก่อนที่จะถึงขบวนการอัดตัว

ระหว่างการอัดตัว ความร้อนจะถูกถ่ายเทออกทางด้านระบายความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ต่อจากนั้นในจังหวะการถ่ายเทความร้อน คิสเพลสเซอร์จะเคลื่อนที่ไปทางด้านเย็น ซึ่งผิวของคิสเพลสเซอร์นี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซอร์ จะร้อนอยู่ เพราะก่อนหน้านี้ คิวเพลสเซอร์จะอยู่ทางด้านร้อนในจังหวะอัดตัว ส่วนอากาศซึ่งเย็น ก็จะไปไหลผ่านผิวของคิวเพลสเซอร์ซึ่งร้อน ดังนั้นอากาศจะร้อนขึ้นบางส่วนก่อนที่จะถึงขบวนการขยายตัว

## 2.7 สารทำงาน

สารทำงาน(Working fluid) ในข้อสมมติฐานของ Schmidt [1] ให้สารที่ใช้ถือเป็นสารในอุดมคติแต่ในทางปฏิบัติจริงนั้น สารที่นิยมใช้กันมากคือ อากาศ ฮีเลียม และไฮโดรเจน

สารทำงานควรมีความจุความร้อนต่ำ เพื่อทำให้ความร้อนถ่ายเท นำไปสู่การทำให้ความดันเพิ่มขึ้น จากปัญหานี้ ฮีเลียมจะเป็นก๊าซที่ดี เนื่องจากความจุความร้อนต่ำมาก และเป็นก๊าซเฉื่อยซึ่งไม่ติดไฟ แต่มีราคาแพง ส่วนอากาศเป็นสารทำงานที่ทำงานได้ ในระดับปานกลาง ส่วนออกซิเจน ถ้าทำงานในความดันสูง อาจทำให้เกิดการระเบิดได้ ด้วยเหตุนี้ บริษัทฟิลลิปส์จึงมีการบุกเบิกใช้สารชนิดอื่นๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการระเบิด

ไฮโดรเจนมีความหนืดต่ำ และมีการนำความร้อนสูง จึงมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี เพราะเครื่องยนต์สามารถทำงานได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารอื่นๆ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้อัตราการแพร่กระจายแก๊สโมเลกุลน้ำหนักเบามากขึ้น โดยรวมแล้วทั้งฮีเลียมและไฮโดรเจนนั้นเป็นสารทำงานที่ให้กำลังต่อหน่วยปริมาตรที่ดี

## 2.8 การวิเคราะห์จากทฤษฎีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง [1]

ในการวิเคราะห์จากทฤษฎีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้น เราจำเป็นต้องกำหนดข้อจำกัดต่างๆ ดังนี้

ก) อ้างอิง อุณหภูมิ ความดันและปริมาตร จากสถานะที่ 1

ข) อัตราส่วนอุณหภูมิ  $r = \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$

ค) อัตราส่วนปริมาตร  $r' = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$

สำหรับสารทำงานต่อหนึ่งหน่วยมวล สมมติให้สารทำงานเป็นแก๊สอุดมคติ ดังนั้นจะมีสมการตามกฎของแก๊ส คือ  $V_1 = \frac{RT_1}{P_1}$

### กระบวนการ 1-2: การอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่

กระบวนการนี้ความร้อนจากสารทำงานจะถูกปล่อยออกจากวัฏจักรในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุด งานของสารทำงานที่ได้จะเท่ากับขนาดของความร้อนที่ถูกปล่อยออกจากวัฏจักร โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในและเอนโทรปี

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = P_1 r \quad , \quad T_2 = T_1 = T_{\min}$$

$$\text{การถ่ายเทความร้อน } (Q) = \text{Work done } (W) = P_1 V_1 \ln\left(\frac{1}{r}\right) = RT_1 \ln\left(\frac{1}{r}\right)$$

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

### กระบวนการ 2-3: เป็นขบวนการถ่ายเทความร้อนให้สารทำงานโดยปริมาตรคงที่

กระบวนการนี้ความร้อนถูกส่งจากรีเจนเนอเรเตอร์มายังสารทำงาน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก  $T_{\min}$  เป็น  $T_{\max}$  ไม่เกิดงานในช่วงนี้ เอนโทรปีและพลังงานภายในของสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้น

$$P_3 = \frac{P_2 T_3}{T_2} = \frac{P_2}{\tau} \quad , \quad V_3 = V_2$$

$$\text{การถ่ายเทความร้อน } (Q) = C_v (T_3 - T_2)$$

$$\text{งานที่ได้ } (W) = 0$$

$$\text{การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี } (S_3 - S_2) = C_v \ln\left(\frac{1}{\tau}\right)$$

### กระบวนการ 3-4: การขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่

กระบวนการนี้เป็นการให้ความร้อนแก่วัฏจักรจนกระทั่ง  $T_{\max}$  ในระหว่างการขยายตัวของสารทำงาน งานที่ได้เท่ากับขนาดของความร้อนที่ให้แก่วัฏจักร สารทำงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน แต่เอนโทรปีมีค่าเพิ่มขึ้น

$$P_4 = \frac{P_3 V_3}{V_4} = P_3 \left(\frac{1}{r}\right) \quad , \quad T_4 = T_3 = T_{\max}$$

$$\text{การถ่ายเทความร้อน } (Q) = \text{Work done } (W) = P_3 V_3 \ln r = RT_3 \ln r$$

$$\text{การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี } (S_4 - S_3) = R \ln r$$

### กระบวนการ 4-1: เป็นขบวนการถ่ายเทความร้อนออกจากสารทำงานโดยปริมาตรคงที่

กระบวนการนี้ความร้อนจะถ่ายเทจากสารทำงานสู่รีเจนเนอเรเตอร์ อุณหภูมิของสารทำงานลดลงจาก  $T_{\max}$  เป็น  $T_{\min}$  ไม่เกิดงาน สารทำงานมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานภายในและเอนโทรปี

$$P_1 = \frac{P_4 T_4}{T_1} = P_1 \tau \quad , \quad V_1 = V_4$$

$$\text{การถ่ายเทความร้อน } (Q) = C_v (T_1 - T_4)$$

$$\text{งานที่ได้ } (W) = 0$$

$$\text{การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี } (S_1 - S_4) = C_v \ln \tau$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่รีเจนเนอเรเตอร์ ความร้อนที่ถ่ายเทสู่สารทำงานในกระบวนการ 2-3 ได้มาจากกระบวนการ 4-1 โดยสารทำงานและรีเจนเนอเรเตอร์ถือว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานความร้อน

ความร้อนที่ให้ทั้งหมด (ที่  $T_{\max}$ ) =  $RT_3 \ln r$

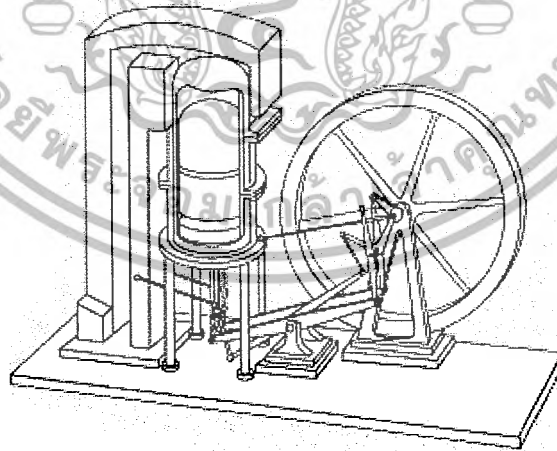
ความร้อนที่ปล่อยออกทั้งหมด (ที่  $T_{\min}$ ) =  $RT_1 \ln \left( \frac{1}{r} \right)$

ประสิทธิภาพทางความร้อน = (ความร้อนที่ให้ทั้งหมด - ความร้อนที่ปล่อยออกทั้งหมด) / ความร้อนที่ให้ทั้งหมด

$$\begin{aligned} &= \text{งานที่ได้} / \text{ความร้อนที่ให้ทั้งหมด} \\ &= \left( \frac{RT_3 \ln r - RT_1 \ln r}{RT_3 \ln r} \right) \\ &= 1 - \tau \end{aligned}$$

## 2.9 พัฒนาการของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

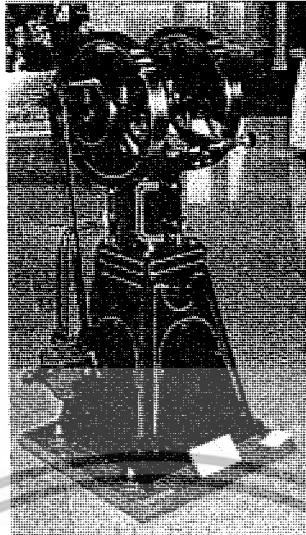
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดย โรเบิร์ต สเตอร์ลิง ในปี ค.ศ. 1816 ซึ่งในขณะนั้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้รับการยอมรับว่ามีความปลอดภัยไม่เกิดการระเบิด เหมือนเครื่องยนต์ไอน้ำ



รูปที่ 2.13 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ประดิษฐ์โดย โรเบิร์ต สเตอร์ลิง

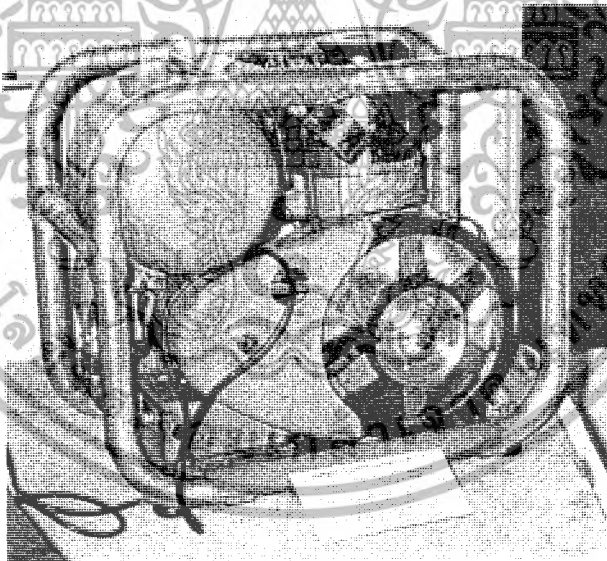
นับตั้งแต่นั้นมา เครื่องยนต์หลายๆแบบถูกผลิตขึ้น โดยมีการเพิ่มประสิทธิภาพและกำลังที่ได้ แต่เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ออตโต และ เครื่องยนต์ดีเซลแล้ว ความจุของเครื่องยนต์ต่อกำลังที่ได้ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นมีค่าน้อยกว่าเยอะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในการประชุมนานาชาติ ครั้งที่ 6

ในปี ค.ศ. 1940 บริษัทฟิลลิปส์ได้เริ่มทำการวิจัยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบพกพา ซึ่งคาดหวังกำลังที่ได้ 200 วัตต์ และได้ทำสำเร็จในปี ค.ศ. 1950 แต่เครื่องยนต์ไม่เป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากทราจิสเตอร์ที่สามารถทำงานได้ที่พลังงานต่ำถูกผลิตขึ้น



รูปที่ 2.15 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงของบริษัทฟิลลิปส์ในยุคแรก

ต่อมาในปี ค.ศ. 1973 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในยุโรปและอเมริกา ส่วนในญี่ปุ่นเริ่มการวิจัยหลังจากยุโรปและอเมริกาประมาณ 20 ปี

ปัจจุบันมีผู้หันมาสนใจและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกันมากขึ้นเพราะเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้พลังงานทางเลือก และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลายแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 Bancha Kongtragool , Somchai Wongwises [3] ได้รวบรวมการศึกษาคาร์วิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในส่วนของปริมาตรนิ่ง ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนร้อน ส่วนเย็น และรีเจนเนอเรเตอร์ ผลจากการศึกษาพบว่า งานที่ได้ทั้งหมดซึ่งเป็นผลมาจากปริมาตรนิ่งนั้น จะมีความสัมพันธ์กับการป้อนความร้อนให้กับเครื่องยนต์และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ โดย งานที่ได้จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาตรนิ่ง ถ้าเพิ่มความร้อนที่ป้อนจะทำให้เป็นการเพิ่มปริมาตรนิ่งและลดการรีเจนเนอเรเตอร์ และประสิทธิภาพเครื่องยนต์จะลดลงถ้าเพิ่มปริมาตรนิ่งและลดการรีเจนเนอเรเตอร์

2.10.2 D.G. Thombave , S.K. Verma [4] ได้ทำการพัฒนาวัฏจักรสเตอร์ลิงเพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานจริง ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์นั้นขึ้นกับกลไกของเครื่องยนต์และการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน เป็นสิ่งที่ยากในการที่จะออกแบบเพื่อให้ความร้อน ของไหล และกลไกทำงานสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสม จากการศึกษาพบว่าวัฏจักรสเตอร์ลิงนั้นสัมพันธ์กับการทำงานในช่วงอุณหภูมิต่ำ และเมื่อใช้ฮีตเตอร์เป็นสารทำงาน

2.10.3 สุรัชย์ จิระชาคริต, บัณฑิต บันเทิง สิบป์สกุลสุข , นัฐพล ปานพรมจันทร์ [5] ได้ทำการออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแอลฟา ซึ่งมีปริมาตรกวาด 5.03 มิลลิลิตร โดยวัดค่าความเร็วและแรงบิดซึ่งแปรผันอุณหภูมิในช่วง 540-560 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ ผลจากการทดลองนี้ได้กำลังงานสูงสุด 83 มิลลิวัตต์ ที่ความเร็วรอบ 300 RPM อุณหภูมิ 560 องศาเซลเซียส ข้อเสนอแนะคือ ควรใช้ทองเหลืองเป็นส่วนหัวรับความร้อน การใช้ลูมิเนียมเป็นปลอกกระบอกสูบจะช่วยการระบายความร้อนและต้องให้ความสำคัญถึงความเบา และแข็งแรง

2.10.4 Bancha Kongtragool , Somchai Wongwises [6] ได้ทำการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 4 กระบอกสูบกำลัง แบบผลต่างอุณหภูมิต่ำโดยใช้แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน มีปริมาตรกวาดของลูกสูบกำลังเป็น 7391 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากการศึกษาพบว่า พลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์สูงสุดมีค่า 1378 วัตต์ ส่วนร้อนมีอุณหภูมิ 439 K มีแรงบิดสูงสุด 2.91 Nm. และกำลังสูงสุดที่เพลามีค่า 6.1 วัตต์

2.10.5 ไพบุลย์ ศรีภคการ [7] ได้ทำการออกแบบเชิงวิเคราะห์สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความต่างของอุณหภูมิต่ำ จากการศึกษาพบว่า การเปรียบเทียบระหว่างวัฏจักรสเตอร์ลิงกับวัฏจักรกึ่งสเตอร์ลิง แสดงให้เห็นว่าวัฏจักรกึ่งสเตอร์ลิงซึ่งใช้แบบจำลองการอัดตัวของแก๊สแบบ adiabatic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนพฤติกรรมของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ดีกว่า ผลยังแสดงให้เห็นว่าในการทำงานที่ความต่างของอุณหภูมิค่า เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจำเป็นที่จะต้องมีการอัดตัวที่ต่ำ นอกจากนั้นค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สที่ใช้ควรมีค่าต่ำ ซึ่งจะให้ช่วงของค่าอัตราส่วนการอัดตัวที่งานขาออกเป็นบวกกว้างขึ้น และมีค่างานขาออกแบบไร้มิติมากขึ้น ด้วยการวิเคราะห์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงในห้าปริมาตรด้วยแบบจำลองแบบ adiabatic ก็ยังคงแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของอัตราส่วนการอัดตัวสูงสุดด้วยแนวโน้มเดียวกัน ค่าอัตราส่วนการอัดตัวได้ถูกแสดงว่าเป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบที่สำคัญ

2.10.6 พงศ์สินธุ์ ธนวัฒน์เสรี , ดุลย โชติ ชลศึกษ์ [8] ได้ทำการศึกษาการคำนวณกำลังบ่งชี้จากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดี่ยว โดยเสนอการใช้โปรแกรมคำนวณเพื่อหาลำดับบ่งชี้ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดี่ยวโดยใช้ข้อมูลจำเพาะและผลการทดสอบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง GPU-3 ซึ่งใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงาน ที่ความดัน 5.12 เมกะปาสคาล อุณหภูมิความร้อน 649 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 15 องศาเซลเซียส วิธีการคำนวณที่ใช้เป็นการปรับปรุงการคำนวณจากโปรแกรมของ Ureili โดยได้ร่วมการพิจารณาถึงอุณหภูมิของคูเลเตอร์ที่เพิ่มขึ้นและการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในรีเจนเนอเรเตอร์จากข้อมูลจากผลการทดสอบและนำผลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้นี้มาตรวจสอบโดยใช้ประกอบการคำนวณหาลำดับบ่งชี้ของเครื่องยนต์ Allison PD-46 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์รูปแบบเดียวกัน พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อกำลังของเครื่องยนต์ นอกจากอุณหภูมิความร้อน ความดัน และความเร็วรอบ แล้วได้ข้อสรุปคือ

- 1.ผลของอุณหภูมิด้านเย็นที่มีผลสำคัญในการคำนวณกำลังเบื้องต้นของเครื่องยนต์ ซึ่งในการคำนวณเพื่อออกแบบเครื่องยนต์จึงต้องคำนึงถึงการออกแบบระบบหล่อเย็นที่เหมาะสม
- 2.ผลของการคำนวณความดันลดในรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งเป็นผลจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีผลอย่างมากกับความถูกต้องในการคำนวณหาลำดับบ่งชี้ของเครื่องยนต์ การออกแบบ เลือกใช้รีเจนเนอเรเตอร์ที่เหมาะสมจึงมีผลกับกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์
- 3.ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่ปรับปรุงของเครื่องยนต์นี้มีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปปรับใช้กับการคำนวณประเมินกำลังเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีลักษณะเดียวกันนี้ในขั้นตอนการออกแบบได้

2.10.7 ไพบุลย์ ศรีรักษากรม, จิตรกร ศรีสายชล [9] ได้พยายามวิจัยในการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาจากชิ้นส่วนมาตรฐานของเครื่องอัดอากาศ โดยในการออกแบบใช้สมการเชิงทดลองพร้อมด้วยการวิเคราะห์แบบ Schmidt และแบบ Adiabatic เพื่อการประเมินสมรรถนะการทำงานเบื้องต้น พร้อมด้วยการพิจารณาถึงปัญหาหลักในการปรับใช้เครื่องอัดอากาศ ได้แก่การออกแบบและสร้างฮีตเตอร์ คูเลเตอร์และรีเจนเนอเรเตอร์ การซีลระบบเพื่อการทำงานที่ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ และการปรับแก้ถูกสูบด้านร้อนเพื่อทนต่อความร้อนของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ถูกดัดแปลงขึ้นจากเครื่องอัดอากาศได้ถูกทำการทดสอบเบื้องต้นที่ความดันบรรยากาศ โดยพบว่า เครื่องยนต์ยังไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง อย่างไรก็ตาม การทดสอบก็ได้พบว่าการทำนายแบบ Schmidt และแบบ Adiabatic ให้แนวโน้มที่ดีในการประเมินค่ากำลังป้อนของเครื่องยนต์

2.10.8 อัครรัตน์ พูลกระจ่าง , ขวัญชัย จ้อยเจริญ [10] ได้ทำการออกแบบและสร้างชุดทดลอง เครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้อากาศร้อน การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดลอง เครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้อากาศเป็นสารทำงาน สำหรับใช้เป็นสื่อการเรียนการสอน โดยเครื่องยนต์ สเตอร์ลิงที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นแบบชนิดแอลฟา มีปริมาตรกวาดของลูกสูบการขยายเท่ากับ 2256 ลูกบาศก์ มิลลิเมตร ปริมาตรกวาดของลูกสูบการอัดเท่ากับ 900 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ปริมาตรรีเจนเนอเรเตอร์ เท่ากับ 264 ลูกบาศก์มิลลิเมตร มีอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 3:1 ความดันเฉลี่ยเท่ากับ 101.3 กิโลนิวตันต่อ ตารางเมตร ซึ่งทำทดลองหาความเร็วรอบ โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิสูงสุด จากการทดลองพบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเริ่มทำงานเองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยมีความเร็วรอบเริ่มต้นเท่ากับ 860 รอบต่อนาที และที่อุณหภูมิสูงสุด 250 องศาเซลเซียส เครื่องยนต์จะมีความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 270 รอบต่อนาที อุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับ 38 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำสุดร้อยละ 15.82 และสูงสุดร้อยละ 39.20 และพบว่าความแตกต่างของ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบและประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น ซึ่งค่าความสัมพันธ์ ระหว่างความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรผันตามความแตกต่างของ อุณหภูมิ

2.8.9 สมพร ตันตวิงศ์ไพศาล [11] ได้ศึกษาการทำงานและพัฒนาต้นแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง แบบลูกสูบเหลวอย่างง่าย เครื่องยนต์ดังกล่าวต่อเข้ากับปั้มน้ำซึ่งทั้งหมดทำด้วยแก้ว เพื่อจะได้เห็นการทำงานของทั้งเครื่องยนต์และปั้มน้ำ เครื่องยนต์ทำงานโดยแหล่งกำเนิดพลังงานเป็นขดลวดความร้อน ขนาด 100 วัตต์ ให้ความร้อนแก่อากาศเหนือผิวน้ำในหลอดแก้วด้วยด้านบนหนึ่ง (heater) อีกด้านหนึ่งของ ตัวยูเป็นส่วนระบายความร้อน (cooler) เมื่ออากาศภายในหลอดแก้วตัวยูได้รับความร้อนจะเกิดการ ขยายตัวดันให้น้ำเคลื่อนที่ลงทำการปั้มน้ำออกจากระบบปั้มน้ำ ในขณะที่ด้านระบายความร้อนซึ่งมี อุณหภูมิต่ำกว่าทำให้อากาศมีปริมาตรลดลงดึงให้ระดับน้ำในหลอดแก้วตัวยูด้านระบายความร้อน เคลื่อนที่ขึ้น เมื่อระดับของน้ำด้านระบายความร้อนถูกคูดยขึ้นทำให้ระดับน้ำด้านให้ความร้อนต่ำลง และด้วยน้ำหนักของน้ำด้านระบายความร้อนที่มากกว่าระดับน้ำด้านให้ความร้อน ทำให้เกิดการไหล กลับของน้ำไปที่ด้านให้ความร้อนและเกิดการคูดน้ำจากปั้มน้ำเข้าสู่เครื่องยนต์ เพื่อรักษาปริมาณน้ำใน ระบบเครื่องยนต์ให้คงที่ ระดับน้ำในหลอดแก้วด้านให้ความร้อนจึงถูกยกสูงขึ้นกว่าระดับน้ำด้าน ระบายความร้อน และเมื่ออากาศได้รับความร้อนจากขดลวดความร้อนก็เกิดการขยายตัวดันน้ำจากด้าน

ให้ความร้อนให้เคลื่อนที่ไปทางด้านระบายความร้อนพร้อมทั้งปั้มน้ำออกจากระบบปั้มน้ำ และจะทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวัฏจักรแบบนี้ไปเรื่อย ๆ ทรายบดที่ยังให้พลังงานแก่ระบบเครื่องยนต์ จากการทดสอบพบว่าสามารถปั้มน้ำได้เป็นอย่างดีและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยมีความสามารถในการดูดน้ำและส่งน้ำได้สูงสุดประมาณ 50 เซนติเมตร ให้อัตราการไหลของน้ำสูงสุดประมาณ 300 มิลลิลิตรต่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

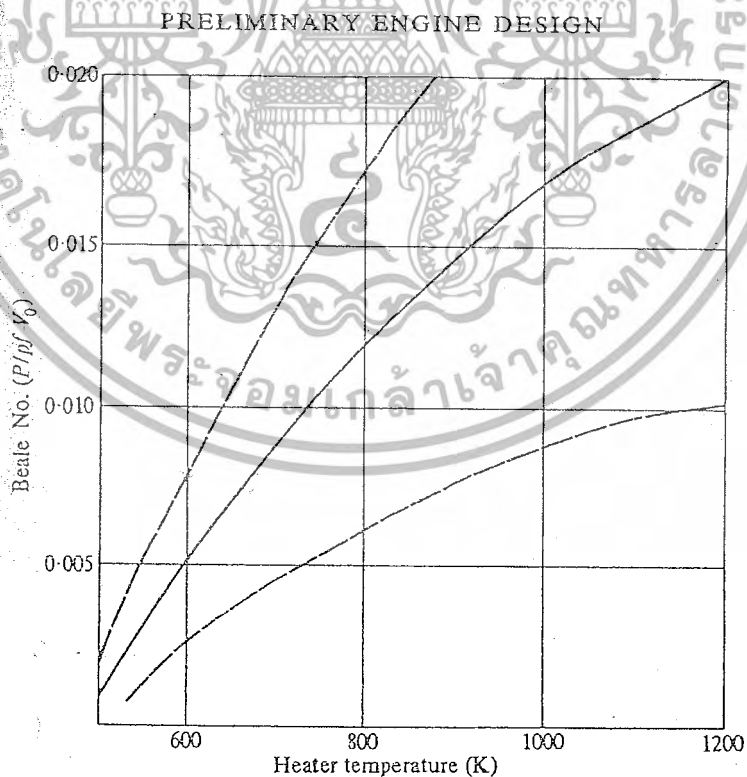
การออกแบบและการคำนวณ

3.1 สมการการประเมินกำลังของเครื่องยนต์

การประเมินกำลังของเครื่องยนต์นั้นเราสามารถหาค่ากำลังที่ได้ของ William Beale มาใช้ในการออกแบบ ซึ่งสมการนี้ได้มาจากการทดลองโดยสามารถใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทุกขนาดและทุกรูปแบบ

$$P_{beale} = 0.015 p_{mean} f V_p$$

สามารถจัดรูปใหม่ได้  $P/(p f V_0) =$  ค่าคงที่ หรือเรียกได้ว่า “Beale Number” ซึ่งเป็นฟังก์ชันอุณหภูมิของทั้งส่วนร้อน (Heater) และส่วนเย็น (Cooler) William Beale ได้มีการนำค่า Beale Number มาเขียนกราฟกับอุณหภูมิส่วนร้อน (Heater) ดังรูป 3.1 เส้นบนแสดงถึงขอบเขตการออกแบบที่ดีประสิทธิภาพสูงและอุณหภูมิหล่อเย็นต่ำ ส่วนเส้นล่างคือขอบเขตการออกแบบที่ดีพอสมควร ประสิทธิภาพปานกลางและมีอุณหภูมิหล่อเย็นสูง



รูปที่ 3.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Beale number กับอุณหภูมิความร้อนที่ป้อนสำหรับการออกแบบเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 การออกแบบขนาดกระบอกสูบลูกสูบกำลังและระยะชัก

ขนาดกระบอกสูบ (Bore) คือความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกสูบ ส่วนระยะชัก (Stroke) คือระยะห่างระหว่างการเคลื่อนที่ของลูกสูบ จากตำแหน่งศูนย์ตายบน (Top Dead Center = TDC) ถึงตำแหน่งศูนย์ตายล่าง (Bottom Dead Center = BDC) ในการออกแบบนี้จะให้ระยะชักมีค่าเป็นครึ่งของความยาวเส้นผ่าศูนย์กลาง

$$V_p = A_p \times S_p$$

$$S_p = \frac{1}{2} D_p$$

$$V_p = \frac{\pi D_p^2}{4} \times \frac{D_p}{2}$$

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{8V_p}{\pi}}$$

### 3.1.2 การออกแบบขนาดกระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์และระยะชัก

จะคำนวณเหมือนกับกระบอกสูบลูกสูบกำลังทุกอย่างแต่ ต้องกำหนดปริมาตรของดีเซลเพลสเซอร์ว่าเป็นกี่เท่าของปริมาตรลูกสูบกำลัง (ในงานวิจัยนี้ใช้ 6 เพราะศึกษามาจากงานวิจัยที่ผ่านมา)

$$V_d = 6V_p$$

$$V_d = A_d \times S_d$$

$$S_d = \frac{1}{2} D_d$$

$$V_d = \frac{\pi D_d^2}{4} \times \frac{D_d}{2}$$

$$D_d = \sqrt[3]{\frac{8V_d}{\pi}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การออกแบบความหนาของลูกสูบกำลังและดิสเพลสเซอร์

การออกแบบลูกสูบกำลังนั้นจะกำหนดให้ลูกสูบกำลังมีความหนาเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบกำลัง

$$\text{ความหนาของลูกสูบกำลัง} = D_p$$

การออกแบบลูกสูบดิสเพลสเซอร์นั้นจะกำหนดให้ลูกสูบดิสเพลสเซอร์มีความหนาเป็น  $\frac{2}{3}$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางดิสเพลสเซอร์

$$\text{ความหนาของลูกสูบดิสเพลสเซอร์} = \frac{2}{3} D_d$$

### 3.1.4 การออกแบบล้อช่วยแรง

ล้อช่วยแรง ติดตั้งเกาะอยู่กับแกนข้างหนึ่งของเพลลาข้อเหวี่ยง (Crank shaft) ซึ่งอยู่ด้านนอกของเครื่องยนต์ เนื่องจาก ล้อช่วยแรง ทำจาก โลหะขนาดใหญ่ และหนักพอสมควร เพื่อช่วยให้การหมุน ของเพลลาข้อเหวี่ยง มีความ สมดุลมากขึ้น

$$m = \frac{4E}{R^2 \omega^2}$$



รูปที่ 3.2 ลักษณะของล้อช่วยแรงที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 การออกแบบเพลาค้อเหวี่ยง

เพลาค้อเหวี่ยง (Crankshaft) เพลาค้อเหวี่ยง ทำหน้าที่ รับแรงกระทำที่ส่งมาจาก ก้านสูบ (Rod piston) โดยเปลี่ยนจากแรงกำลังแนวขึ้น-ลง ของลูกสูบ มาเป็น แรงกำลังในแนวหมุน เพลาค้อเหวี่ยง มีแกนโผล่ออกไป เพื่อยึดติดกับ ล้อช่วยแรง (Fly wheel)

การออกแบบเพลาค้อเหวี่ยงนั้นต้องคำนึงถึงมุมระหว่างการเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลังและลูกสูบดิสเพลสเซอร์ในหนึ่งรอบ โดยต้องเคลื่อนที่ต่างกัน 90 องศา และอีกสิ่งหนึ่งก็คือระยะชัก ในส่วนข้อต่อของแกนลูกสูบก็

### 3.1.6 การออกแบบก้านสูบ

ก้านสูบ (Connecting Rod) เป็นชิ้นส่วนที่ยึดต่อระหว่างลูกสูบ กับเพลาค้อเหวี่ยง ก้านสูบจะยึดระหว่างก้านสูบกับลูกสูบ โดยการใช้สลักลูกสูบ และยึดต่อระหว่างก้านสูบกับเพลาค้อเหวี่ยงด้วยเบร้งก้านสูบ ก้านสูบทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงดันจากลูกสูบส่งต่อไปยังเพลาค้อเหวี่ยง โดยก้านสูบจะเป็นตัวส่งถ่ายการเปลี่ยนแปลงทิศทางการหมุนจากการเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งของลูกสูบเป็นการเคลื่อนที่แบบหมุนผ่านเพลาค้อเหวี่ยง และส่งต่อกำลังไปยังล้อช่วยแรงต่อไป

ความยาวของก้านสูบทั้งลูกสูบกำลังและดิสเพลสเซอร์นั้นจะต้องออกแบบให้มีขนาดไม่น้อยกว่าสองเท่าของระยะชักและเส้นผ่านศูนย์กลางจะคำนวณจาก

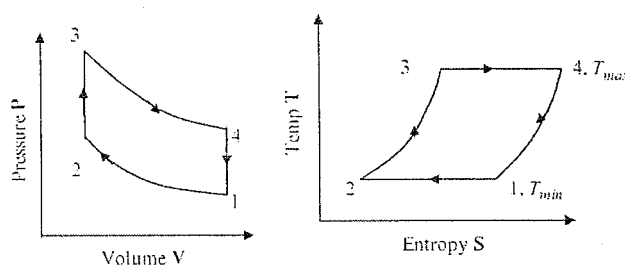
$$L_p \geq 2S_p$$

$$L_d \geq 2S_d$$

$$d = 2\sqrt{F/\pi\sigma}$$

## 3.2 การวิเคราะห์การทำงานของเครื่องยนต์

### 3.2.1 ทหาความดันสูงสุดภายในระบบ



รูปที่ 3.3 แผนภาพ P-V และ T-S ของวัฏจักรสเตอร์ลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $P_3 = P_{\max}$   
 $T_0 = 298K$  (อุณหภูมิห้อง)  
 $T_H = T_3 = T_4 = 773K$   
 $T_L = T_1 = T_2 = 338K$   
 $V_p = 7.1675 \times 10^{-4} \text{ m}^3$   
 $V_d = 41.057 \times 10^{-4} \text{ m}^3$   
 $V_{\max} = V_1 = V_p + V_d + V_r + V_x = 0.1586 \text{ m}^3$   
 $V_{\min} = V_2 = V_p + V_r + V_x = 0.1545 \text{ m}^3$

เมื่อ  $P_1 = \frac{P_0 T_L}{T_0}$

$$= \frac{1.01 \times 10^2 \times 338}{298}$$

$$= 114.35 \text{ kPa}$$

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2}$$

$$= \frac{114.35 \times 0.1586}{0.1545}$$

$$= 117.58 \text{ kPa}$$

$$P_3 = \frac{P_2 T_3}{T_2}$$

$$= \frac{117.58 \times 773}{338}$$

$$= 268.92 \text{ kPa}$$

$$P_{\max} = P_3 = 268.92 \text{ kPa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 งานสุทธิที่ได้ในหนึ่งวัฏจักร

กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่

$$\text{เมื่อ } r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{0.1586}{0.1545} = 1.0265$$

$$\text{งานที่ได้} = P_1 V_1 \ln \frac{1}{r}$$

$$= (114.35 \times 10^3)(0.1586) \ln \frac{1}{1.0265}$$

$$= -474.34 \text{ J}$$

กระบวนการอัดตัวแบบอุณหภูมิคงที่

$$\text{งานที่ได้} = P_3 V_3 \ln r$$

$$= (268.92 \times 10^3)(0.1545) \ln 1.0265$$

$$= 1086.68 \text{ J}$$

$$\text{งานสุทธิที่ได้ คือ } W_{net} = W_{1-2} + W_{3-4}$$

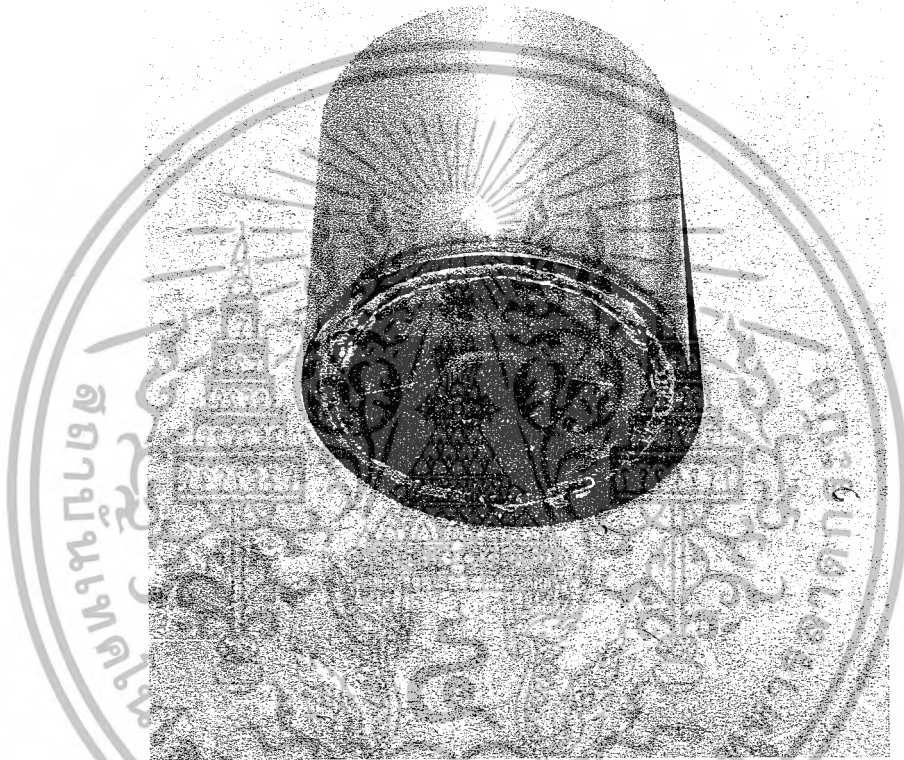
$$W_{net} = -474.34 + 1086.68 = 612.34 \text{ J}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

จากการคำนวณและออกแบบแล้ว ได้ทำการสร้างชิ้นส่วนตามแบบ ซึ่งพร้อมประกอบดังนี้

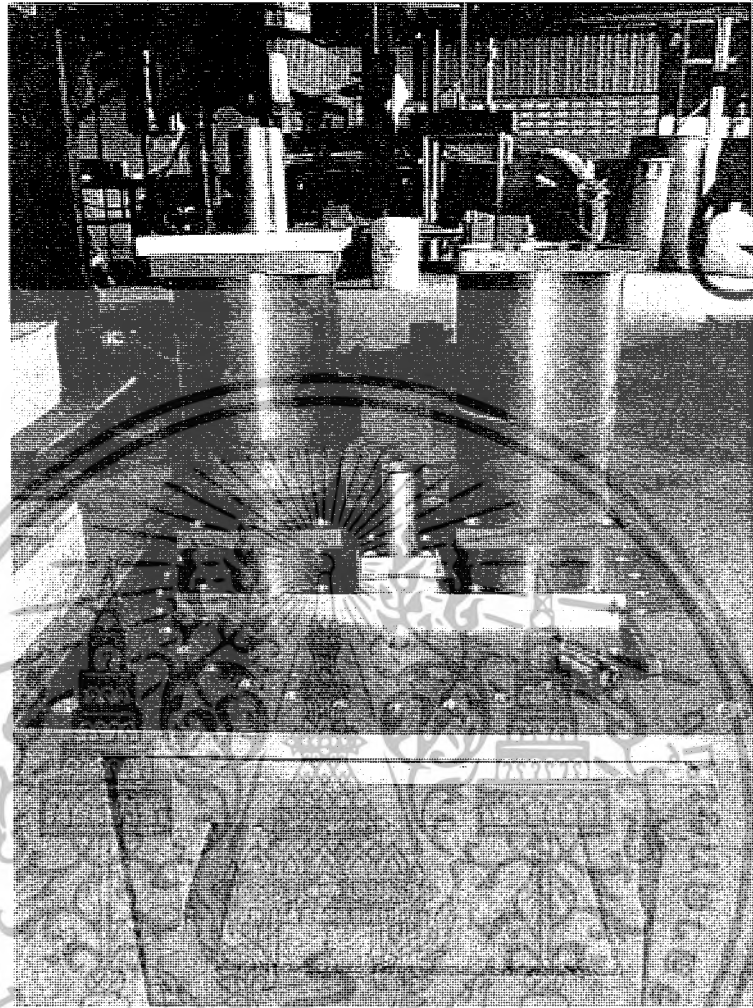
#### 3.3.1 ลูกสูบกำลัง (Power piston) ทำจากเหล็ก



รูปที่ 3.4 ลูกสูบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

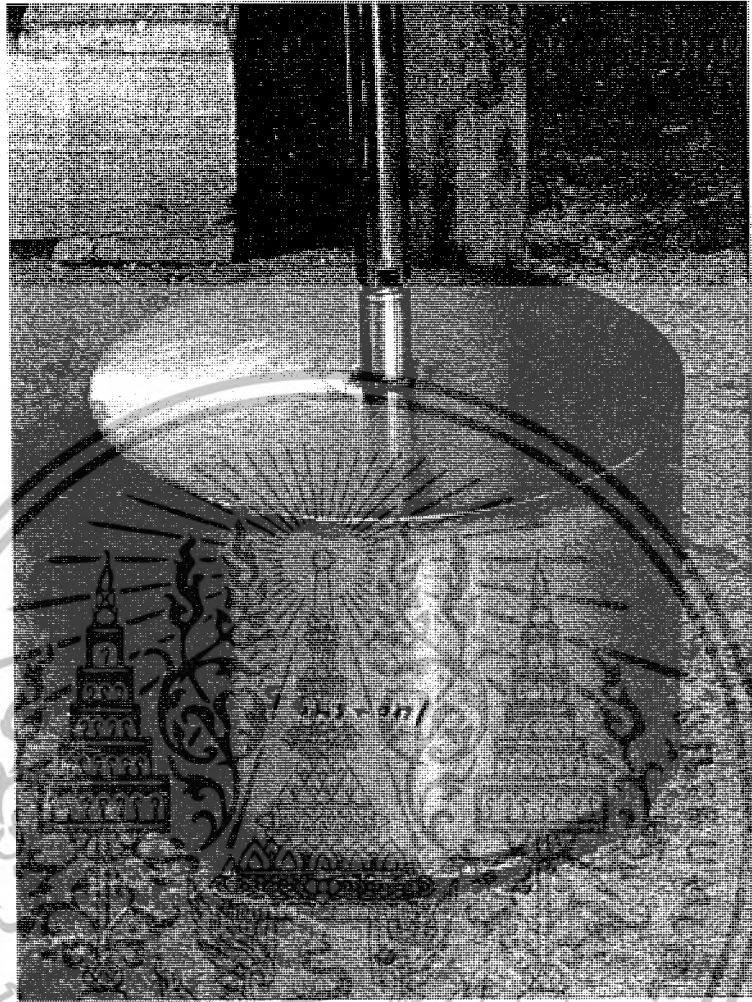
### 3.3.2 ครอบอกสูบกำลัง (Power cylinder) ทำจากเหล็ก



รูปที่ 3.5 ครอบอกสูบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

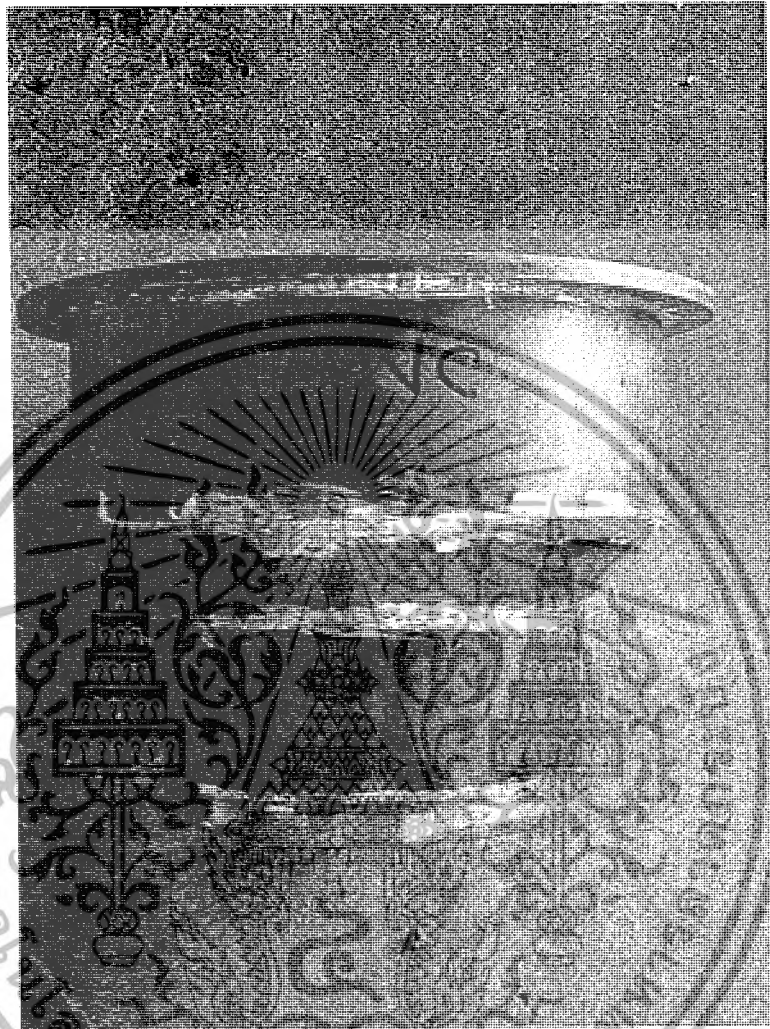
### 3.3.3 คิสเพลสเซอร์ (Displacer piston) ทำจากอลูมิเนียม



รูปที่ 3.6 คิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

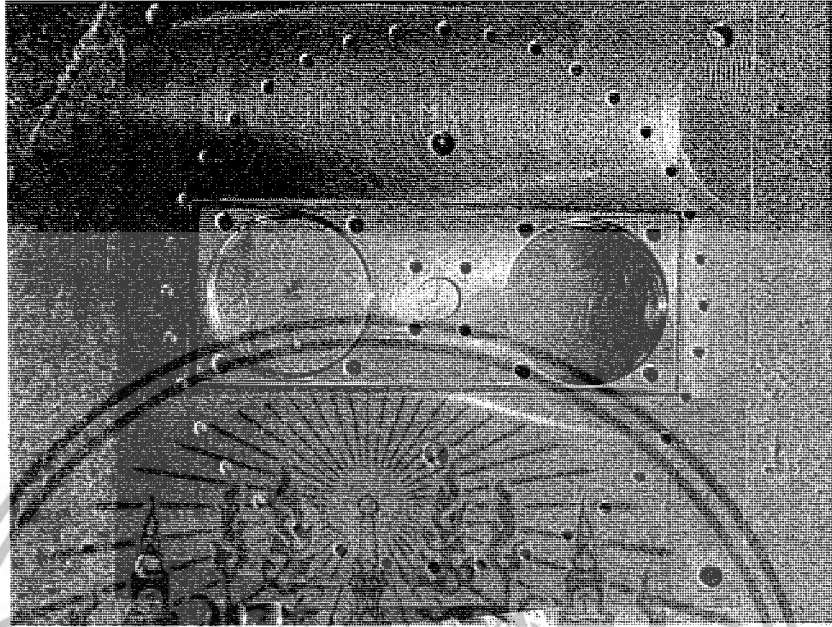
### 3.3.4 ครอบอกสูบคิสเพลสเซอร์ (Displacer cylinder) ทำจากเหล็ก



รูปที่ 3.7 ครอบอกสูบคิสเพลสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.3.5 เพลท (Main plate) ทำจากเหล็ก

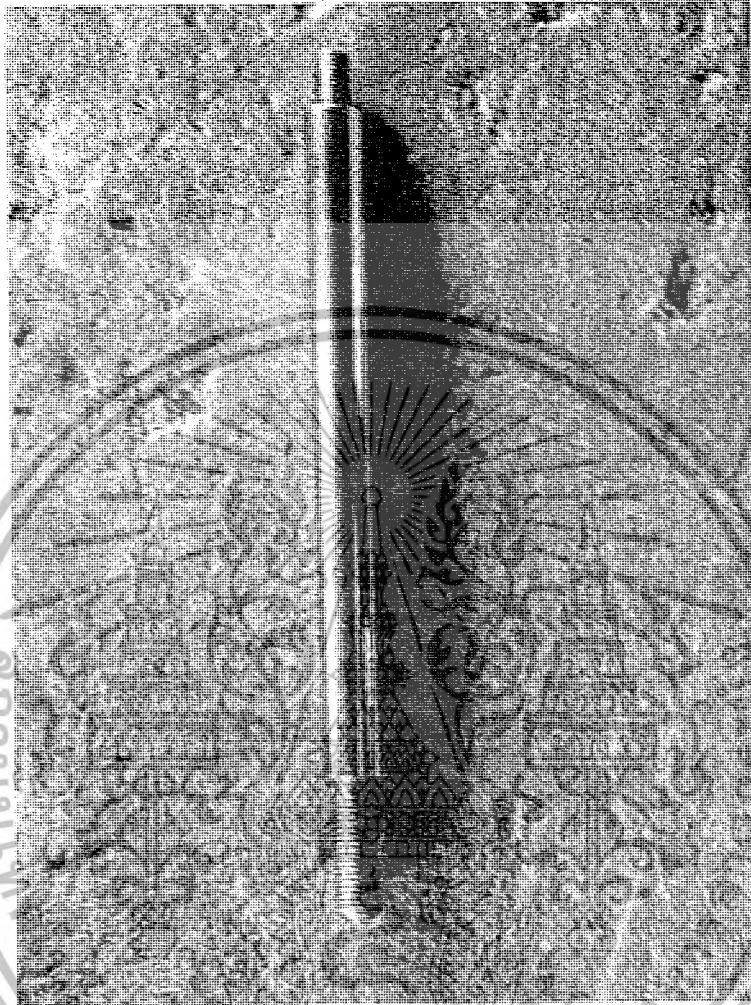


รูปที่ 3.8 เพลท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6 ก้านสูบ (Rod) ทำจากเหล็ก



รูปที่ 3.9 ก้านสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.7 ล้อช่วยแรง (Fly wheel) ทำจากเหล็ก



รูปที่ 3.10 ล้อช่วยแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.1** ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเกมม้าที่ออกแบบ

ส่วนประกอบ	วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	กว้าง	ยาว	สูง
ลูกสูบกำลัง	Steel	97.50	91.50	-	-	99
กระบอกสูบ ลูกสูบกำลัง	Steel	106	99	108	108	230.60
ดิสเพลสเซอร์	Aluminium	218	214	-	-	150
กระบอกสูบ ดิสเพลสเซอร์	Steel	232	266	-	-	270.50
รีเจนเนอเรเตอร์	Steel wool	319	266	-	-	116.48
ล้อช่วยแรง	Steel	305	-	19.50	-	-
ก้านสูบลูกสูบกำลัง	Steel	12	-	-	-	310
ก้านสูบดิสเพลสเซอร์	Steel	20	-	-	-	432
เพลทข้อเหวี่ยง	Steel	-	-	-	-	-
เพลท	Steel	-	-	390	402	25.50

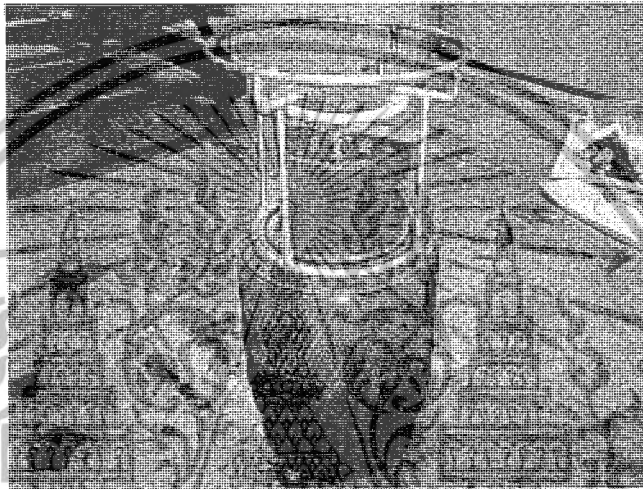
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลอง

#### 4.1 อุปกรณ์การทดลอง

4.1.1 เตาแก๊ส ซึ่งจะเป็นแหล่งป้อนพลังงานความร้อนให้กับเครื่องยนต์



รูปที่ 4.1 เตาแก๊ส

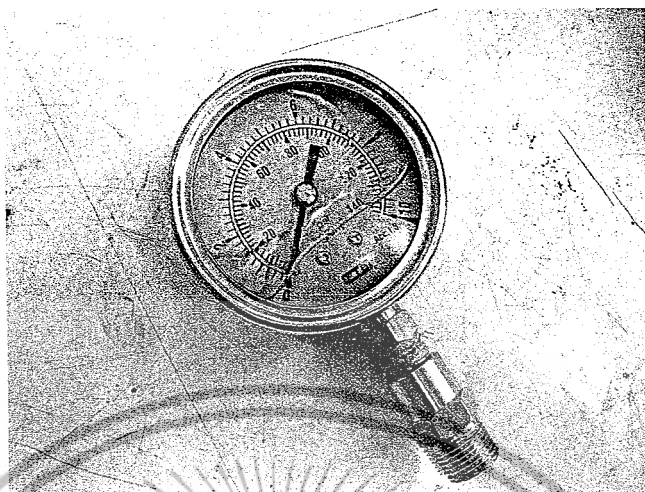
4.1.2 เครื่องวัดรอบ (Tachometer)



รูปที่ 4.2 เครื่องมือวัดรอบ (tachometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure gage)



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์วัดความดัน ( Pressure gage )

#### 4.1.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ แบบอินฟราเรด (Infrared thermometer)



รูปที่ 4.4 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

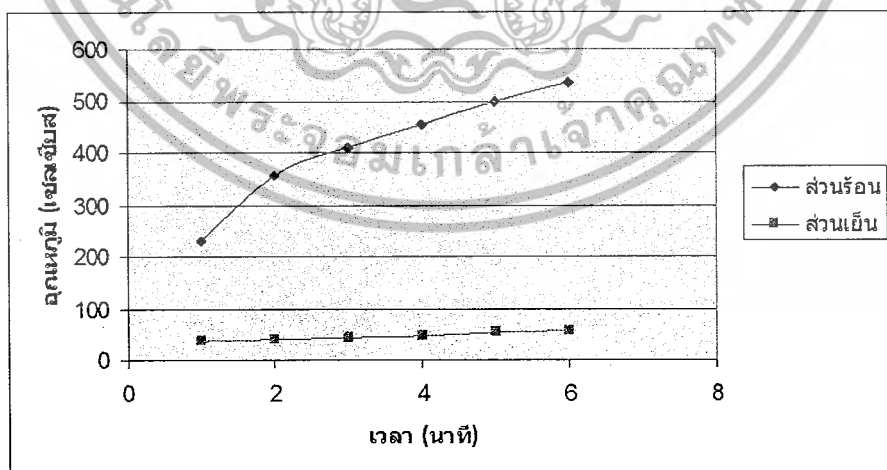
## 4.2 วิธีการทดลอง

การทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแก๊วม่าที่สร้างขึ้น จะใช้แก๊สหุงต้มในการป้อนพลังงาน ความร้อนให้แก่เครื่องยนต์ เมื่อนำแหล่งความร้อนมาเผาที่บริเวณกระบอกคิสเพลสเซอร์ส่วนร้อน อากาศภายในกระบอกคิสเพลสเซอร์จะขยายตัวและเกิดความดันพอที่จะเอาชนะความดันบรรยากาศ ความดันนี้จะทำให้คิสเพลสเซอร์เคลื่อนที่ขึ้น อากาศที่อยู่ระหว่างคิสเพลสเซอร์กับลูกสูบกำลังจะเกิดการอัดตัวทำให้ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ขึ้นและในขณะนั้นอากาศจำถูกทำให้เย็นตัวลงในส่วนเย็นของคิสเพลสเซอร์ โดยการทดสอบจะมีขั้นตอน ดังนี้

- 1) ให้ความร้อนแก่คิสเพลสเซอร์ที่บริเวณส่วนร้อน
- 2) วัดอุณหภูมิในส่วนร้อน และส่วนเย็น
- 3) วัดความดันภายในเครื่องยนต์
- 4) จับเวลาและบันทึกผลทุกหนึ่งนาที
- 5) วัดความเร็วรอบ

## 4.3 ผลการทดลอง

จากการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแก๊วม่าที่สร้างขึ้นพบว่า เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ตามทฤษฎีที่ออกแบบ แต่จะเริ่มทำงานที่อุณหภูมิของบริเวณส่วนร้อนประมาณ 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลต่างอุณหภูมิส่วนร้อนและส่วนเย็น

จากผลการทดลองจะได้ผลของเครื่องยนต์ทำงานที่ความดันภายในกระบอกสูบที่ 0.15 บาร์  
ทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิส่วนร้อนที่ 534.82 องศาเซลเซียสและส่วนเย็นที่อุณหภูมิ 57.6 องศาเซลเซียส  
วัดความเร็วรอบได้เท่ากับ 53 รอบต่อนาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเกมมาขึ้น ซึ่งเครื่องยนต์ประกอบไปด้วย 1 กระจกบอบคิสเพลสเซอร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับ 2 กระจกบอบคิสกำลัง และกระจกบอบคิสแต่ละอันจะมีลูกสูบอยู่ซึ่งการทำงานของลูกสูบทั้งสามนี้จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยเพลาคือเหวี่ยงที่ลูกสูบออกแบบขึ้น โดยออกแบบให้ลูกสูบคิสเพลสเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 226 มิลลิเมตร และระยะชัก 110 มิลลิเมตร ส่วนลูกสูบกำลังนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 97.5 มิลลิเมตร และระยะชัก 48 มิลลิเมตร เครื่องยนต์ทำงานที่ความดันภายในกระจกบอบคิสที่ 0.15 บาร์ ทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิส่วนร้อนที่ 534.82 องศาเซลเซียส และส่วนเย็นที่อุณหภูมิ 57.6 องศาเซลเซียส วัดความเร็วรอบได้เท่ากับ 53 รอบต่อนาที

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 วัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นส่วนอาจมีน้ำหนักมากเกินไป เหตุเพราะวัสดุบางชิ้นส่วนนั้นมีราคาสูงเป็นการเพิ่มต้นทุนในการสร้าง จึงได้นำวัสดุที่มีอยู่แล้วมาใช้แทนเป็นการลดต้นทุน อย่างเช่น เหล็กที่นำมาใช้ทำก้านสูบนั้นเป็นวัสดุที่มีอยู่แล้วซึ่งมีน้ำหนักสูง ขอเสนอให้ใช้อลูมิเนียมซึ่งมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงมากพอสำหรับเครื่องยนต์ที่ออกแบบ

5.2.2 ความดันภายในเครื่องยนต์ต่ำเกินไปทำให้กลไกภายในไม่สามารถทำงานได้อย่างราบรื่น เหตุเพราะเนื่องจากความร้อนที่ป้อนให้เครื่องยนต์ไม่เพียงพอและไม่เสถียรที่จะทำให้อากาศขยายตัวและเกิดความดันสูงเพื่อจะดันลูกสูบกำลังให้เคลื่อนที่ขึ้น วิธีการแก้ไข คือ ต้องหาแหล่งพลังงานความร้อนที่สูงกว่าเดิมและเสถียร เพราะถ้ามีการให้ความร้อนที่สูงและเสถียรจะทำให้เครื่องยนต์ทำงานดียิ่งขึ้น

5.2.3 ส่วนรีเจนเนอเรเตอร์นั้นแลกเปลี่ยนความร้อนได้ไม่ดี โดยอากาศที่ถูกทำให้ร้อน เมื่อเคลื่อนที่มายังบริเวณส่วนเย็นไม่สามารถคายความร้อนให้กับส่วนรีเจนเนอเรเตอร์ได้มากพอจึงทำให้อากาศเย็นตัวลงไม่ทัน กำลังของเครื่องยนต์ที่ได้จะน้อยวิธีการแก้ไข คือ

5.2.3.1 พัฒนาการระบายความร้อนในส่วนเย็นโดยการติดครีป หรือ การใช้น้ำมาหล่อเย็น และพัฒนาส่วนรีเจนเนอเรเตอร์มีปริมาตรหนึ่งลดลง เพราะปริมาตรหนึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง

5.2.3.2 เลือกใช้วัสดุที่มีความจุความร้อนที่สูง การนำความร้อนต่ำ

5.2.4 สารทำงานที่ใช้อยู่เป็นอากาศซึ่งหาง่ายและทำงานได้ในระดับปานกลาง การพัฒนานั้นสามารถเลือกใช้ ไฮโดรเจนหรือฮีเลียม เพราะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดีขึ้นแต่ทั้งสองมีราคาสูง

5.2.5 การสูญเสียพลังงานในเครื่องยนต์ พลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์จริงจะได้ค่าน้อยกว่าตามทฤษฎีที่ออกแบบ จึงควรมีมาตรการวังในเรื่องของการรั่วไหลของอากาศ ซึ่งปัญหานี้เป็นปัญหาที่สำคัญมากสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทุกประเภท จึงควรมีการออกแบบให้ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นที่ประกอบกันมีระยะช่องว่างให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศหรืออาจใช้ประเก็นช่วยในการกั้นระหว่างการประกอบชิ้นส่วนสองชิ้นต่อกัน แต่ประสิทธิภาพอาจไม่ดีนัก ทางที่ดีควรออกแบบให้ชิ้นส่วนสวมกันได้ดีหรือเป็นสลักเกลียวในและเกลียวนอก

5.2.6 ต้องตั้งจุดศูนย์ถ่วงของเครื่องยนต์ให้ดีเพราะจะช่วยทำให้เครื่องไม่สั่น และลดการเสียหายจากการเสียดสีภายในเครื่องยนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G.Walker , STIRLING ENGINE , Oxford University Press , New York , 1980
- [2] จำเริญ ศรีจันทร์ และ มานพ เหลืองทองวัฒนา , “การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องยนต์สเตอร์ลิง” , ปรินูญานินพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ , พ.ศ.2544
- [3] Kongtragool B , Wongwises S , Thermodynamic analysis of a Stirling engine Include dead volumes of hot space , cold space and regenerator. *Renew Energy* 2006;31:345-395
- [4] D.G. Thombave , S.K. Verma , Technological development in the Stirling cycle engines. *Renew Energy* 2008;12:1-38
- [5] สุรชัย จิรชาคริต , บันเทิง ศิลป์สกุลสุข , นัฐพล ปานพรหมินทร์ , “การประดิษฐ์เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟา” , ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, กรุงเทพฯ , พ.ศ. 2551
- [6] Kongtragool B , Wongwises S , A four power-piston low-temperature differential Stirling engine using simulated solar energy as a heat source. *Solar Energy* 2008;82:493-500
- [7] ไพบุลย์ ศรีภคกร , “การออกแบบเชิงวิเคราะห์สำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบความต่างของอุณหภูมิต่ำ” , ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , กรุงเทพฯ พ.ศ. 2546
- [8] พงศ์สินธุ์ , “การศึกษาการคำนวณกำลังข่งจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้า กระบอกสูบเดี่ยว” , ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต , ปทุมธานี พ.ศ. 2551
- [9] ไพบุลย์ ศรีภคกร และ จิตรกร ศรีสายชล , “การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดอัลฟาจากเครื่องอัดอากาศ” , ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , กรุงเทพฯ
- [10] อัครรัตน์ พูลกระจำง และ ขวัญชัย จ้อยเจริญ , “การออกแบบและสร้างชุดทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้อากาศร้อน” , ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า , ปทุมธานี
- [11] สมพร ต้นดวงศ์ไพศาล , “เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบลูกสูบเหลว” , ภาควิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม , กรุงเทพฯ พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ ก. 1 ผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ครั้งที่ 1

เวลา (นาทิจ)	อุณหภูมิส่วนร้อน (เซลเซียส)	อุณหภูมิส่วนร้อน (เซลเซียส)
1	230.3	36.5
2	341.9	36.4
3	399.7	38.7
4	401.5	43.7
5	417.0	46.4
6	531.7	51.4

ความดันภายในกระบอกสูบ 0.2 บาร์

ความเร็วรอบ 53 รอบต่อนาที

ตารางที่ ก. 2 ผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ครั้งที่ 2

เวลา (นาทิจ)	อุณหภูมิส่วนร้อน (เซลเซียส)	อุณหภูมิส่วนร้อน (เซลเซียส)
1	262.9	36.5
2	394.5	38.0
3	389.3	41.1
4	453.7	42.1
5	500.2	43.0
6	520.4	46.1

ความดันภายในกระบอกสูบ 0.15 บาร์

ความเร็วรอบ 53 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. 3 ผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	อุณหภูมิส่วนร้อน (เซลเซียส)	อุณหภูมิส่วนร้อน (เซลเซียส)
1	229.7	38.5
2	340.3	39.1
3	408.3	41.5
4	464.1	43.0
5	497.3	48.4
6	532.2	50.4

ความดันภายในกระบอกสูบ 0.15 บาร์

ความเร็วรอบ 52 รอบต่อนาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

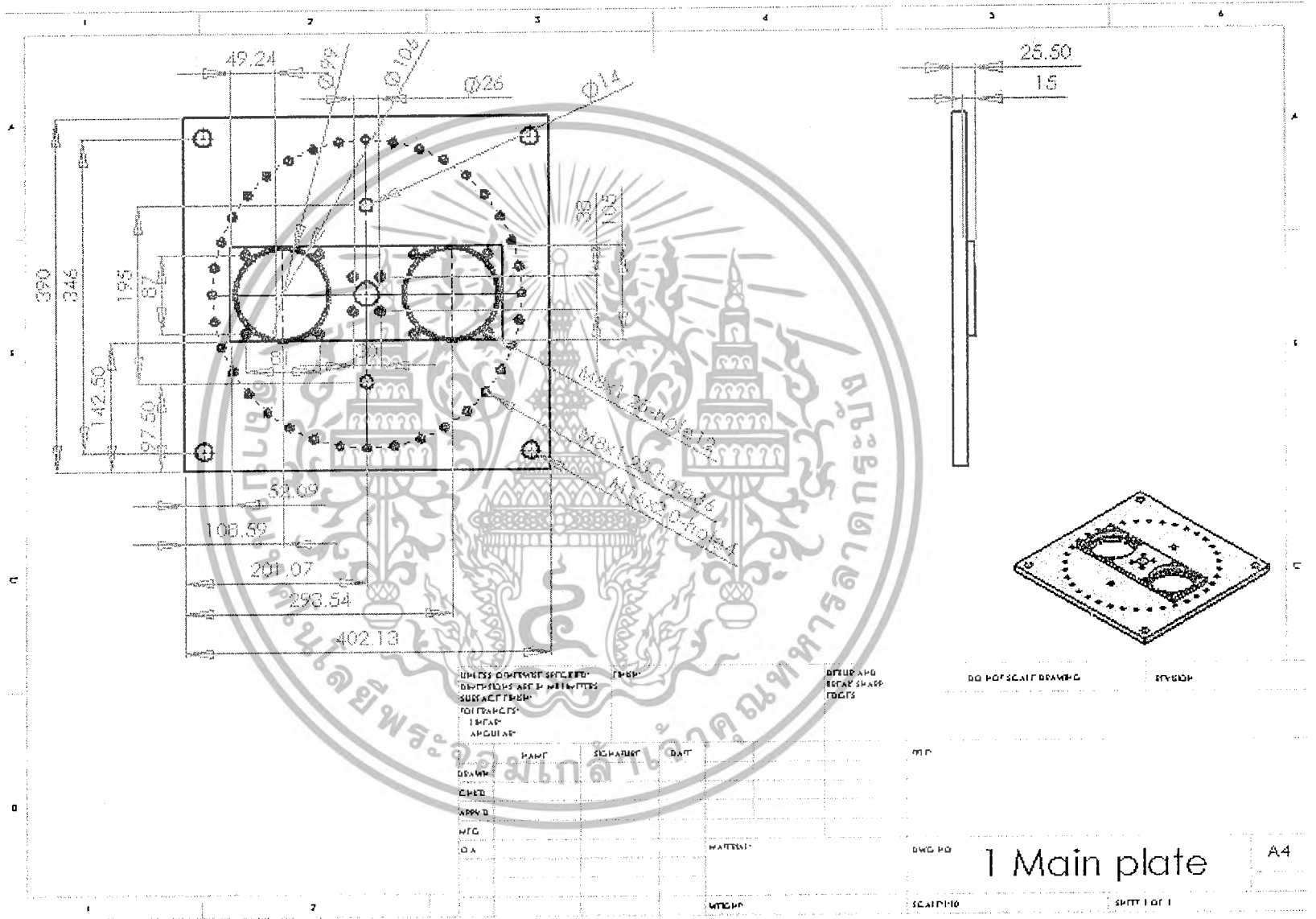
ภาคผนวก ข.

แบบเขียนและขนาดส่วนประกอบต่างๆของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนแบบแผ่นรองเตาและขีปนาวุธขนาด 1.6 นิ้ว



UNIVERSITY OF BURIRAM  
 DEPARTMENT OF ARCHITECTURE  
 SURABHITRAK  
 101 THANGYU  
 101 THANGYU  
 101 THANGYU

DESIGN	NAME	SIGNATURE	DATE
CHKD			
APPRD			
WTC			
QA			

OTHER AND  
 RETAR SHAP  
 LOGITS

DO NOT SCALE DRAWING

STUDY

WTC

DWG NO

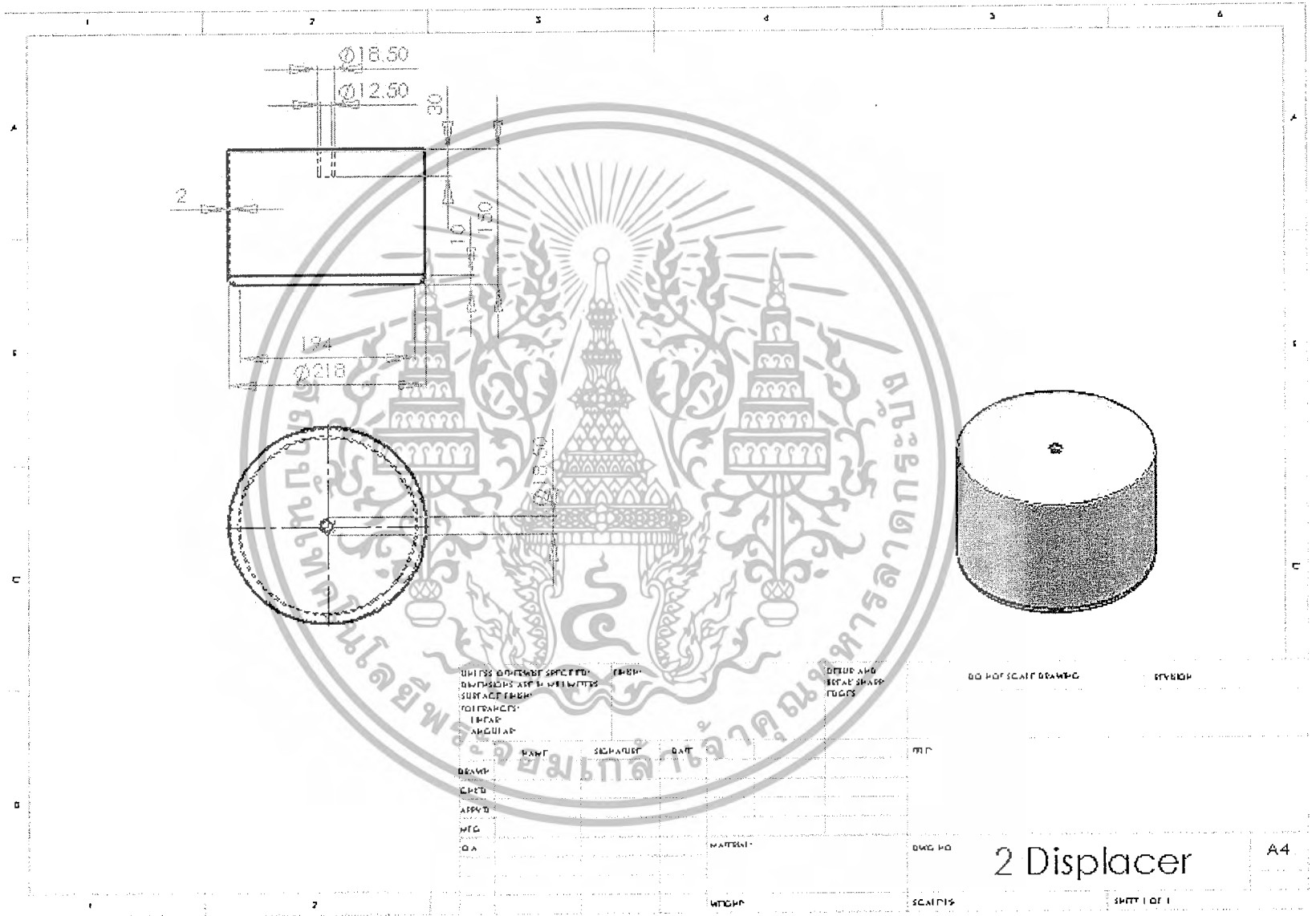
1 Main plate

A4

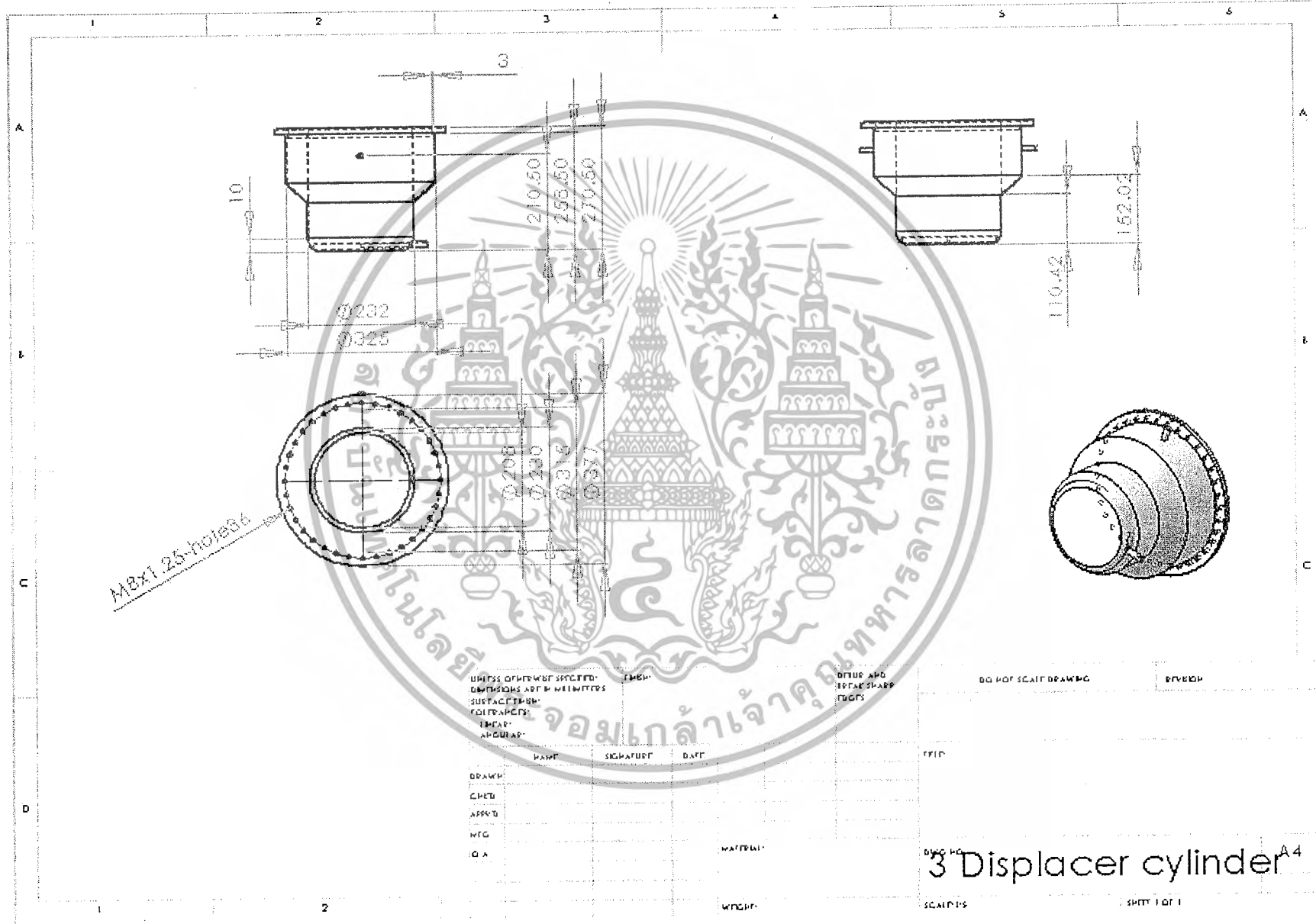
SCALE 1:10

SHEET 1 OF 1

รูปที่ ๓. ๒ แบบเขียนและขนาดของลูกตุ้มพลตเซอร์

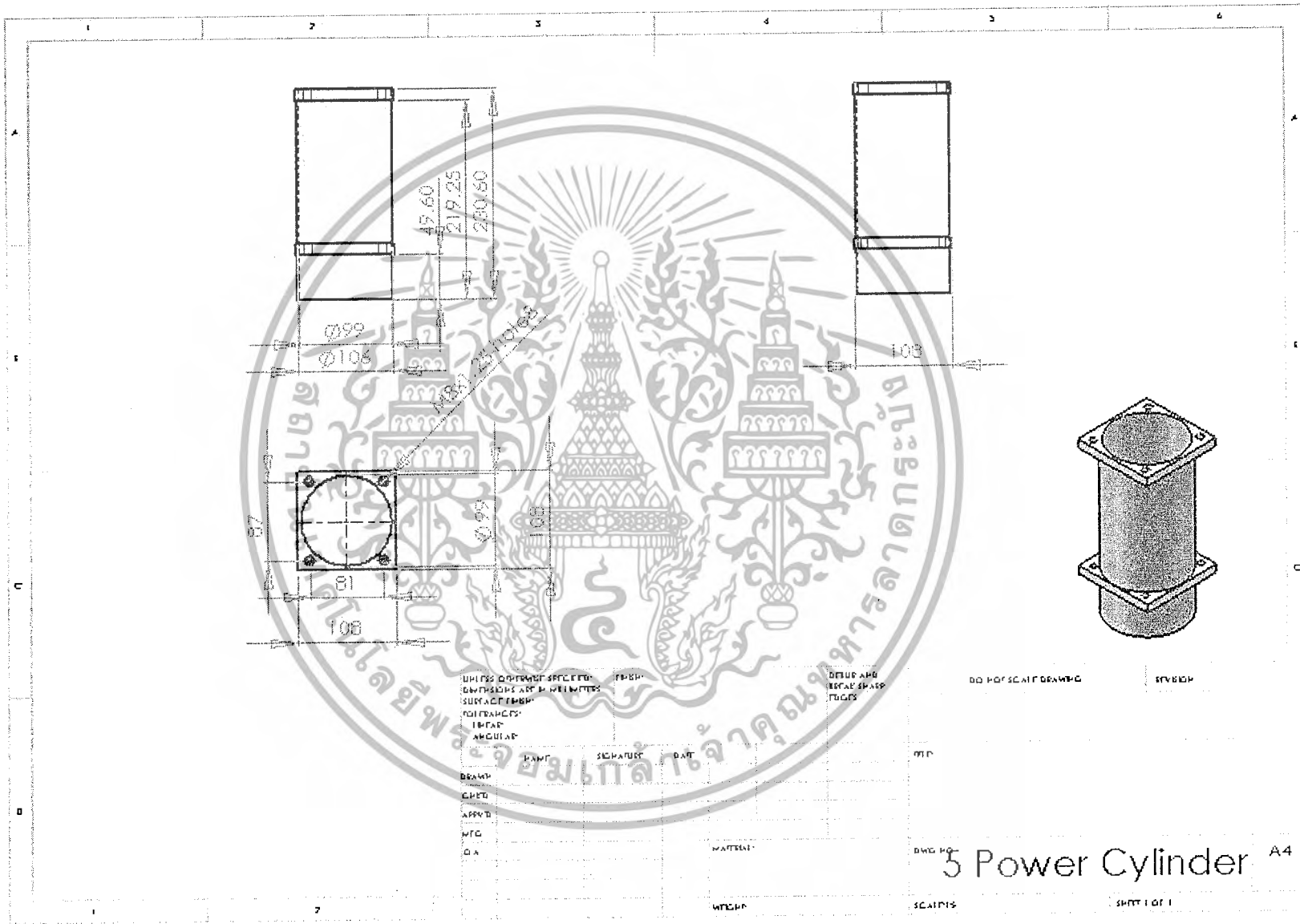


รูปที่ ๓. 3 แบบเขียนและขนาดของกระบอกลูกสูบดีเซลเทอร์



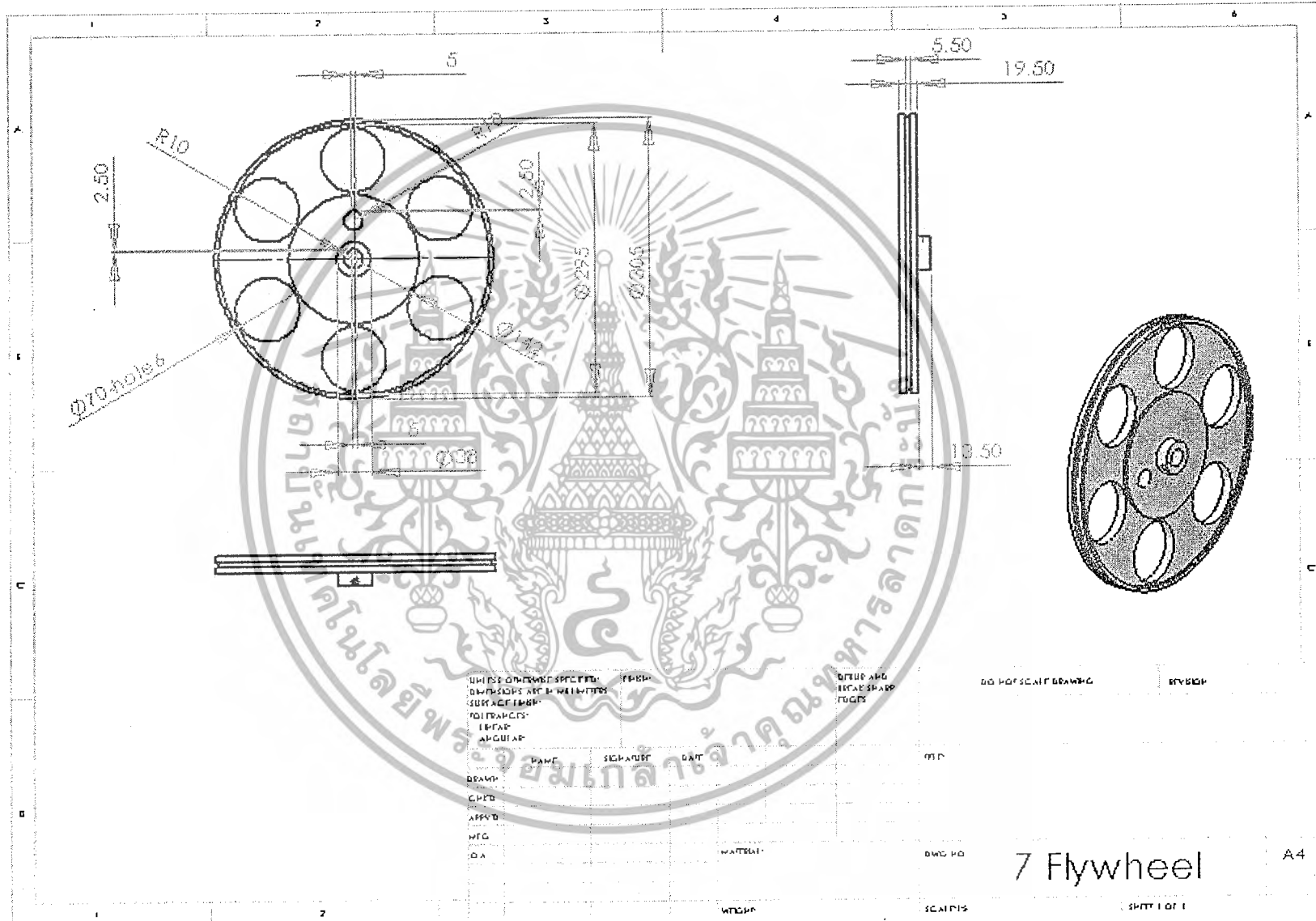


รูปที่ ๑.๕ แบบเขียนและขนาดของกระบอกสูบกำลัง

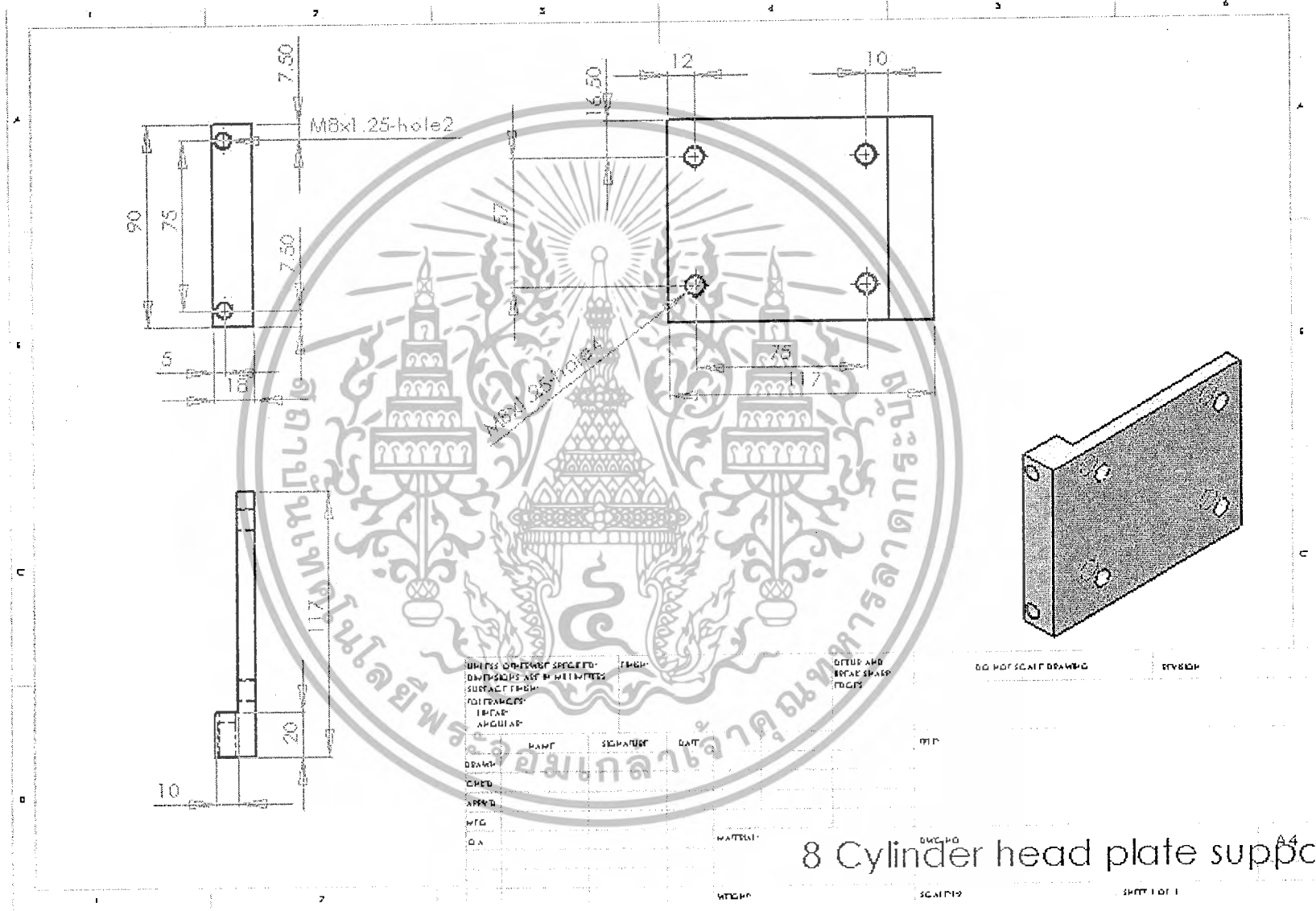




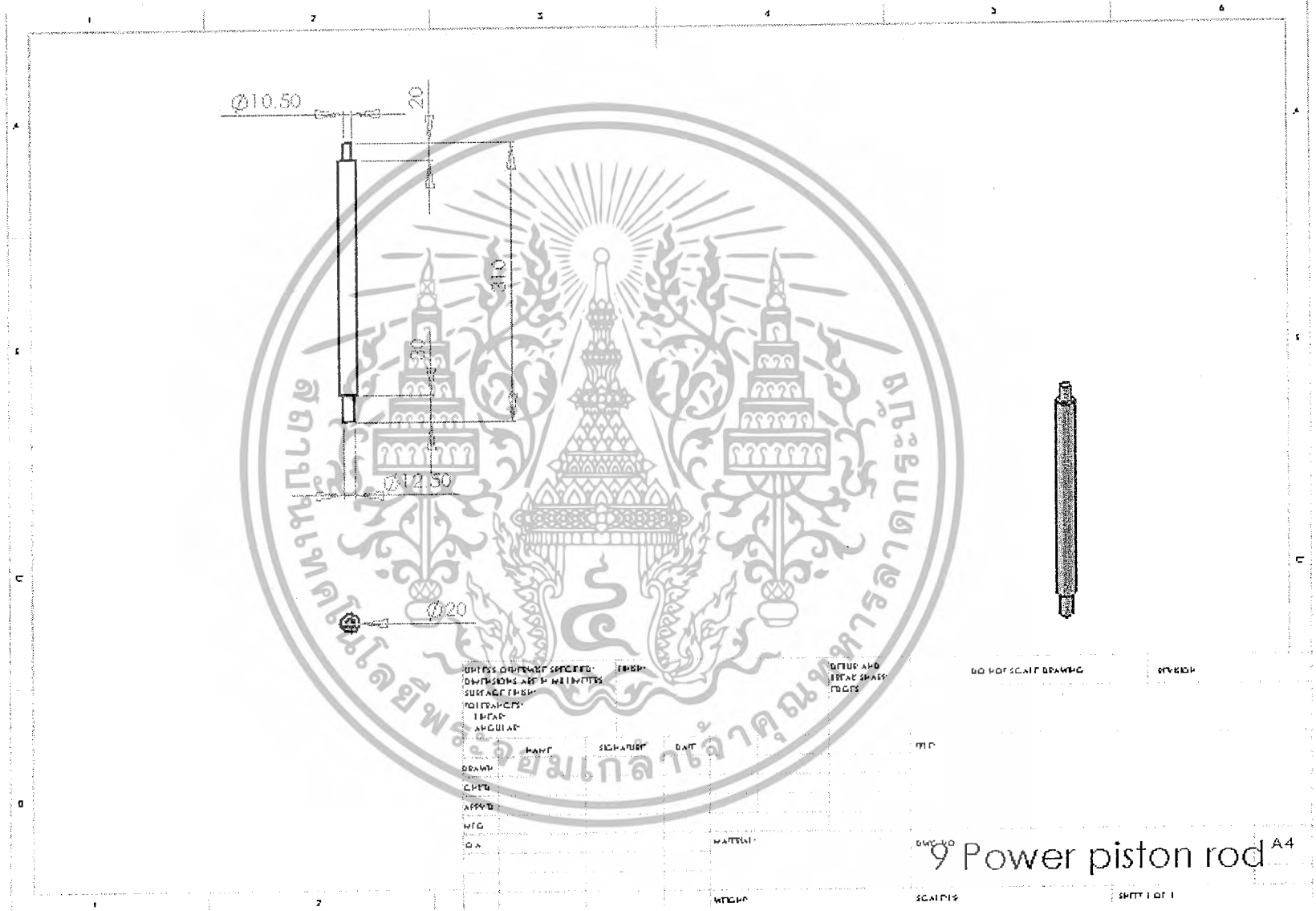
รูปที่ 7. แบบเขียนและขนาดของล้อ 7.ด. นีเกะ



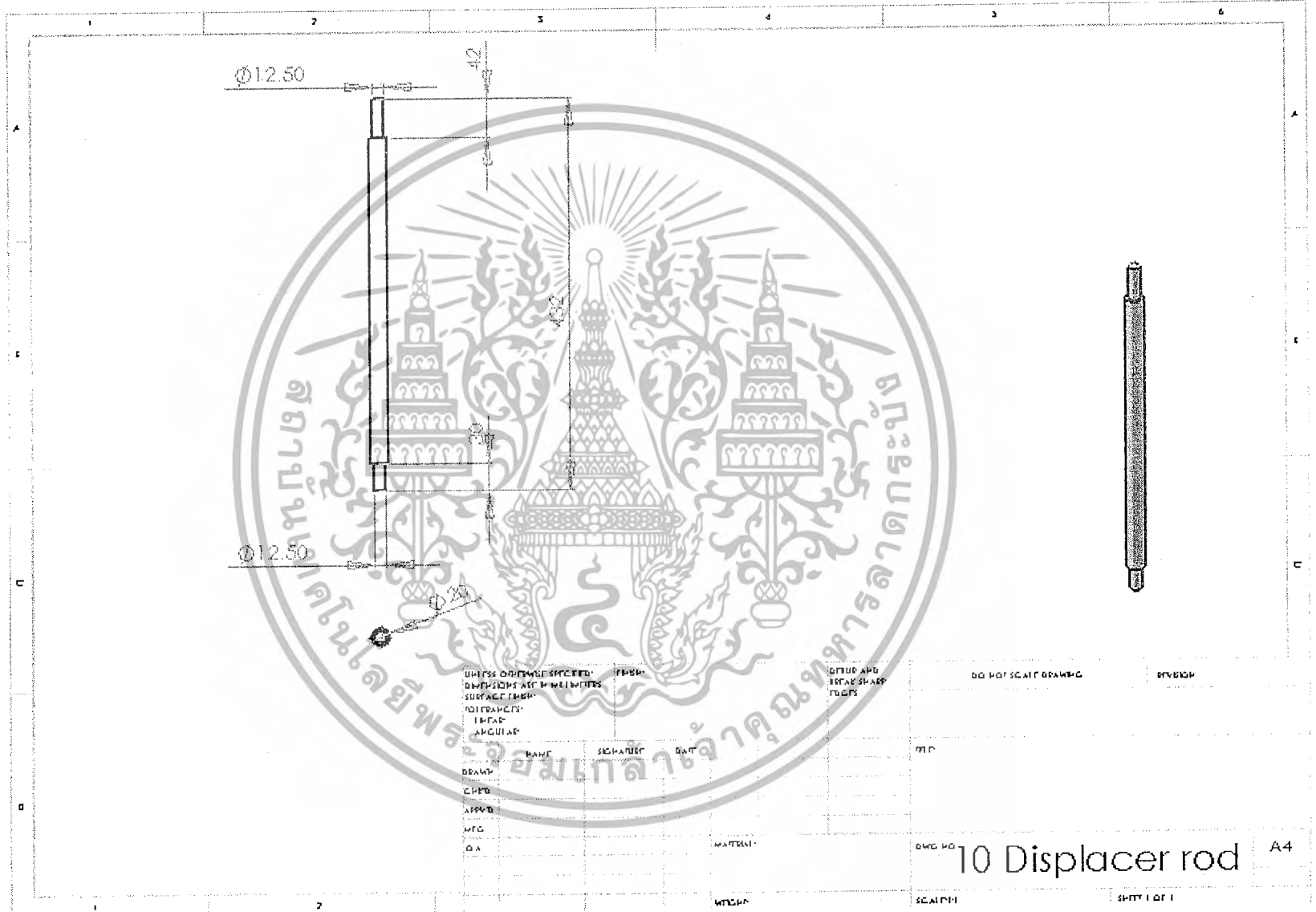
รูปที่ ๘.๘ แบบและขนาดของแผ่นรองหัวสูบ 8.๘.๒



สมุดบัญชีทะเบียนรถของรถจักรยานยนต์เก่า ๖๗ ปีครึ่ง

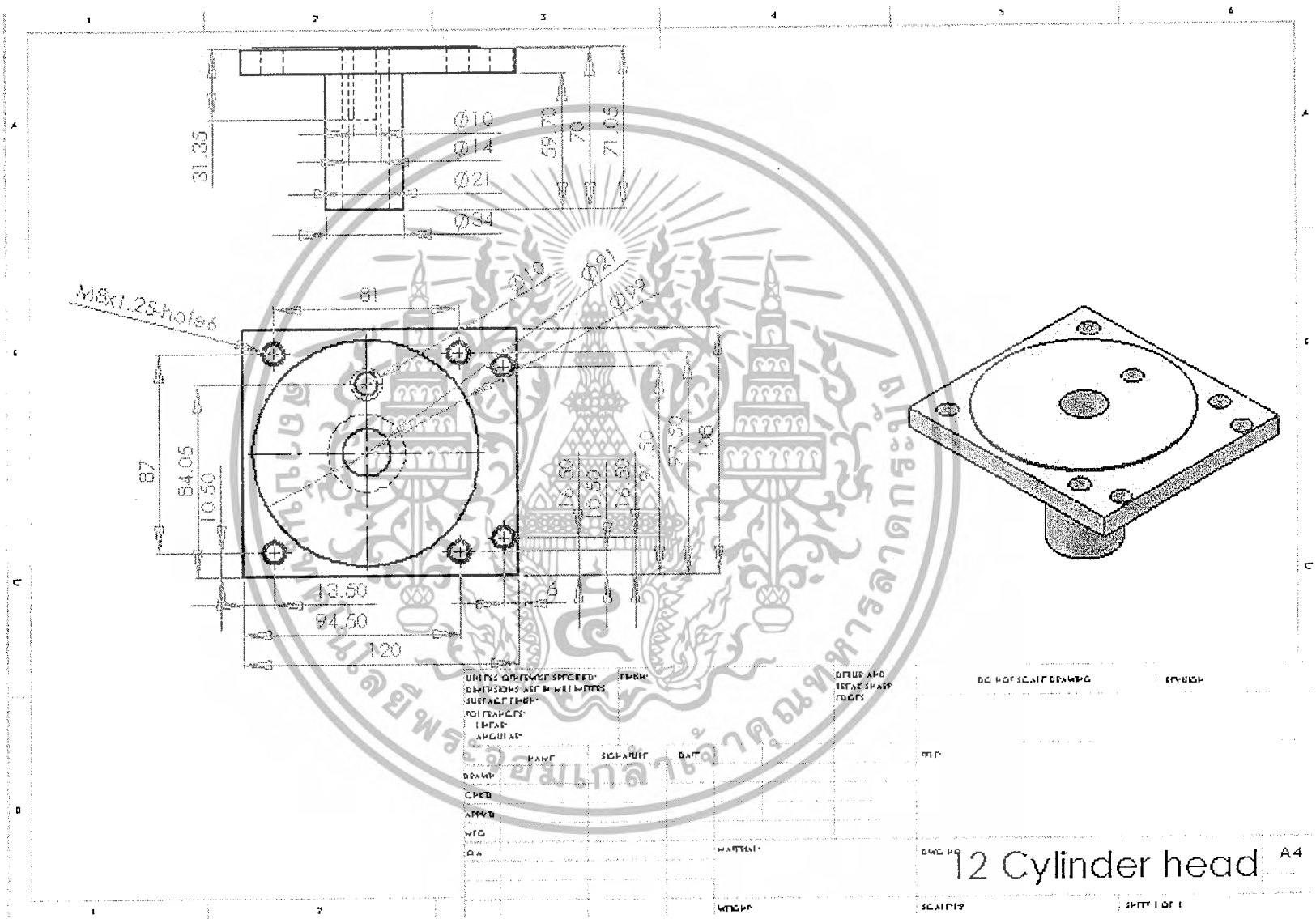


รูปที่ ๑๐.1๐ แบบเขียนและขนาดของงานเขียนชิ้น Displacer rod



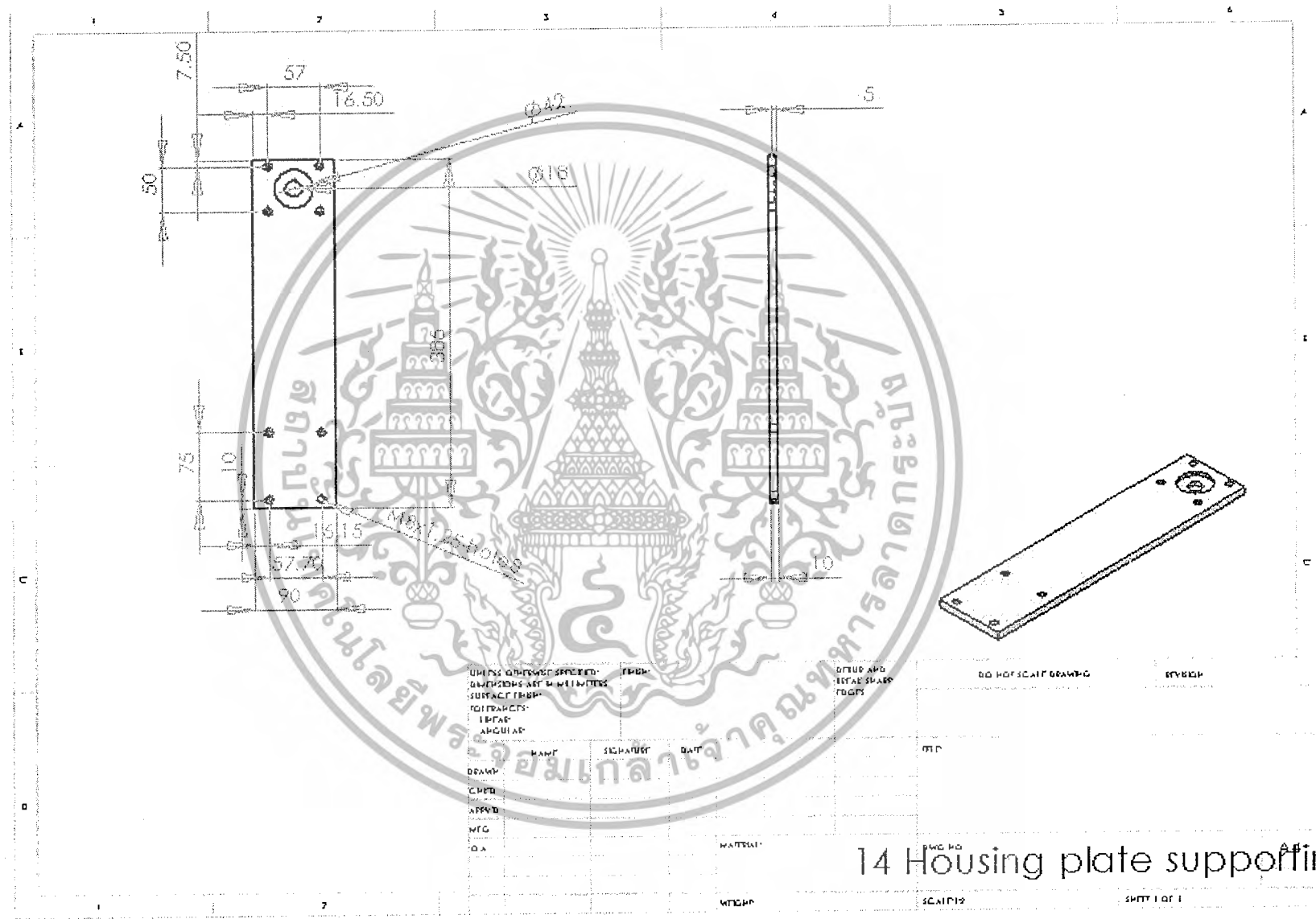


รูปที่ ข.12 แบบเขียนและขนาดของฝาครอบลูกสูบกำลัง





รูปที่ ข.14 แบบเขียนและขนาดของแผ่นพลาซอร์รองรับท่อหัวยิง



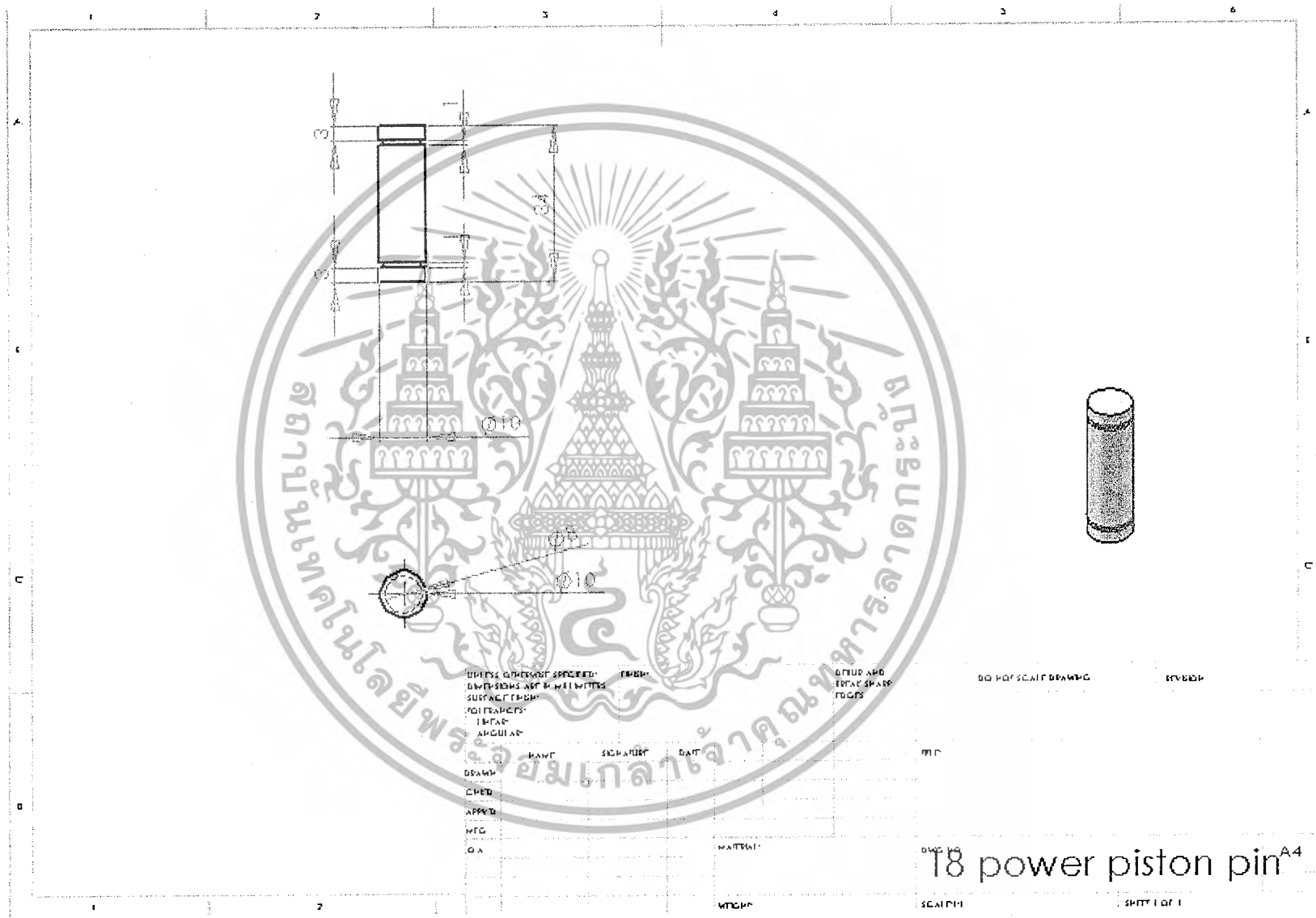
รูปที่ จ.15 แบบเขียนและขนาดของต่อก้านสูบกำลัง



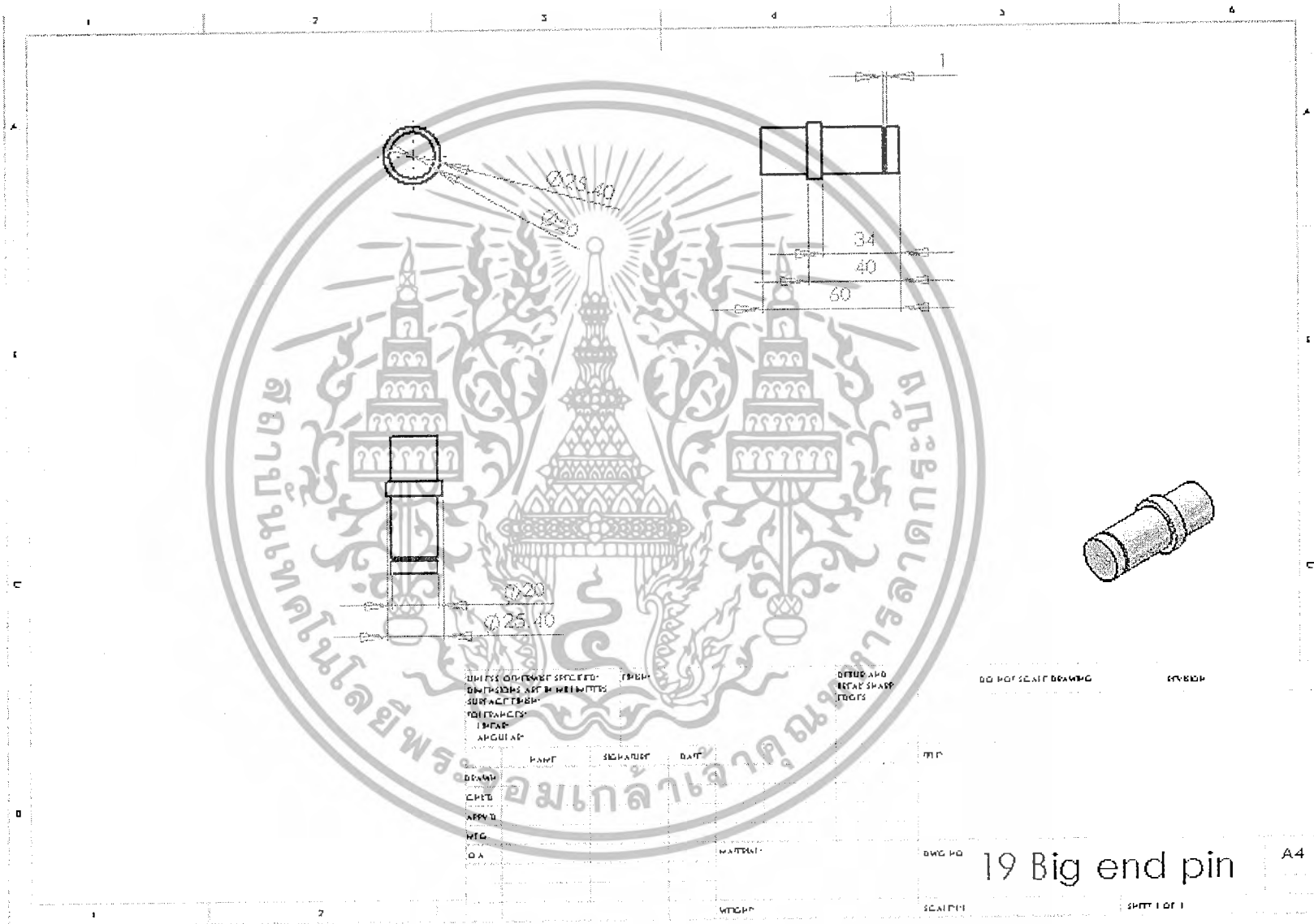




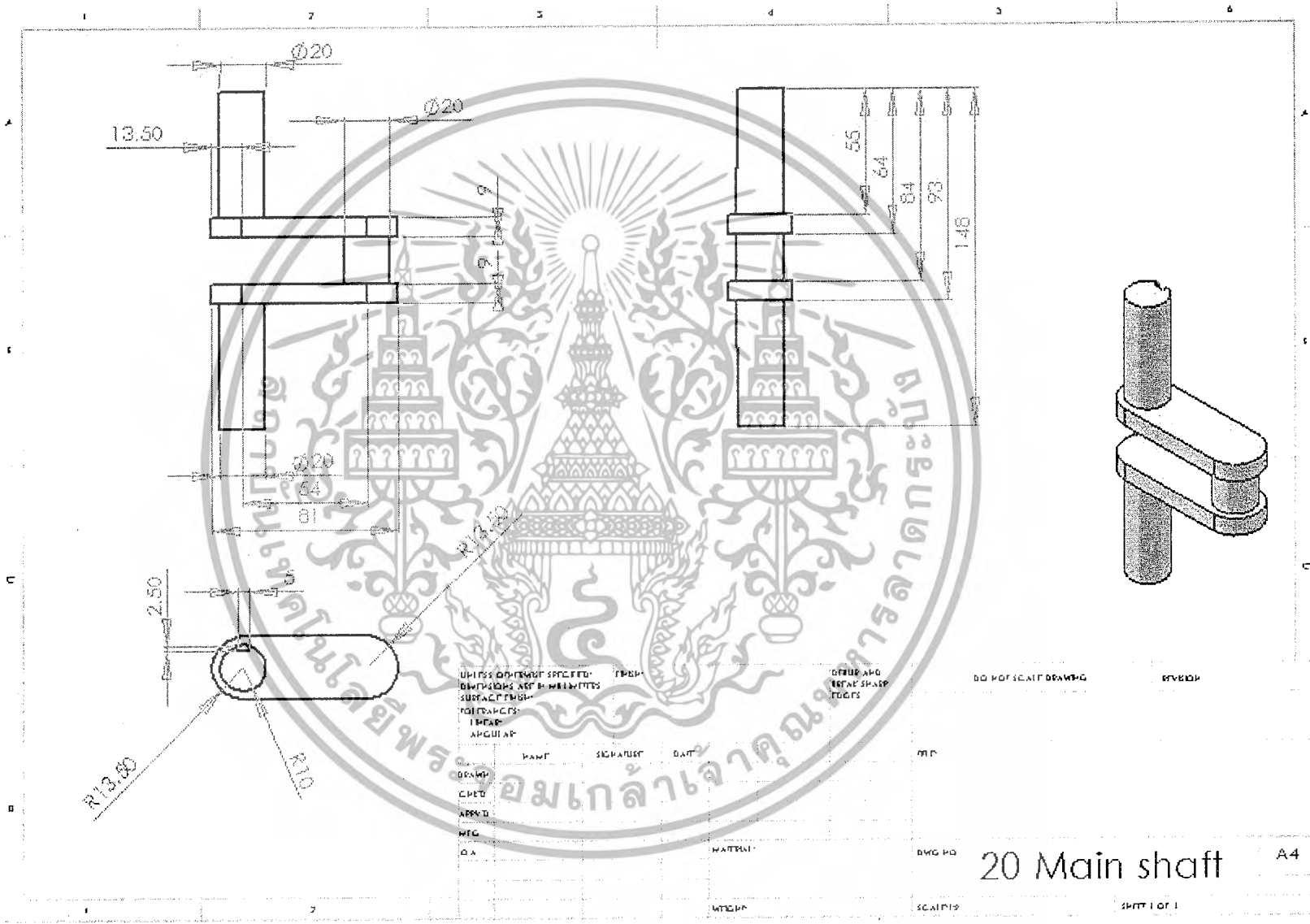
รูปที่ ๖.18 แบบเขียนและขนาดของหมุดเชื่อมข้อต่อถูกบีบกำลัง



รูปที่ ข.19 แบบเขียนและขนาดของชุดเครื่องมือช่วยแรง

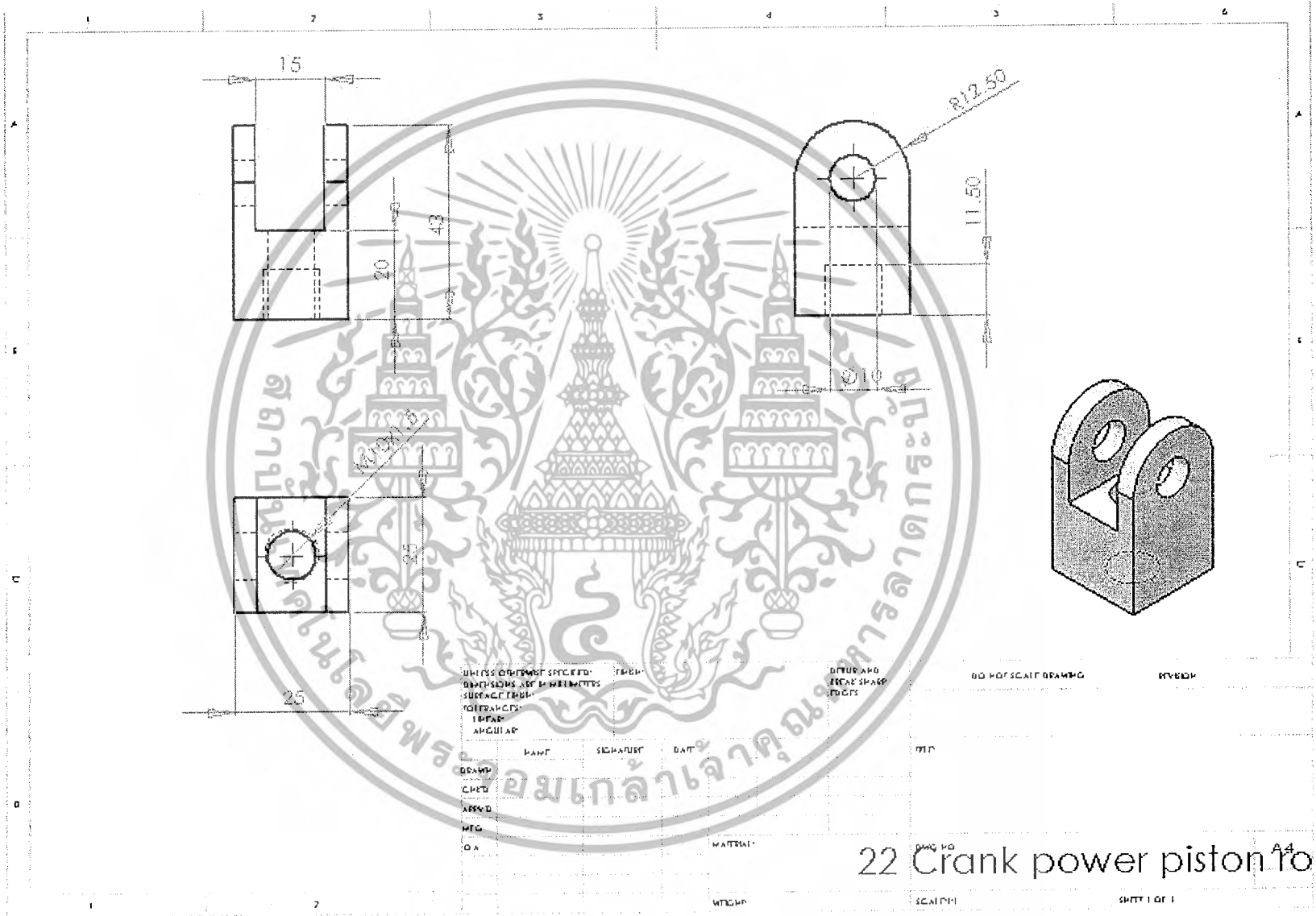


รูปที่ 20 เบบนและขาของเพลาข้อเหวี่ยง





รูปที่ ๗.๒๒ แบบเขียนและขนาดของข้อต่อก้านลูกสูบกำลัง





ภาคผนวก ก.  
บทความประกอบการนำเสนอโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## การออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กแบบแกมมา

### Design and Build A Gamma-Typed Stirling Engine

เบญจพล โตโหมด , พรพรรณ เชี่ยวชาญกิจการ, ภาณุวัฒน์ พรวันชาติ

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.สุตภัสร์ แก้วนงา)

#### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันราคาน้ำมันมีแนวโน้มพุ่งตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นำไปสู่วิกฤติการณ์ราคาน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังมีปัญหาหามลพิษทางอากาศที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายใน ซึ่งส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายนอก ข้อดีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงคือ ออกแบบง่าย เครื่องยนต์ทำงานเงียบ มลพิษต่ำและมีความหลากหลายของแหล่งพลังงานความร้อนที่ให้กับเครื่องยนต์ โครงการนี้จึงทำการศึกษาและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาขึ้น ซึ่งเครื่องยนต์ประกอบไปด้วย 1 กระบอกสูบดีเซลเพลสเซอร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับ 2 กระบอกสูบกำลัง และกระบอกสูบแต่ละอันจะมีลูกสูบอยู่ซึ่งการทำงานของลูกสูบทั้งสามนี้จะถูกเชื่อมต่อด้วยเพลลาข้อเหวี่ยงที่ถูกออกแบบขึ้น โดยออกแบบให้ลูกสูบดีเซลเพลสเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 226 มิลลิเมตร และระยะชัก 110 มิลลิเมตร ส่วนลูกสูบกำลังนั้นมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 97.5 มิลลิเมตร และระยะชัก 48 มิลลิเมตร โดยเครื่องยนต์นี้จะมีความสามารถผลิตกำลังตามทฤษฎี 10 วัตต์ ความดันของอากาศ 1 บาร์ อุณหภูมิส่วนร้อน 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิส่วนเย็น 65 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที การทดลองนี้ได้ใช้แหล่งให้ความร้อนจากแก๊สหุงต้ม จากผลการทดลองจะได้ผลของเครื่องยนต์ทำงานที่ความดันภายในกระบอกสูบที่ 0.15 บาร์ ทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิส่วนร้อนที่ 534.82 องศาเซลเซียสและส่วนเย็นที่อุณหภูมิ 57.6 องศาเซลเซียส วัดความเร็วรอบได้เท่ากับ 53 รอบต่อนาที

**คำหลัก:** เครื่องยนต์สเตอร์ลิง, เครื่องยนต์แก๊สร้อน, เครื่องยนต์สันดาปภายใน, ชนิดแกมมา

#### Abstract

Currently, fossil fuel price is increasing continuously leading to fuel price crisis. In addition, exhaust from fossil fuel engine as in the internal combustion engine causes air pollution, green house effect, and global warming. Stirling engine is a hot gas engine that offers good advantages over conventional engine in fuel choice, simple design, quiet, and low pollution. This project aimed to study, design, build and test the gamma-typed Stirling engine. The gamma configuration of the engine consists of one displacer's cylinder which connected with two power piston's cylinders. The working mechanism of the displacer and the power pistons were designed as slider crank with two flywheels storing energy for each of them. The engine specifications consist of the displacer diameter and stroke of 226 mm and 110 mm, respectively, and the power piston diameter and stroke of 97.5 mm and 48 mm, respectively. The engine can produce the theoretical power of 10 watts with air as the working gas at 1 bar, heater temperature of 500°C, cooler temperature of 65°C, and engine speed of 60 rpm. The prototype was built and tested. LPG tank was used as the heat source. In the proof of concept device, the experiments were conducted with heater temperature of 534.80°C, cooler temperature of 57.6°C providing engine speed at 53 rpm.

**Keywords:** Stirling engine, hot gas engine, internal combustion engine, gamma type

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในมีการใช้เชื้อเพลิงที่ทำมาจากฟอสซิล ซึ่งมีราคาแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีอัตราการใช้งานที่สูงก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เชื้อเพลิงที่ทำมาจากฟอสซิลนั้นมีอยู่จำนวนจำกัดบนโลกนี้ ดังนั้นจึงควรรหาสิ่งที่นำมาทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล ในโครงการนี้จึงศึกษาและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพราะมีความหลากหลายในการใช้พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นถูกผลิตโดย โรเบิร์ต สเตอร์ลิง เมื่อ ค.ศ. 1816 เป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกที่อาศัยหลักการอัดตัวและขยายตัวของแก๊สเป็นวัฏจักรที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ภายในเครื่องยนต์โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนการทำงานหลัก ได้แก่ ส่วนปริมาตรอัด คูลเลอร์ รีเจนเนอเรเตอร์ ฮีตเตอร์ และ ส่วนปริมาตรขยาย จุดเด่นของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้น คือ พลังงานความร้อนที่ป้อนให้เครื่องยนต์สามารถใช้ได้หลากหลาย เช่น ความร้อนจากการเผาไหม้ จากแสงอาทิตย์ กระบวนการอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งช่วยสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมักถูกสนใจเพื่อเป็นงานอดิเรก หรือเป็นการทดลอง ภายในประเทศไทยยังมีการศึกษาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงยังไม่กว้างขวาง ส่วนต่างประเทศมีการลงทุนวิจัยศึกษาและผลิตเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อเป็นต้นกำลังในการใช้ประโยชน์จริงมากมาย เช่น บริษัทฟิลลิปส์ของเนเธอร์แลนด์ประสบความสำเร็จในการสร้างระบบทำความเย็น สหรัฐอเมริกามีระบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตกระแสไฟฟ้า สวีเดนใช้ในการผลิตเรือดำน้ำ NASA ใช้ในการสำรวจอวกาศ นิวซีแลนด์ อังกฤษ และเยอรมัน ใช้ในการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (CHP) [1]

ในโครงการนี้เป็นารออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กเพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษาและเป็นแนวทางในการใช้พลังงานทดแทน โดยมีการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและเขียนโปรแกรมคำนวณ ซึ่งการวิเคราะห์เพื่อออกแบบของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นสามารถแบ่งได้ 4 ระดับ [2] คือ

- อันดับที่ศูนย์ คือ วิเคราะห์โดยประมาณค่าซึ่งใช้สมการจากการออกแบบเบื้องต้น
- อันดับที่หนึ่ง คือ วิเคราะห์โดยอ้างอิงวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิก เช่น แบบอะเดียบาติก และแบบอุณหภูมิคงที่
- อันดับที่สอง คือ วิเคราะห์โดยใช้ผลจากการวิเคราะห์อันดับที่หนึ่งแต่เพิ่มการพิจารณาถึงการสูญเสียพลังงานไปในส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์

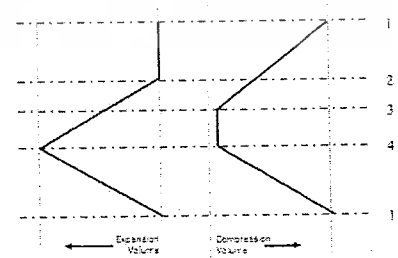
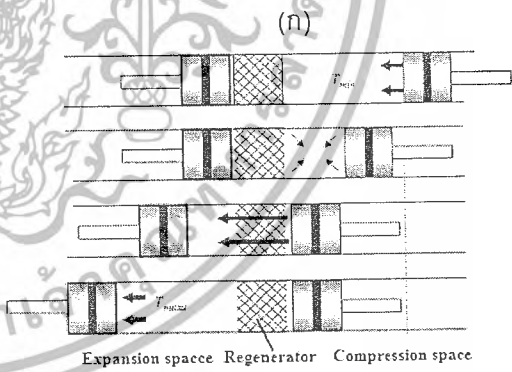
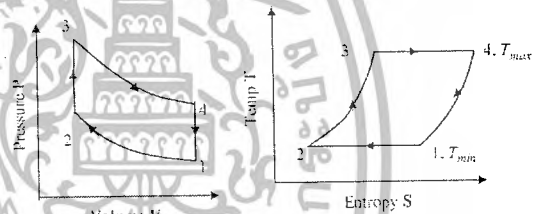
อันดับที่สาม คือ วิเคราะห์อย่างละเอียดโดยแบ่งพิจารณาเครื่องยนต์ออกเป็นส่วย่อยๆ แล้วแก๊สมการหาค่าตัวแปรที่จุดต่อ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบในที่นี้จะใช้การวิเคราะห์อันดับที่ศูนย์มาพิจารณาเพื่อหาค่าลึงที่ได้ของเครื่องยนต์พร้อมทั้งหาวัสดุที่เหมาะสมของชิ้นส่วนต่างๆ และเลือกใช้ก๊าซเพื่อความเหมาะสมในการทำงานที่ความดันของเครื่องยนต์เพื่อให้กำลังที่ได้มีค่าตามที่คาดหวัง

2. ทฤษฎีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์ความร้อนระบบปิด ทำงานตามวัฏจักรสเตอร์ลิงซึ่งคล้ายคลึงกับวัฏจักรคาร์โนต์ อธิบายดังรูปที่ 1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงประกอบด้วยสองลูกสูบที่อยู่ตรงข้ามกัน คือด้านร้อนและเย็น มีรีเจนเนอเรเตอร์อยู่ระหว่างสองลูกสูบ รีเจนเนอเรเตอร์นั้นทำงานในลักษณะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของแก๊สระหว่างลูกสูบสองด้านโดยจะดูดซับความร้อนและปล่อยออกสลับกันไปมา จากรูปที่ 1 ด้านซ้ายจะเป็นส่วนของการขยายตัวซึ่งจะมีอุณหภูมิสูงสุด ส่วนด้านขวานั้นจะเป็นส่วนการอัดตัวซึ่งจะมีอุณหภูมิต่ำสุด รีเจนเนอเรเตอร์นั้นสมมติให้ไม่มีการนำความร้อนในวัฏจักรสเตอร์ลิงจะสมมติให้ลูกสูบเคลื่อนที่โดยปราศจากแรงเสียดทานและไม่เกิดการรั่วไหลของแก๊ส



รูปที่ 1 วัฏจักรสเตอร์ลิง

(ก) P-V และ T-S diagrams.

- (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกสูบในวัฏจักร
- (ค) Time-displacement diagram.

การทำงานของวัฏจักรสเตอร์ลิงเริ่มจากกำหนดให้ลูกสูบที่อยู่ในส่วนปริมาตรขยายอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบนและลูกสูบที่อยู่ในส่วนปริมาตรอัดอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายล่าง ในช่วงนี้จะมีปริมาตรมากที่สุดดังนั้นความดันและอุณหภูมิจะมีค่าน้อยที่สุด ดังรูป (1) บนแผนภาพ P-V และ T-S จากรูป 1 ในช่วงระหว่างการขบวนการอัด (1-2) ลูกสูบในส่วนปริมาตรอัดจะค่อยๆเคลื่อนที่มาอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบนส่วนลูกสูบในส่วนปริมาตรขยายอยู่นิ่ง สารทำงานจะถูกอัดในส่วนปริมาตรอัดทำให้ความดันเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิจะคงที่เพราะมีการคายความร้อนจากปริมาตรอัดมาายังสิ่งแวดล้อม

ขบวนการ 2-3 ลูกสูบที่อยู่ในส่วนปริมาตรอัดและปริมาตรขยายจะเคลื่อนที่พร้อมๆกันโดยลูกสูบที่อยู่ในปริมาตรอัดจะเคลื่อนที่ไปยังรีเจเนอเรเตอร์ (ลูกสูบที่อยู่ในปริมาตรขยายจะเคลื่อนที่ไปออกจากรีเจเนอเรเตอร์) ทำให้ปริมาตรในขบวนการนี้คงที่ สารทำงานจะเคลื่อนที่จากส่วนปริมาตรอัดผ่านรีเจเนอเรเตอร์มายังส่วนปริมาตรขยาย ซึ่งเดิมมีอุณหภูมิต่ำจะค่อยๆกลายเป็นอุณหภูมิสูงโดยจะได้รับการถ่ายเทความร้อนจากรีเจเนอเรเตอร์ ขบวนการนี้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาตรคงที่และความดันเพิ่มขึ้น

ขบวนการ 3-4 ลูกสูบที่อยู่ในปริมาตรขยายค่อยๆเคลื่อนที่ออกจากรีเจเนอเรเตอร์มายังศูนย์ตายล่าง ขณะที่ลูกสูบในส่วนอัดอยู่ที่ศูนย์ตายบน (ติดกับรีเจเนอเรเตอร์) ขบวนการนี้ความดันลดลง ขณะที่ปริมาตรสูงขึ้น อุณหภูมิมีค่าคงที่เพราะมีการได้รับความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนภายนอก

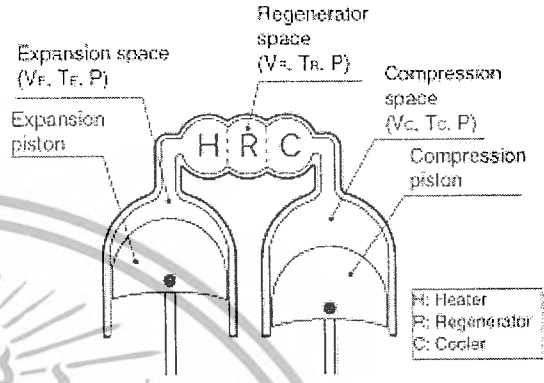
ขบวนการ 4-1 ในระหว่างที่ลูกสูบทั้งสองกำลังเคลื่อนที่กลับพร้อมๆกัน สารทำงานจะเคลื่อนที่ผ่านรีเจเนอเรเตอร์ (ปริมาตรคงที่) ความร้อนจะถูกถ่ายเทจกสารทำงานสู่รีเจเนอเรเตอร์ ทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิลดลงจนอุณหภูมิต่ำสุด ( $T_{min}$ ) ความร้อนที่ถูกถ่ายเทสู่รีเจเนอเรเตอร์นั้นจะถูกใช้ในขบวนการที่ 2-3 เพื่อถ่ายเทความร้อนสู่สารทำงานอีกครั้ง

การเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลังและดิสเพลสเซอร์ต้องมีการเคลื่อนที่ต่างกัน โดยระยะชักของดิสเพลสเซอร์ต้องนำหน้าลูกสูบกำลังประมาณ 90 องศา เพื่อทำหน้าที่ในการถ่ายเทสารทำงานจากกระบอกสูบหนึ่งไปอีกกระบอกสูบหนึ่ง หน้าทีของลูกสูบกำลังคือ การเปลี่ยน การขยายตัวของสารทำงานที่ความดันสูง และการอัดตัวที่อุณหภูมิต่ำไปสู่การเคลื่อนที่โดยผ่านเพลลาข้อเหวี่ยงและล้อช่วยแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

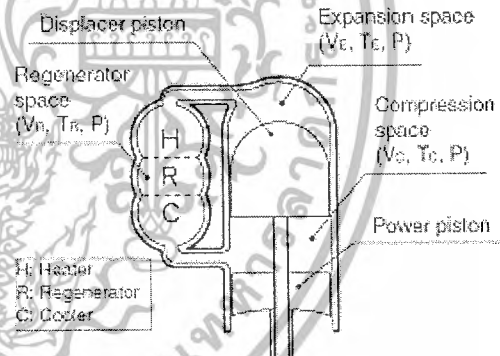
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [3] คือ

1. แอลฟา มีลักษณะคือ มีลูกสูบร้อนและลูกสูบเย็นแยกกระบอกสูบกัน โดยจะเคลื่อนที่ในลักษณะที่ทำให้ปริมาตรในระบบคงที่ เมื่อแก๊สทั้งหมดถูกดันให้มาอยู่ในกระบอกสูบเดียว ลูกสูบจะหยุด ส่วนอีกลูกสูบจะเคลื่อนที่อัดหรือขยายแก๊ส



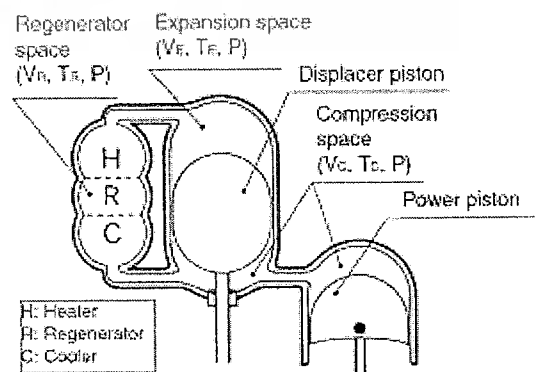
รูปที่ 3 ลักษณะของเครื่องยนต์แบบแกมมา

2. เบต้า มีลักษณะคือ ดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังอยู่ในกระบอกสูบเดียวกัน ดิสเพลสเซอร์จะดันแก๊สให้ผ่านฮีทเตอร์ รีจเนอเรเตอร์ และ คูลเลอร์



รูปที่ 4 ลักษณะของเครื่องยนต์แบบแอลฟา

3. แกมมา มีลักษณะคือ ดิสเพลสเซอร์และลูกสูบกำลังจะแยกกันคนละกระบอกสูบ และถูกเชื่อมต่อกัน มีหลักการทำงานคล้ายแบบแกมมา



รูปที่ 5 ลักษณะของเครื่องยนต์แบบเบต้า

### 3. การออกแบบส่วนประกอบเครื่องยนต์

โครงการนี้ออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา ซึ่งเครื่องยนต์ความร้อนชนิดนี้จะมีกระบอกสูบของลูกสูบกำลังและดิสเพลสเซอร์อยู่แยกกัน ของเหลวทำงานในที่นี้จะใช้อากาศ ใช้การวิเคราะห์และออกแบบอันดับที่ศูนย์ คือ วิเคราะห์โดยการประมาณค่าจากสมการการออกแบบเบื้องต้นของ Beale [4] ในการคำนวณหาขนาดชิ้นส่วนต่างๆ

$$P_{beale} = 0.015 p_{mean} f V_p \quad (1)$$

#### 3.1.1 การออกแบบขนาดกระบอกสูบลูกสูบกำลังและระยะชัก

$$V_p = A_p \times S_p$$

$$S_p = \frac{1}{2} D_p \quad (2)$$

$$V_p = \frac{\pi D_p^2}{4} \times \frac{D_p}{2}$$

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{8V_p}{\pi}} \quad (3)$$

#### 3.1.2 การออกแบบขนาดกระบอกสูบดิสเพลสเซอร์และระยะชัก

$$V_d = 6V_p \quad (4)$$

$$V_d = A_d \times S_d$$

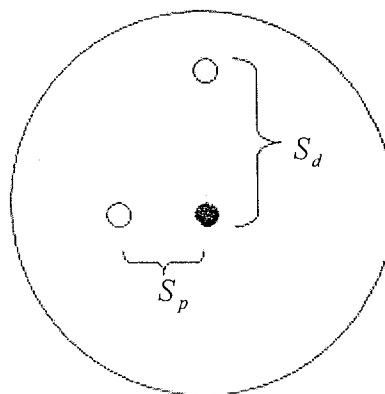
$$S_d = \frac{1}{2} D_d \quad (5)$$

$$V_d = \frac{\pi D_d^2}{4} \times \frac{D_d}{2}$$

$$D_d = \sqrt[3]{\frac{8V_d}{\pi}} \quad (6)$$

#### 3.1.3 การออกแบบล้อช่วยแรง

ล้อช่วยแรง ติดตั้งเกาะอยู่กับแกนข้างหนึ่งของเพลลาข้อเหวี่ยง (Crank shaft) ซึ่งอยู่ด้านส่วนบนของเครื่องยนต์ เนื่องจากล้อช่วยแรง ทำจากเหล็ก และหนักพอสมควร เพื่อช่วยให้การหมุนของเพลลาข้อเหวี่ยง บริเวณด้านหน้าของล้อช่วยแรงนี้เอง จะเป็นจุดเชื่อมต่อของระบบส่งกำลัง



รูปที่ 6 ลักษณะของล้อช่วยแรง

#### 3.1.4 การออกแบบเพลลาข้อเหวี่ยง

การออกแบบเพลลาข้อเหวี่ยงนั้นต้องคำนึงถึงมุมระหว่าง การเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลังและลูกสูบดิสเพลสเซอร์ในหนึ่งรอบ โดยต้องเคลื่อนที่ต่างกัน 90 องศา และอีกสิ่งหนึ่งก็คือระยะชักของ ลูกสูบกำลังและดิสเพลสเซอร์

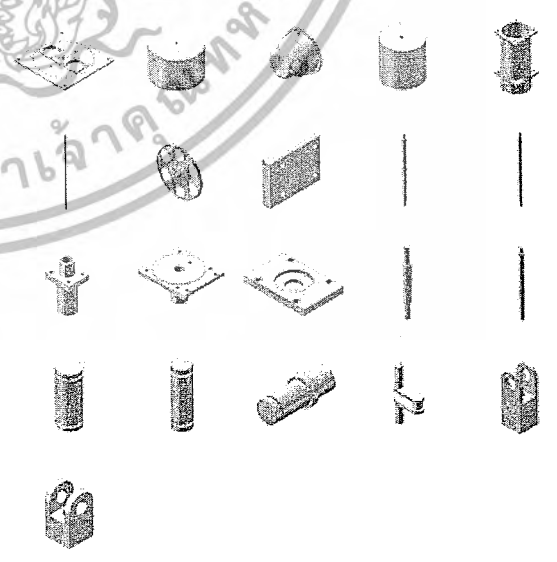
#### 3.1.5 การออกแบบก้านสูบ

ความยาวของก้านสูบทั้งลูกสูบกำลังและดิสเพลสเซอร์นั้น จะต้องออกแบบให้มีขนาดไม่น้อยกว่าสองเท่าของระยะชัก

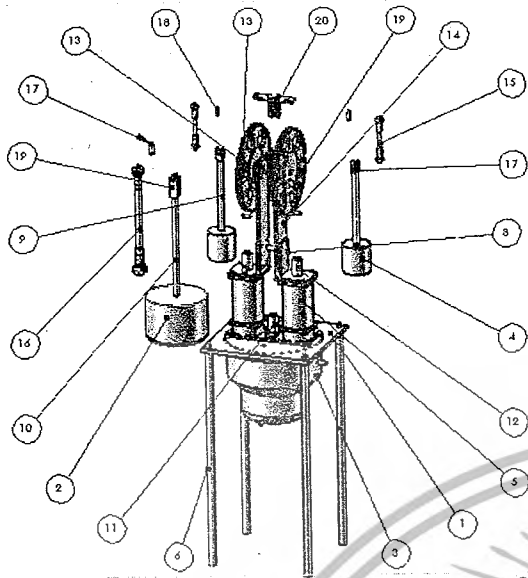
$$L_p \geq 2S_p \quad (7)$$

$$L_d \geq 2S_d \quad (8)$$

หลังจากที่ได้คำนวณค่าต่างๆของส่วนประกอบในทาง ทฤษฎีแล้ว จะทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมในการออกแบบทาง วิศวกรรม ในการออกแบบโครงสร้างชิ้นงาน ก่อนที่จะทำการสร้าง ชิ้นงานจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



No.	Part Name	Quantity	No.	Part Name	Quantity
1	Male glaze	1	13	Winding bearing	2
2	Displacer	1	14	Winding glaze supporting	2
3	Displacer cylinder	1	15	Connecting rod power glaze	1
4	Power glaze	2	16	Connecting rod displacer	2
5	Power cylinder	2	17	Displacer glaze pin	1
6	Supporting leg	2	18	Power glaze pin	2
7	Hydraulic	2	19	Hydraulic pin	2
8	Cylinder head glaze supporting	2	20	Hydraulic pin	1
9	Power glaze rod	2	21	Crack displacer rod	1
10	Displacer rod	1	22	Crack power glaze rod	2
11	Displacer glaze cylinder head	1	23	rod end	2
12	Cylinder head	2			



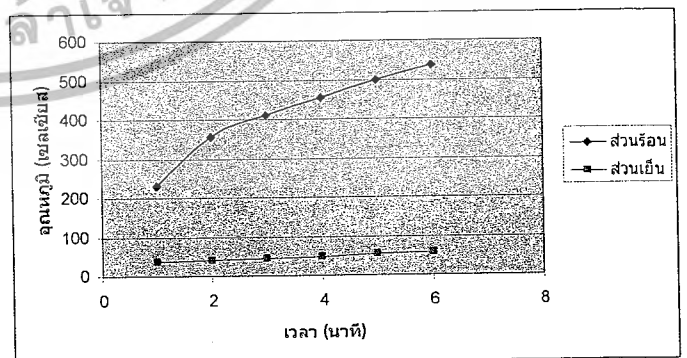
รูปที่ 8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่ออกแบบขึ้น

รูปที่ 7 ชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของการออกแบบเบื้องต้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

4.วิธีการทดสอบเครื่องยนต์

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบแกมมาที่ออกแบบนี้จะใช้เตาแก๊สมาเป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์ที่บริเวณกระบอกดีเซลเซอร์ส่วนร้อน จากนั้นทำการจับเวลาและวัดอุณหภูมิที่บริเวณส่วนร้อนและส่วนเย็น รอกจนความร้อนที่บริเวณส่วนร้อนมีค่าสูงพอที่จะทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ แล้วจึงวัดความเร็วรอบและวัดความดันภายในระบบ นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟ ดังรูป

อุณหภูมิแหล่งความร้อน $T_H$	773 K
อุณหภูมิล้อเย็น $T_L$	338 K
มุมที่ปริมาตรขยายนำปริมาตรอัด $\theta$	90°
ความดันเฉลี่ยของแก๊สทำงาน $P_{mean}$	1 bar
รอบของเครื่องยนต์ $f$	1 Hz.
ระยะชักของลูกสูบกำลัง $S_p$	48 mm.
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ	97.5 mm.
ลูกสูบกำลัง $D_p$	
ระยะชักของดีเซลเซอร์ $S_d$	110 mm.
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกดีเซลเซอร์ $D_d$	226 mm.
อัตราส่วนการอัดเชิงปริมาตร	6
สารทำงาน	อากาศ



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของส่วนร้อน อุณหภูมิส่วนเย็นกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบพบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาที่สร้างขึ้นตามทฤษฎีการออกแบบนั้นสามารถทำงานได้ เมื่อมีอุณหภูมิเริ่มต้นของส่วนร้อนประมาณ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะทราบถึงกำลังเบื้องต้นของเครื่องยนต์ จึงได้เสนอแนวทางการทดลองคือ ทำการทดลองดั่งที่กล่าวมาแล้ววัดแรงบิดจะทำให้สามารถวัดกำลังเบื้องต้นของเครื่องยนต์ได้

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมาโดยอาศัยทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง แล้วทำการทดสอบเครื่องยนต์นั้นเครื่องยนต์สามารถทำงานได้โดยเครื่องยนต์จะเริ่มทำงานเมื่อมีอุณหภูมิส่วนร้อน 534.82 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิส่วนเย็น 51.6 องศาเซลเซียส ความดันสูงสุดภายในเครื่องยนต์ 0.15 บาร์ และความเร็วรอบสูงสุด 53 รอบต่อนาที แต่อย่างไรก็ดีได้ค้นพบปัญหาต่างๆ จึงได้เสนอแนวทางในการวิเคราะห์และวิธีแก้ไขดังนี้

5.1 วัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นส่วนอาจมีน้ำหนักมากเกินไป เหตุเพราะวัสดุบางชิ้นส่วนนั้นมีราคาสูงเป็นการเพิ่มต้นทุนในการสร้าง จึงได้นำวัสดุที่มีอยู่แล้วมาใช้แทนเป็นการลดต้นทุน อย่างเช่นเหล็กที่นำมาใช้ทำก้านสูบนั้นเป็นวัสดุที่มีอยู่แล้วซึ่งมีน้ำหนักสูง ขอเสนอให้ใช้อลูมิเนียมซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าและมีความแข็งแรงมากพอสำหรับเครื่องยนต์ที่ออกแบบ

5.2 ความดันภายในเครื่องยนต์ต่ำเกินไปทำให้กลไกภายในไม่สามารถทำงานได้อย่างราบรื่น เหตุเพราะเนื่องจากความร้อนที่อ่อนให้เครื่องยนต์ไม่เพียงพอและไม่เสถียรที่จะทำให้อากาศขยายตัวและเกิดความดันสูงเพื่อจะดันลูกสูบกำลังให้เคลื่อนที่ขึ้นวิธีการแก้ไข คือ ต้องหาแหล่งพลังงานความร้อนที่สูงกว่าเดิมและเสถียร เพราะถ้ามีการให้ความร้อนที่สูงและเสถียรจะทำให้เครื่องยนต์ทำงานดียิ่งขึ้น

5.3 ส่วนรีเจนเนอเรเตอร์นั้นแลกเปลี่ยนความร้อนได้ไม่ดี โดยอากาศที่ถูกทำให้ร้อน เมื่อเคลื่อนที่มายังบริเวณส่วนเย็นไม่สามารถคายความร้อนให้กับส่วนรีเจนเนอเรเตอร์ได้มากพอจึงทำให้อากาศเย็นตัวลงไม่ทัน กำลังของเครื่องยนต์ที่ได้จะน้อยวิธีการแก้ไข คือ

5.3.1 พัฒนาการระบายความร้อนในส่วนเย็นโดยการติดฉนวน หรือ การใช้น้ำมาหล่อเย็น และพัฒนาส่วนรีเจนเนอเรเตอร์มีปริมาตรหนึ่งลดลง เพราะปริมาตรหนึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง

5.3.2 เลือกใช้วัสดุที่มีความจุความร้อนที่สูง การนำความร้อนต่ำ

5.4 สารทำงานที่ใช้อยู่เป็นอากาศซึ่งหาง่ายและทำงานได้ในระดับปานกลาง การพัฒนานั้นสามารถเลือกใช้ไฮโดรเจนหรือ

ฮีเลียม เพราะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดีขึ้นแต่ทั้งสองมีราคาสูง

5.5 การสูญเสียพลังงานในเครื่องยนต์ พลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์จริงจะได้ค่าน้อยกว่าตามทฤษฎีที่ออกแบบ จึงควรระมัดระวังในเรื่องของการรั่วไหลของอากาศ ซึ่งปัญหานี้เป็นปัญหาที่สำคัญมากสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทุกประเภท จึงควรมีการออกแบบให้ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นที่ประกบกันมีระยะช่องว่าง ให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศหรืออาจใช้ประเก็นช่วยในการกันระหว่างการประกอบชิ้นส่วนสองชิ้นต่อกัน แต่ประสิทธิภาพอาจไม่ดีนัก ทางที่ดีควรออกแบบให้ชิ้นส่วนสวมกันได้พอดีหรือเป็นสลักเกลียวในและเกลียวนอก

### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine)
- [2] พงศ์สินธุ์ ธนวัฒน์เสวี, ดุลยโชติ ชลศึกษ์. การศึกษาการคำนวณกำลังบ่งชี้จากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบเบต้ากระบอกสูบเดี่ยว, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
- [3] <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/schmidt/schmidt.htm>
- [4] G.Walker, STIRLING ENGINE, Oxford University Press, New York, 1980

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้