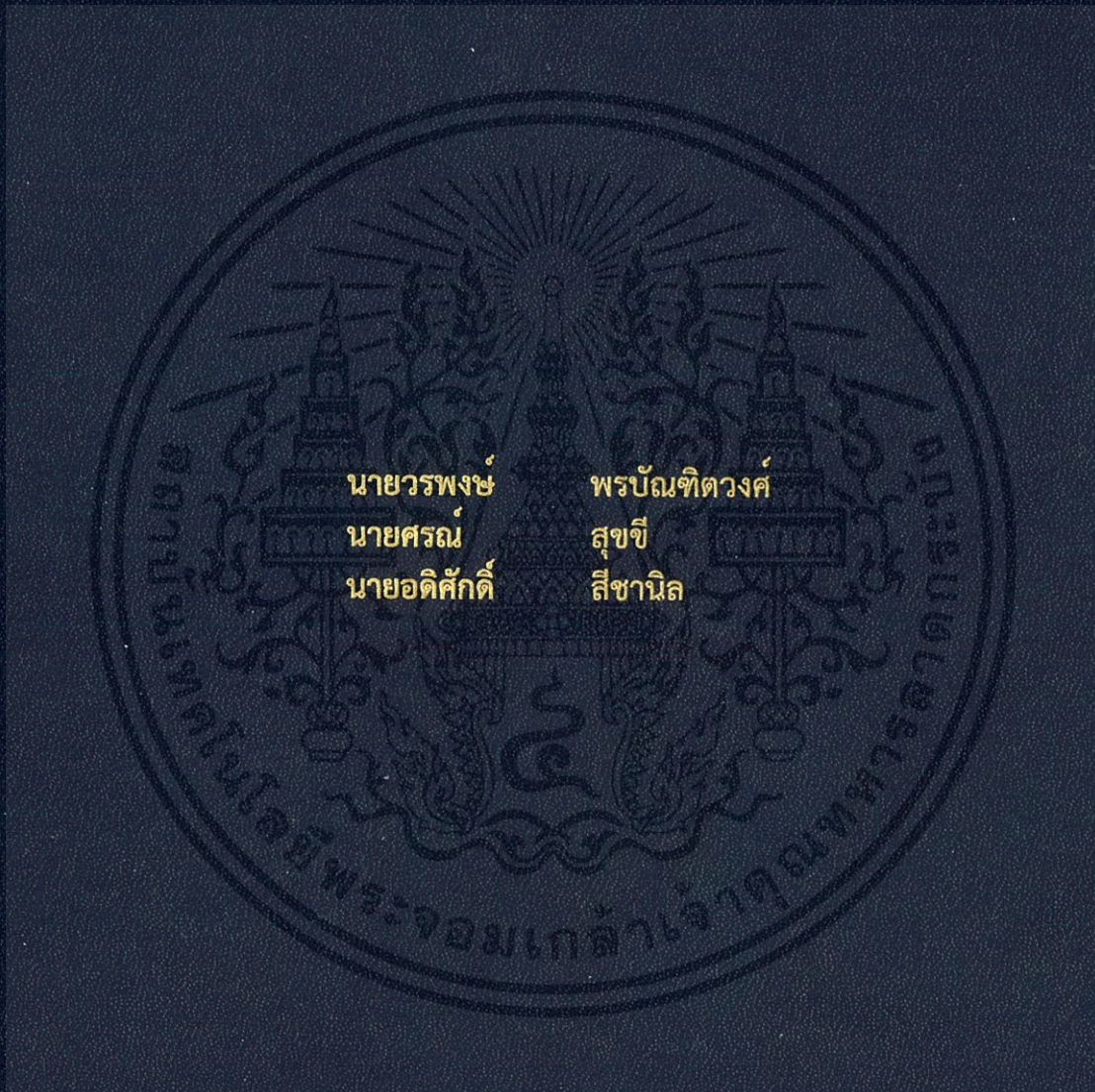


การวิเคราะห์ออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตกำลังสองทิศทางสี่สูบ  
ด้วยกลไกดัดแปลงรอสส์โยค

Design Analysis and Test of Modified Ross Yoke Mechanism Driving a Double-  
Acting Stirling Engine



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การวิเคราะห์ออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตกำลังสองทิศทางสี่สูบ  
ด้วยกลไกดัดแปลงรอสโยค

Design Analysis and Test of Modified Ross Yoke Mechanism Driving a Double-  
Acting Stirling Engine



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design Analysis and Test of Modified Ross Yoke Mechanism Driving a Double-Acting Stirling Engine



Vorapong Pornbunditwong  
Sorn Sukkee  
Adisak Sichanin

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์ออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตกำลังสองทิศทางที่ขับเคลื่อนด้วยกลไก  
ดัดแปลงรอสโยค

Design Analysis and Test of Modified Ross Yoke Mechanism Driving a Double-  
Acting Stirling Engine

ผู้จัดทำ

1. นาย วรพงษ์ พรบัณฑิตวงศ์ รหัสประจำตัว 56011057
2. นาย ศรณ สุขชี รหัสประจำตัว 56011173
3. นาย อติศักดิ์ สีชานิล รหัสประจำตัว 56011390



อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ออกแบบและทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตกำลังสองทิศทางที่สูบลูกสูบด้วยกลไกดัดแปลงรอสโยค

นายวรพงษ์ พรบัณฑิตวงศ์ 56011057

นายศรณ สุขชี 56011173

นายอดิศักดิ์ สีชานิล 56011390

ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2559

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาไกลการผลิตกำลังสองทาง (Modified an Alpha-Type Double-Acting Stirling Engine) ซึ่งมีลูกสูบ 4 ลูกสูบ ใช้อากาศเป็นสารทำงาน โดยการทำงานของเครื่องยนต์เกิดจากการขยายและหดตัวของสารทำงาน ขับให้ลูกสูบเคลื่อนที่ผลิตกำลัง ส่งต่อกำลังให้กับกลไกรอสส์ยอร์กซึ่งจะทำการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ขึ้น - ลงของกระบอกสูบให้กลายเป็นการหมุนสำหรับเพลาค้อเหวี่ยง มีการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้ครีบอกสู่อากาศ โดยที่ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบชิ้นส่วนรับความร้อนและชิ้นส่วนระบายความร้อนเพื่อที่จะรับปริมาณความร้อนได้มากและระบายความร้อนได้ดีส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สูงขึ้น โดยมีการออกแบบให้มีการกันรั่วไหลของอากาศโดยใช้โอริงซิล และออกแบบกลไกการส่งผ่านแรงให้มีประสิทธิภาพ โดยใช้กลไกดัดแปลงรอสโยค ขอบเขตอุณหภูมิของกระบอกสูบด้านร้อนเท่ากับ 650 องศาเซลเซียสและ 65 องศาเซลเซียสของกระบอกสูบด้านเย็น โดยเครื่องยนต์มีกำลังการผลิตทางทฤษฎีเท่ากับ 15W โดยมีประสิทธิภาพของเบลล์นัมเบอร์เท่ากับ 4 และจะเป็นเครื่องยนต์ต้นแบบสำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต

DESIGN ANALYSIS AND TEST OF MODIFIED ROSS YOKE MECHANISM DRIVING A-CYLINDER  
DOUBLE-ACTING STIRLING ENGINE

Vorapong Pornbunditwong 56011057

Sorn Sukkee 56011173

Adisak Sichanin 56011390

Asst.Prof.Dr. Sutapat Kwankaomeng Advisor

Year 2016

ABSTRACT

This project is designing and making a 4-cylinder double-acting Stirling engine which has 4 cylinders. Air is used as the working fluid. The engine is powered by air expansion and compression with Ross Yoke mechanism which is converted linear motion of piston to rotational motion of crankshaft. The engine in this project has annular fin cooler that cooled by air. In this project, we have designed a heater and also a cooler to receive much heat and, at the same time, ventilate much heat in order to enhance the engine performance. Furthermore, we have designed protection of the air leakage by using O-ring seals and a robust transmission mechanism by using a modified Ross Yoke mechanism. The temperature range of the hot cylinder is 650 degrees Celsius and 65 degrees Celsius of the cooler cylinder. The engine has theoretical horsepower of 15W and will be a prototype engine for future study and development.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่างๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้อิมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณพี่อู๋ม พงษ์นรินทร์ สว่างวงศ์ และพี่ทิม วริษฐ์ เชนย์วิบูลย์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ ในการทำโครงการนี้

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



นายวรพงษ์ พรบัณฑิตวงศ์  
นายศรณัฐ สุขชี  
นายอดิศักดิ์ สีขานิล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ.....	3
2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	4
2.2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา.....	4
2.2.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟากระบอกสูบทางเดียว.....	5
2.2.1.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟากระบอกสูบสองทาง.....	5
2.2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า.....	5
2.2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา.....	6
2.3 การวิเคราะห์ตำแหน่งของกลไกโรสโยค.....	6
2.4 ทฤษฎีชมิตท์.....	8
2.4.1 สมมติฐานของชมิตท์.....	8
2.4.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา.....	9
2.4.3 งานบ่งชี้ กำลังและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์และการออกแบบเครื่องยนต์.....	13
3.1 ผลวิเคราะห์กำลังและประสิทธิภาพเครื่องยนต์.....	13
3.1.1 วิเคราะห์กำลังของเครื่องยนต์ด้วยทฤษฎีของเบลล์.....	13
3.1.2 วิเคราะห์กำลังด้วยทฤษฎีซิมิตท์.....	15
3.1.3 สรุป.....	16
3.2 ผลการวิเคราะห์กลไกโรสโยค.....	17
3.2.1 วิเคราะห์ระยะชักของเครื่องยนต์.....	18
3.2.2 วิเคราะห์ปริมาตรกวาดของเครื่องยนต์.....	19
3.2.3 สรุป.....	19
3.3 การออกแบบชิ้นส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน.....	20
3.3.1 ส่วนรับความร้อน.....	20
3.3.2 ครีประบายความร้อน.....	26
3.3.3 สรุป.....	29
บทที่ 4 ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์และการทดลอง.....	30
4.1 ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์.....	30
4.1.1 ระบายสูบรับความร้อน.....	30
4.1.2 ครีประบายความร้อน.....	31
4.1.3 ลูกสูบ.....	31
4.1.4 ชุดเพลลาและข้อต่อรวม.....	32
4.1.5 เพลลาข้อเหวี่ยง.....	32
4.1.6 ก้านสูบ.....	33
4.1.7 แผ่นเพลท.....	34
4.1.8 ส่วนเสริมก้านสูบ.....	34
4.1.9 โรสโยค.....	35
4.1.10 ลิงค์เกอร์.....	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.11 ฐานเครื่อง.....	36
4.1.12 ล้อช่วยแรง.....	37
4.1.13 รวมชิ้นส่วน.....	37
4.2 ชุดซีลกันรั่ว.....	38
4.2.1 ชุดโอริงซีลยางระหว่างชิ้นส่วนประกบกัน.....	38
4.2.2 ชุดโอริงซีลลูกสูบ(ptfe).....	38
4.2.3 ยูคัพ.....	39
4.3 ชุดทดสอบเครื่องยนต์.....	39
4.3.1 ถังก๊าซ LPG.....	39
4.3.2 หัวเผาก๊าซ.....	40
4.3.3 ฉนวนครอบหัวเผา.....	40
4.3.4 เครื่องวัดอัตราการไหล ( Flow meter ).....	41
4.3.5 อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ ( Infrared thermometer ).....	41
4.3 วิธีการทดลอง.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะจากการทดลอง.....	44
เอกสารอ้างอิง.....	45

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์.....	13
3.2 งาน กำลัง และประสิทธิภาพที่ได้จากวัฏจักร.....	16
3.3 งาน กำลัง และประสิทธิภาพ ที่ได้จากปีลล์และซิมิตท์.....	17
3.4 รายละเอียดของส่วนรับความร้อน.....	20
3.5 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 658 K.....	21
3.6 ขนาดของครีบบระบายความร้อน.....	26
5.1 ค่าที่ได้จากวัฏจักร Schmidt.....	43



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อน .....	3
2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิงของเครื่องยนต์แอลฟา .....	3
2.3 แผนภาพ P-v และ T-s ของวัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ.....	4
2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟากระบอกสูบทางเดียว .....	5
2.5 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟากระบอกสูบสองทาง.....	5
2.6 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า .....	6
2.7 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา.....	6
2.8 กลไกรอสโยค .....	7
2.9 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา.....	9
3.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Beale Number และ Heater Temperature .....	13
3.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและมุมข้อเหวี่ยง.....	15
3.3 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและมุมข้อเหวี่ยง .....	15
3.4 แผนภาพ P-V.....	16
3.5 แสดงขนาดของ triangle yoke.....	17
3.6 กราฟแสดงตำแหน่งของโยค (yoke) ณ มุมข้อเหวี่ยงใดๆของทั้งสี่กระบอกสูบ .....	18
3.7 กราฟแสดงปริมาตร ณ มุมข้อเหวี่ยงใดๆของทั้งสี่กระบอกสูบ.....	19
3.8 ส่วนรับความร้อน.....	20
3.9 แสดง hydraulic diameter ของ annular tube .....	23
3.10 ตารางแสดงค่า Nusselt Number สำหรับการไหลแบบ Laminar ในท่อ Annulus .....	24
3.11 แผนภาพแสดงวงจรรความร้อนของส่วนหัวรับความร้อน .....	24
3.12 ครีประบายความร้อน .....	26
3.13 ภาพตัดแสดงขนาดครีประบายความร้อน.....	26
3.14 แผนภาพแสดงประสิทธิภาพของครีประบายความร้อนแบบ circular .....	27
3.15 แผนภาพแสดงการระบายความร้อนของครี.....	28
4.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตกำลังสองทิศทางสี่สูบด้วยกลไกดัดแปลงรอสโยค .....	30
4.2 กระบอกสูบรับความร้อน .....	30

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ส่วนระบายความร้อน.....	31
4.4 ลูกสูบ.....	31
4.5 ชุดเพลลาและข้อต่อรวม.....	32
4.6ก. เพลลาข้อเหวี่ยงส่วนติดกับล้อช่วยแรง.....	32
4.6ข. เพลลาข้อเหวี่ยงส่วนติดกับข้อเหวี่ยง.....	32
4.6ค. เพลลาข้อเหวี่ยง.....	33
4.6ง. ข้อเหวี่ยงส่วนปลาย.....	33
4.7 ก้านสูบ.....	33
4.8 แผ่นเพลท.....	34
4.9 ส่วนเสริมก้านสูบ.....	34
4.9ข. ส่วนเสริมก้านสูบ(ขยายรูตรงกลางเพื่อใส่ยูคัพ).....	35
4.10ก. รอสโยคด้านหน้า.....	35
4.10ข. รอสโยคด้านหลัง.....	35
4.11 ลิงค์เกอร์.....	36
4.12 ฐานเครื่อง.....	36
4.13 ล้อช่วยแรง.....	37
4.14 รวมชิ้นส่วน.....	37
4.15 ชุดโอริงซีลระหว่างชิ้นส่วน.....	38
4.16 ชุดโอริงซีลลูกสูบ.....	38
4.17 ยูคัพ.....	39
4.18 ถังก๊าซ LPG และ วาล์วควบคุมความดันและอัตราการไหล.....	39
4.19 หัวเผาก๊าซ.....	40
4.20ก. ฉนวนครอบหัวเผาหมอบน.....	40
4.20ข. ฉนวนครอบหัวเผาหมูข้าง.....	40
4.21 เครื่องวัดอัตราการไหล.....	41
4.22 อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์.....	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและมุมข้อเหวี่ยง.....	43
5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตร .....	43



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลังงานกำลังเป็นที่ต้องการอย่างมาก แต่เนื่องด้วยค่าใช้จ่ายที่สูงและปริมาณที่จำกัดของแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้เราต้องหาแหล่งพลังงานที่สามารถทดแทนหรือพัฒนาการใช้พลังงานดังกล่าวให้คุ้มค่าและมีประสิทธิภาพมากที่สุดอีกทั้งแหล่งสร้างพลังงานและเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นยังสร้างมลพิษให้สิ่งแวดล้อม

โดยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงถือเป็นเครื่องยนต์สะอาด มีความหลากหลายของแหล่งเชื้อเพลิง เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ หรือพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่มากมายในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม หรือพลังงานความร้อนเหลือใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ฯลฯ ด้วยเหตุผลดังกล่าว เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจึงถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำคัญในยุควิกฤติพลังงานดังเช่นในปัจจุบัน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกโดยใช้ของไหลทำงานในสถานะแก๊สภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน หลักการทำงานของเครื่องยนต์จะใช้ส่วนต่างของอุณหภูมิและการขยายหรือหดตัวของของไหลทำงานในการขับเคลื่อนลูกสูบ และมีกลไกในการสร้างกำลังต่อไป

เนื่องจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาให้กำลังมากกว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบอื่นๆ ผู้วิจัยจึงเลือกเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแอลฟาในการทำการวิจัย โดยการทำโครงการวิจัยนี้เป็นออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องยนต์ต้นแบบ เพื่อเป็นตัวอย่างศึกษาและแนวทางสำหรับผู้สนใจในการพัฒนาต่อไป

### 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 สร้างองค์ความรู้และประสบการณ์จากการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อการศึกษาและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในประเทศไทย

1.2.2 เครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง

1.2.3 ทดสอบและหาค่ากำลัง รวมทั้งหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์

1.2.4 เพื่อให้ได้เครื่องยนต์ที่มีกำลังสูงขึ้น โดยมีจำนวนสี่สูบ

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 การเคลื่อนของลูกสูบมีลักษณะเป็น simple harmonic

1.3.2 อุณหภูมิของ heat source เท่ากับ 650 องศาเซลเซียส

1.3.3 อุณหภูมิของ heat sink เท่ากับ 65 องศาเซลเซียส

1.3.4 ความเร็วรอบสูงสุดของเครื่องยนต์อยู่ที่ 600 รอบต่อนาที

- 1.3.5 อากาศมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะตามแบบก๊าซอุดมคติ
- 1.3.6 อุณหภูมิสภาพแวดล้อมเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส
- 1.3.7 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศภายนอกเท่ากับ 4 วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน
- 1.3.8 ระยะชักเท่ากับ 2 เซนติเมตร
- 1.3.9 ปริมาตรกวาดของแต่ละกระบอกเท่ากับ 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร

#### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 ศึกษาหลักการทำงานเบื้องต้นและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจากสื่อและสิ่งพิมพ์ต่างๆ รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

1.4.2 กำหนดและออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้โปรแกรม SolidWorks

1.4.3 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลไกเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ได้ทำการออกแบบ

1.4.4 ส่งแบบให้โรงกลึงทำการผลิตชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์

1.4.5 ประกอบเครื่องยนต์ รวมทั้งเตรียมเครื่องมือวัดในการทดลอง

1.4.6 ทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง

1.4.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.8 จัดทำข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงานการศึกษา

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สร้างองค์ความรู้และประสบการณ์จากการออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อการศึกษาและพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในประเทศไทย

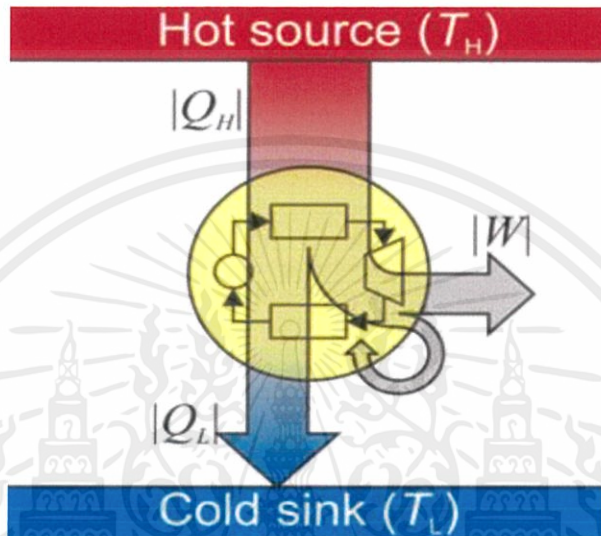
1.5.2 เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบโครงสร้างแอลฟากลไกการผลิตกำลังสองทางต่อไป

1.5.3 ส่งเสริมการใช้พลังงานเชื้อเพลิงทดแทน และลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล

## บทที่ 2

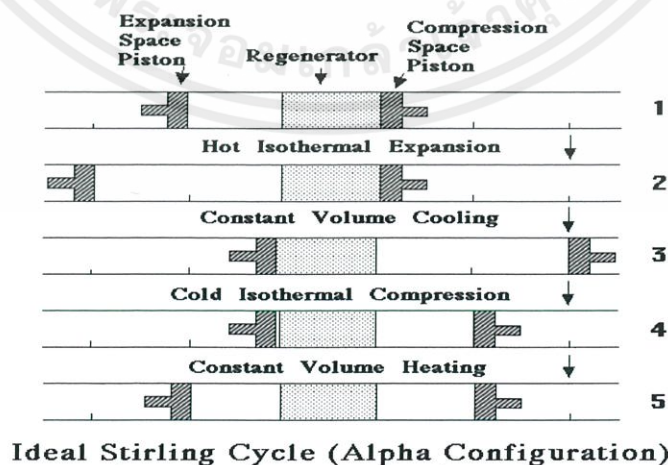
### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อน

วัฏจักรสเตอร์ลิงเป็นวัฏจักรเครื่องยนต์ความร้อนชนิดหนึ่ง ที่รับความร้อนจากแหล่งความร้อน (hot source) ที่มีอุณหภูมิสูง ( $T_H$ ) และระบายความร้อนออกสู่ cold sink ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ ( $T_L$ ) และจะได้งานหรือกำลังออกมา ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีประโยชน์ต่อการศึกษาว่าวัฏจักรสเตอร์ลิงทำงานอย่างไรในขั้นต้น

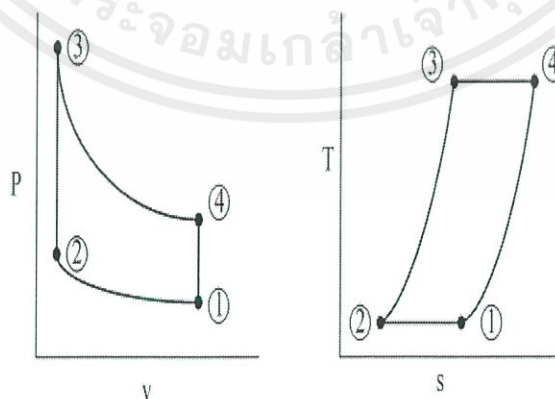


รูปที่ 2.2 วัฏจักรสเตอร์ลิงของเครื่องยนต์แอลฟา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา ประกอบด้วยพื้นที่ขยายตัว(Compression Space) พื้นที่อัดตัว(Expansion Space) รีเจนเรเตอร์ ลูกสูบขยาย (Expansion Piston) และลูกสูบอัด (Compression Piston) วัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติมีทั้งหมด 4 กระบวนการ ได้แก่

- 1) กระบวนการขยายตัวด้วยอุณหภูมิคงที่ (Hot Isothermal Expansion) หรือ จากตำแหน่ง 3-4 ใน P-v และ T-s diagram ดังรูปที่ 2.3 ลูกสูบอัดอยู่กับที่ ณ ตำแหน่งในสุดที่ติดกับรีเจนเรเตอร์ (สารทำงานถ่ายเทไปฝั่งพื้นที่ขยายตัวหมด) สารทำงานขยายตัวผลักลูกสูบขยายเคลื่อนที่จากตำแหน่งกลางไปสู่ตำแหน่งนอกสุด ดังรูปที่ 2.2
- 2) กระบวนการเย็นตัวด้วยปริมาตรคงที่ (Constant Volume Cooling) หรือ จากตำแหน่ง 4-1 ใน P-v และ T-s diagram ดังรูปที่ 2.3 ลูกสูบขยายกำลังเคลื่อนที่จากตำแหน่งนอกสุดไปสู่ตำแหน่งในสุด (สารทำงานเริ่มถ่ายเทไปฝั่งพื้นที่อัดตัว) สารทำงานไหลผ่าน ถ่ายเทความร้อนเข้าสู่รีเจนเรเตอร์ และความร้อนดังกล่าวจะถูกเก็บสะสมไว้ในรีเจนเรเตอร์ ในขณะที่ลูกสูบอัดกำลังเคลื่อนที่จากตำแหน่งในสุดไปสู่ตำแหน่งนอกสุด ดังรูปที่ 2.2
- 3) กระบวนการอัดตัวด้วยอุณหภูมิคงที่ (Cold Isothermal Compression) หรือ จากตำแหน่ง 1-2 ใน P-v และ T-s diagram ดังรูปที่ 2.3 ลูกสูบขยายอยู่กับที่ ณ ตำแหน่งในสุด (สารทำงานถ่ายเทไปฝั่งพื้นที่อัดตัวหมด) ลูกสูบอัดเคลื่อนที่จากตำแหน่งนอกสุดไปสู่ตำแหน่งกลาง ดังรูปที่ 2.2
- 4) กระบวนการเย็นตัวด้วยปริมาตรคงที่ (Constant Volume Heating) หรือ จากตำแหน่ง 2-3 ใน P-v และ T-s diagram ดังรูปที่ 2.3 ลูกสูบอัดกำลังเคลื่อนที่จากตำแหน่งกลางไปสู่ตำแหน่งในสุด (สารทำงานเริ่มถ่ายเทไปฝั่งพื้นที่ขยายตัว) สารทำงานไหลผ่าน รับความร้อนจากรีเจนเรเตอร์ ซึ่งถูกสะสมไว้ในกระบวนการที่ 2 (Constant Volume Cooling) ในขณะที่ลูกสูบอัดกำลังเคลื่อนที่จากตำแหน่งในสุดไปสู่ตำแหน่งกลาง ดังรูปที่ 2.2



Pressure – Volume and Temperature – Enthalpy charts for ideal working fluid

รูปที่ 2.3 แผนภาพ P-v และ T-s ของวัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

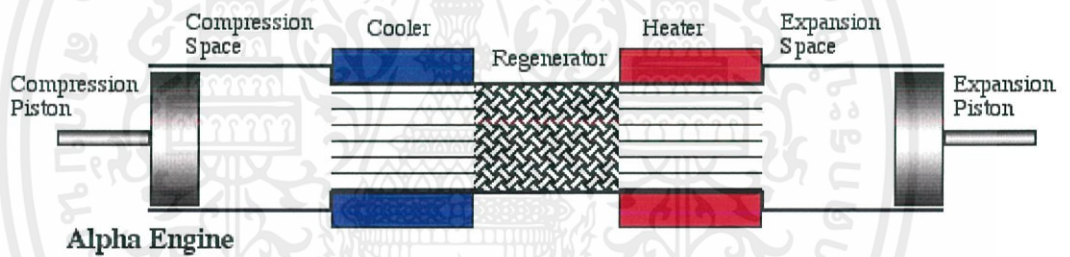
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถจำแนกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ แอลฟา (Alpha), เบต้า (Beta) และ แกมมา (Gamma)

### 2.2.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟาสามารถจำแนกได้อีก 2 ชนิด ได้แก่ กระบอกสูบทางเดียว (Single Acting Cylinder) และ กระบอกสูบสองทาง (Double Acting Cylinder)

#### 2.2.1.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟากระบอกสูบทางเดียว

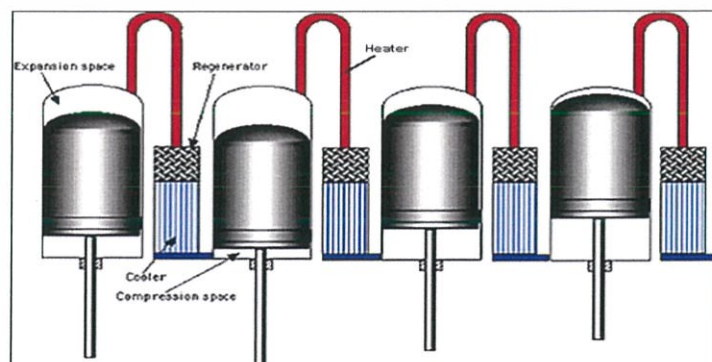
เป็นเครื่องยนต์ที่ประกอบด้วยลูกสูบ 2 ตัว ได้แก่ ลูกสูบขยาย (Expansion Piston) และ ลูกสูบอัด (Compression Piston) ถูกสวมอยู่ในกระบอกสูบร้อน (Hot Cylinder) และ กระบอกสูบเย็น (Cold Cylinder) ตามลำดับ โดยมีครีบบระบายความร้อน (Cooler) รีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) และ ส่วนที่รับความร้อน (Heater) ต่อกันแบบอนุกรมเชื่อมกันระหว่างกระบอกสูบ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟากระบอกสูบทางเดียว

#### 2.2.1.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟากระบอกสูบสองทาง

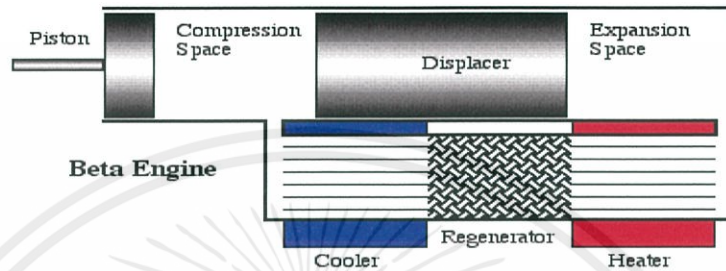
เครื่องยนต์ชนิดดังกล่าวจะต่างจากเครื่องยนต์ชนิดแอลฟากระบอกสูบทางเดียวตรงที่ พื้นที่ขยายตัว (Expansion Space) และ พื้นที่อัดตัว (Compression Space) อยู่ภายในกระบอกสูบเดียวกัน สารทำงาน (Working Fluid) จะถูกทำให้ร้อนและขยายตัว ไหลจากพื้นที่ขยายตัว ไปยังพื้นที่อัดตัว ซึ่งอยู่คนละกระบอกสูบและถูกทำให้เย็นลง ดังรูปที่ 2.5



## รูปที่ 2.5 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟากระบอกสูบสองทาง

### 2.2.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า

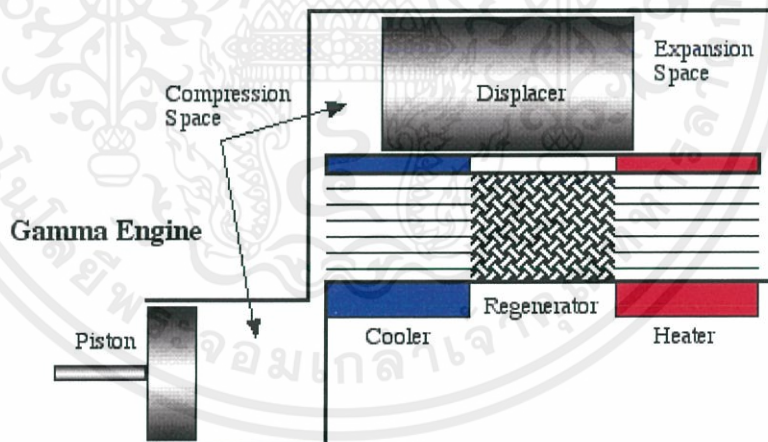
มีลูกสูบ (Piston) และ ลูกสูบไล่ (Displacer) อย่างละ 1 ตัว พื้นที่ขยายตัวและพื้นที่อัดตัวอยู่ภายในกระบอกสูบเดียวกัน ลูกสูบไล่จะทำหน้าที่ไล่สารทำงานระหว่างพื้นที่ขยายตัว กับพื้นที่อัดตัว เพื่อรับความร้อนและระบายความร้อน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดเบต้า

### 2.2.3 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

เครื่องยนต์ชนิดนี้มีองค์ประกอบคล้ายๆกับเครื่องยนต์ชนิดเบต้า แต่จะต่างที่ลูกสูบจะอยู่คนละกระบอกสูบกับลูกสูบไล่ ดังรูปที่ 2.7

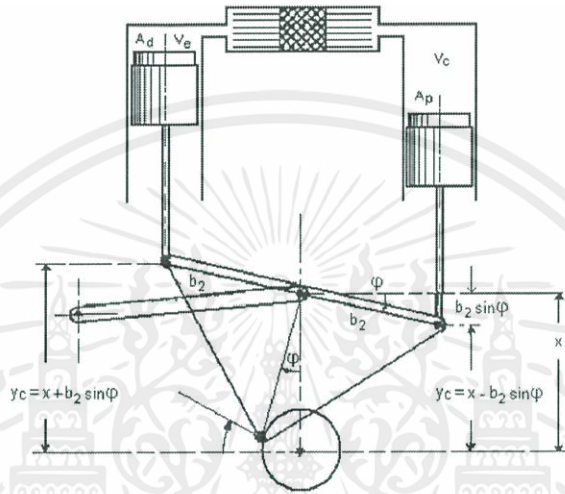


รูปที่ 2.7 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแกมมา

## 2.3 การวิเคราะห์ตำแหน่งของกลไกโรสโยค

กลไกโรสโยคถูกคิดค้นขึ้นโดย Andy Ross[6] และมีความแตกต่างจากกลไก slider crank ที่ก้านชัก (Connecting Rod) จะเคลื่อนที่ขึ้น-ลงเป็นแนวเส้นตรง ดังนั้นจึงไม่มีแรงด้านข้าง (Side Force) กระทำกับลูกสูบ

กลไกโรสโยคประกอบด้วย triangular yoke สวมอยู่บน crank pin และนำโดย rocking lever การผสมผสานระหว่างการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของ crank pin และการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งของ rocking lever ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เกือบจะเป็นแนวเส้นตรงบนแขนทั้งสองข้างของ triangular yoke ข้อดีของกลไกนี้คือ 1) แรงด้านข้างที่กระทำกับลูกสูบน้อยมาก ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนาน และใช้น้ำมันในการลดแรงเสียดทานน้อยลง 2) ระยะห่างระหว่างกระบอกสูบสั้น ทำให้การติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำได้ง่าย 3) มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา



รูปที่ 2.8 กลไกโรสโยค

การวิเคราะห์ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของเครื่องยนต์กลไกขับเคลื่อนโรสโยค[7] ทำได้โดยสมมติให้ rocking lever และแขนทั้งสองข้างที่ต่อกับก้านสูบ มีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.8

$$y_e = x + b_2 \sin \varphi \quad (2.1)$$

$$y_c = x - b_2 \sin \varphi \quad (2.2)$$

เมื่อ  $y_e$  และ  $y_c$  คือระยะกระจัดของลูกสูบขยาย (Expansion Piston) และลูกสูบอัด (Compression Piston) ตามลำดับ  $x$  คือระยะกระจัดของ yoke pin ตำแหน่งตรงกลางของ triangle yoke  $b_2$  คือความยาวแขนทั้งสองข้างของ triangle yoke และ  $\varphi$  คือมุมที่เปลี่ยนไปจากแนวระนาบของแขนทั้งสองข้าง

$$x = r \sin \theta + b_1 \cos \varphi \quad (2.3)$$

เมื่อ  $r$  คือ รัศมีข้อเหวี่ยง  $\theta$  คือมุมข้อเหวี่ยง  $b_1$  คือความสูงของ triangle yoke

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_1 \sin \varphi = r \cos \theta \quad (2.4)$$

$$b_1 \cos \varphi = \sqrt{b_1^2 - (r \cos \theta)^2} \quad (2.5)$$

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่า  $b_1$  และ  $r$  มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 จากนั้นแทนที่สมการที่ 2.5 ลงในสมการที่ 2.3

$$x = r \sin \theta + \sqrt{b_1^2 - (r \cos \theta)^2} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.4 เราสามารถเขียนได้อีกแบบว่า

$$\sin \varphi = \frac{r \cos \theta}{b_1} \quad (2.7)$$

แทนที่สมการ 2.6 และ 2.7 ลงใน 2.1 และ 2.2 จะได้

$$y_e = r \left( \sin \theta + \frac{b_2}{b_1} \cos \theta \right) + \sqrt{b_1^2 - (r \cos \theta)^2} \quad (2.8)$$

$$y_c = r \left( \sin \theta - \frac{b_2}{b_1} \cos \theta \right) + \sqrt{b_1^2 - (r \cos \theta)^2} \quad (2.9)$$

การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรขยาย ( $V_e$ ) และปริมาตรอัด ( $V_c$ ) สามารถหาได้จาก

$$V_e = V_{cl,e} + A_e (y_e - y_{min,e}) \quad (2.10)$$

$$V_c = V_{cl,c} + A_c (y_c - y_{min,c}) \quad (2.11)$$

เมื่อ  $V_e$  และ  $V_c$  คือ ปริมาตรขยายและปริมาตรอัดตามลำดับ  $V_{cl,e}$  และ  $V_{cl,c}$  คือ clearance volume ของฝั่งขยายและอัดตามลำดับ  $A_e$  และ  $A_c$  พื้นที่หน้าตัดกระบอกสูบฝั่งขยายและฝั่งอัดตามลำดับ  $y_{min,e}$  และ  $y_{min,c}$  คือ ระยะกระจัดที่น้อยที่สุดของลูกสูบขยายและอัดตามลำดับ

## 2.4 ทฤษฎีของชมิตซ์

Koichi Hirata[9] ได้สรุปการวิเคราะห์วัฏจักรสเตอร์ลิงแบบอุณหภูมิคงที่ (isothermal) ของเครื่องยนต์ทั้งสามแบบไว้ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ตามได้โดยง่าย ทฤษฎีของชมิตซ์คือการวิเคราะห์วัฏจักรสเตอร์ลิงแบบอุณหภูมิคงที่อย่างง่าย โดยอ้างอิงจากการขยายตัวและหดตัวแบบอุณหภูมิคงที่ของก๊าซอุดมคติ

### 2.4.1 สมมติฐานของซิมิตท์

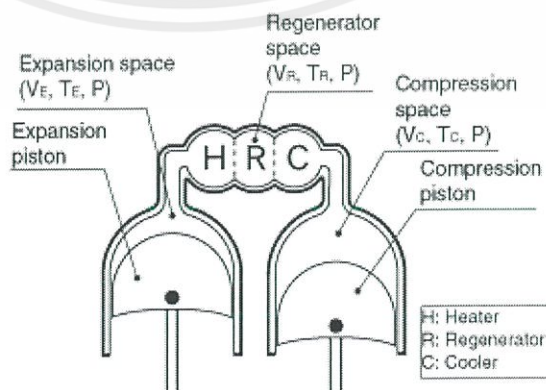
ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้จาก P-V diagram ปริมาตรภายในเครื่องยนต์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.10 และ 2.11 เมื่อปริมาตร มวลของสารทำงาน และอุณหภูมิสามารถหาได้ ก็สามารถหาแรงดันภายในเครื่องยนต์ได้จากกฎของก๊าซอุดมคติ

$$PV = mRT \quad (2.12)$$

คงที่

- 1) มีการสูญเสียความดันในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นและไม่มี ความแตกต่างของความดันภายใน
- 2) กระบวนการขยายตัวและขั้นตอนการอัดตัวการเปลี่ยนแปลงแบบอุณหภูมิ
- 3) เงื่อนไขของสารทำงานจะเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบแก๊สอุดมคติ
- 4) มีการรีเจนเนอเรชั่นที่สมบูรณ์แบบ
- 5) ให้อุณหภูมิของสารทำงานด้านขยายตัวที่ปริมาตรตายของการขยายมีค่าเท่ากับอุณหภูมิสารทำงานด้านขยายตัว( $T_e$ ) และให้อุณหภูมิของสารทำงานด้านอัดตัวที่ปริมาตรตายของการอัดมีค่าเท่ากับอุณหภูมิสารทำงานด้านอัดตัว( $T_c$ )ในระหว่างรอบ
- 6) อุณหภูมิของรีเจนเนอเรเตอร์( $T_r$ )มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสารทำงานด้านขยายตัว( $T_e$ ) และอุณหภูมิสารทำงานด้านอัดตัว( $T_c$ )
- 7) ปริมาตรขยาย( $V_e$ ) และปริมาตรอัด( $V_c$ )เปลี่ยนแปลงตามเส้นโค้งแบบชายน์

### 2.4.2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา



รูปที่ 2.9 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงชนิดแอลฟา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมมติฐานข้อที่ 7 ทำให้สามารถหาปริมาตรขยายช่วงขณะและปริมาตรอัดช่วงขณะได้จากสมการที่ 2.13 และ 2.14

$$V_e = \frac{V_{SE}}{2} (1 - \cos \theta) + V_{DE} \quad (2.13)$$

$$V_c = \frac{V_{SC}}{2} (1 - \cos(\theta - \phi)) + V_{DC} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $V_e$   $V_c$   $V_{SE}$   $V_{SC}$   $V_{DE}$   $V_{DC}$   $\theta$  และ  $\phi$  คือ ปริมาตรขยายช่วงขณะ ( $\text{cm}^3$ ) ปริมาตรอัดช่วงขณะ ( $\text{cm}^3$ ) ปริมาตรกวาดฝั่งขยาย ( $\text{cm}^3$ ) ปริมาตรกวาดฝั่งอัด ( $\text{cm}^3$ ) ปริมาตรตายฝั่งขยาย ( $\text{cm}^3$ ) ปริมาตรตายฝั่งอัด ( $\text{cm}^3$ ) มุมข้อเหวี่ยง (องศา) ความต่างเฟส (องศา) ตามลำดับ ปริมาตรช่วงขณะสุทธิ (V) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15

$$V = V_e + V_r + V_c \quad (2.15)$$

เมื่อ  $V_r$  คือ ปริมาตรรีเจนเนอเรเตอร์ ( $\text{cm}^3$ ) จากสมมติฐานข้อที่ 1 2 และ 3 มวลสุทธิ (m) ของเครื่องยนต์สามารถคำนวณได้โดยใช้ความดันเครื่องยนต์ อุณหภูมิ ปริมาตร และค่าคงที่ก๊าซ

$$m = \frac{PV_e}{RT_e} + \frac{PV_r}{RT_r} + \frac{PV_c}{RT_c} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $P$   $T_e$   $T_r$   $T_c$  และ  $R$  คือ ความดันเครื่องยนต์ (kPa) อุณหภูมิสารทำงานด้านขยายตัว (K) อุณหภูมิของรีเจนเนอเรเตอร์ (K) อุณหภูมิสารทำงานด้านอัดตัว (K) และค่าคงที่ก๊าซ ( $\text{J/kg K}$ ) อัตราส่วนอุณหภูมิ (t) อัตราส่วนปริมาตรกวาด (v) อัตราส่วนปริมาตรตายขยาย ( $X_{DE}$ ) อัตราส่วนปริมาตรตายอัด ( $X_{DC}$ ) อัตราส่วนปริมาตรตายรีเจนเนอเรเตอร์ ( $X_R$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.17 2.18 2.19 2.20 และ 2.21

$$t = \frac{T_c}{T_e} \quad (2.17)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (2.18)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (2.19)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (2.20)$$

$$X_R = \frac{V_r}{V_{SE}} \quad (2.21)$$

อุณหภูมิรีเจเนอเรเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.22 โดยใช้สมมติฐานข้อที่ 6

$$T_r = \frac{T_e + T_c}{2} \quad (2.22)$$

เมื่อแทนที่สมการที่ 2.17 - 2.22 ลงในสมการที่ 2.16 จะได้

$$m = \frac{P}{RT_c} (tV_e + \frac{2tV_r}{1+t} + V_c) \quad (2.23)$$

เมื่อแทนที่สมการที่ 2.13 และ 2.14 ลงในสมการที่ 2.23 จะได้

$$m = \frac{PV_{SE}}{2RT_c} (S - B \cos(\theta - a)) \quad (2.24)$$

โดยที่

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin \phi}{t + \cos \phi} \quad (2.25)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} \quad (2.26)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \cos \phi + v^2} \quad (2.27)$$

ความดันของเครื่องยนต์ชั่วขณะ ( $P$ ) และความดันเฉลี่ยของเครื่องยนต์ ( $P_{mean}$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.28 และ 2.29

$$P = \frac{2mRT_c}{V_{SE}(S - B \cos(\theta - \phi))} \quad (2.28)$$

$$P_{mean} = \frac{2mRT_c}{V_{SE}\sqrt{S^2 - B^2}} \quad (2.29)$$

กำหนดตัวแปรใหม่ ( $c$ ) โดยที่

$$c = \frac{B}{S} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ความดันเครื่องยนต์ชั่วขณะของเครื่องยนต์ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.31 โดยใช้ความดันเฉลี่ย

$$P = \frac{P_{mean}\sqrt{S^2-B^2}}{S-B \cos(\theta-\theta)} \quad (2.31)$$

#### 2.4.3 งานบ่งชี้ กำลังบ่งชี้ และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

งานบ่งชี้ (พื้นที่ใต้กราฟ P-V diagram) ในพื้นที่ขยายตัวและอัดตัว สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.32 และ 2.33 ตามลำดับ

$$W_e = \oint PdV_e = \frac{P_{mean}V_{SE}\pi c \sin a}{1+\sqrt{1-c^2}} \quad (2.32)$$

$$W_c = \oint PdV_c = \frac{P_{mean}V_{SE}\pi c t \sin a}{1+\sqrt{1-c^2}} \quad (2.33)$$

ดังนั้นงานบ่งชี้ใน 1 วัฏจักร ( $W_i$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.34

$$W_i = W_e + W_c \quad (2.34)$$

กำลังบ่งชี้ในพื้นที่ขยายตัว อัดตัว และใน 1 วัฏจักร สามารถหาได้จากสมการที่ 2.35 2.36 และ 2.37 ตามลำดับ

$$L_e = W_e n \quad (2.35)$$

$$L_c = W_c n \quad (2.36)$$

$$L_i = W_i n \quad (2.37)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (Hz) ในอีกความหมายหนึ่ง  $W_e$  คือ ความร้อนที่ต้องป้อนเข้าเครื่องยนต์ (J)  $W_c$  คือ ความร้อนที่ต้องถ่ายออกจากเครื่องยนต์ (J) ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องยนต์( $e$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.38

$$e = \frac{W_i}{W_e} \quad (2.38)$$

## บทที่ 3

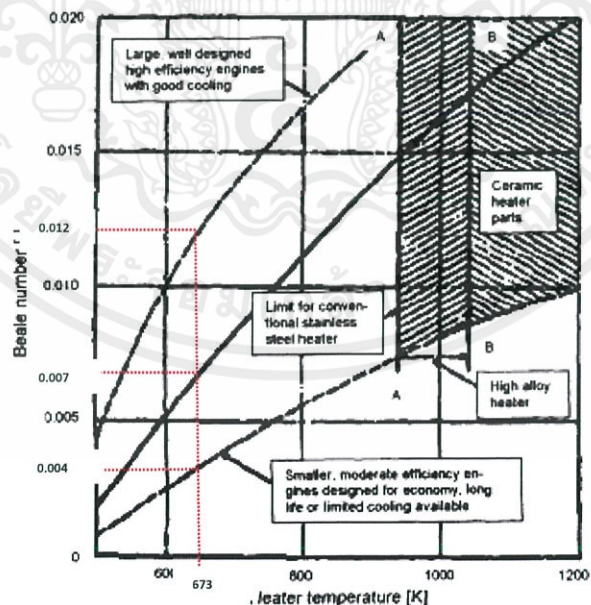
### ผลการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องยนต์

#### 3.1 ผลวิเคราะห์กำลังและประสิทธิภาพเครื่องยนต์

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์

รัศมีข้อเหวี่ยง	7 mm	รูปแบบเครื่องยนต์	แอลฟาผลิตกำลังสองทาง 4 สูบ
เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอก x ระยะชัก	40 x 20 mm	รูปแบบคูลเลอร์	Annular/อากาศ
มุมต่างปริมาตร	90	รูปแบบฮีตเตอร์	Annular/ก๊าซ LPG
ปริมาตรกวาดแต่ละกระบอก	25 cc	พิกัดความเร็วรอบสูงสุด	600 rpm
สารทำงาน	อากาศ 1 atm	ระยะชัก	20 mm

#### 3.1.1 วิเคราะห์กำลังของเครื่องยนต์ด้วยทฤษฎีของบีลล์



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Beale Number และ Heater Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรของบีลล์สามารถใช้ประมาณกำลังเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ทุกรูปแบบและทุกขนาด เครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงจะมี Beale Number เท่ากับ 0.015 แต่เครื่องยนต์นี้ใช้ก๊าซ LPG ซึ่งทำ อุณหภูมิได้อยู่ในช่วง 400 – 500 องศาเซลเซียส จึงออกแบบเครื่องยนต์ให้ทำงานที่ระดับอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส หรือ 673 เคลวิน จากรูปที่ 3.1 เนื่องจากเครื่องยนต์มีขนาดเล็ก และใช้อากาศในการระบายความร้อน จึงเลือกใช้ Beale Number เท่ากับ 0.004

$$L_i = N_B P_{mean} V_{sw} n \quad (3.1)$$

เมื่อ  $L_i$  คือ กำลังเพลลาของเครื่องยนต์ (Watt)

$N_B$  คือ Beale Number

$P_{mean}$  คือ ความดันเฉลี่ยของเครื่องยนต์ (atm)

$V_{sw}$  คือ ปริมาตรกวาดของเครื่องยนต์ (cc)

$n$  คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Hz)

จากข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์และ Beale Number ข้างต้น ทำให้สามารถหาลำกำลังเพลลา ( $L_i$ ) ของเครื่องยนต์ได้เท่ากับ 4 W โดยทั่วไปประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กจะมีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

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

เมื่อ  $\eta_{th}$  คือ ประสิทธิภาพทางความร้อน

$P$  คือ กำลังของเครื่องยนต์ (ในที่นี้หมายถึงกำลังบ่งชี้ที่กล่าวไว้ข้างต้น) (Watt)

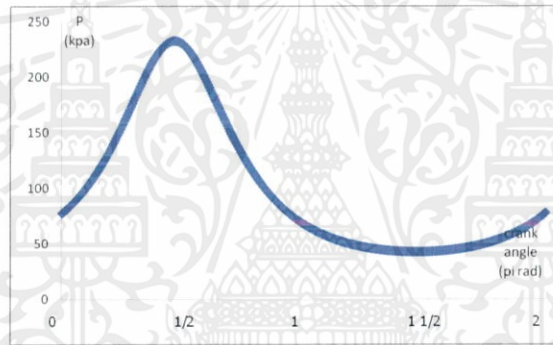
$Q_{in}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ (Watt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลข้างต้น และสมการที่ 3.2 จึงสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ ( $Q_{in}$ ) หรือ กำลังที่ได้จากการขยายตัวของก๊าซ ( $L_c$ ) ได้เท่ากับ 40 W และหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจาก สมการที่ 3.3 จะได้ อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากเครื่องยนต์ ( $Q_{out}$ ) หรือ กำลังที่ได้จากการอัดตัวของก๊าซ ( $L_c$ ) เท่ากับ 36 W

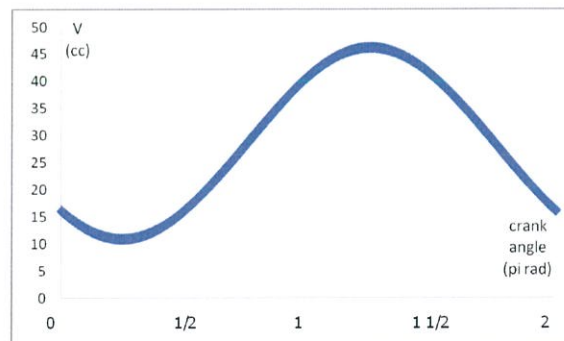
### 3.1.2 วิเคราะห์กำลังด้วยทฤษฎีของซิมิตท์

จากสมการที่ 2.31 ในบทที่ 2 นำมาพล็อตกราฟระหว่างความดันช่วงขณะ ( $P$ ) และมุมข้อเหวี่ยง ณ มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตั้งแต่ 0-360 องศา ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและมุมข้อเหวี่ยง

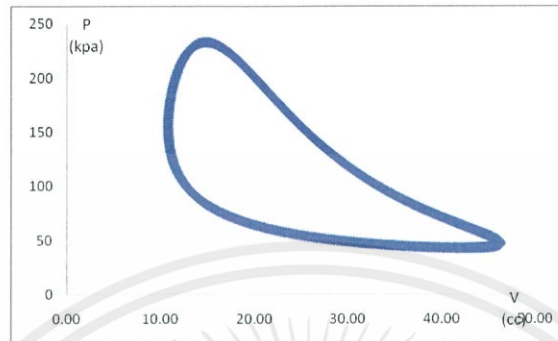
จากสมการที่ 2.15 นำมาพล็อตกราฟระหว่างปริมาตรช่วงขณะสุทธิ ( $V$ ) และมุมข้อเหวี่ยง ณ มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตั้งแต่ 0-360 องศา ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและมุมข้อเหวี่ยง

จากนั้นพล็อตกราฟความดันชั่วขณะและปริมาตรชั่วขณะสุทธิ ณ มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตั้งแต่ 0-360 องศา ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพ P-V

ตารางที่ 3.2 งาน กำลัง และประสิทธิภาพที่ได้จากวัฏจักร

งานที่ได้จากการขยายตัวของ ก๊าซ	3.12 J
งานที่ได้จากการอัดตัวของ ก๊าซ	-1.14 J
งานบ่งชี้	1.98 J
กำลังที่ได้จากการขยายตัว ของก๊าซ	31.21 W
กำลังที่ได้จากการอัดตัวของ ก๊าซ	-11.43 W
กำลังบ่งชี้	19.78 W
ประสิทธิภาพเครื่องยนต์	0.63

จากแผนภาพ P-V (รูปที่ 3.4) การจะหางานและกำลังที่ได้จากการขยายตัวและอัดตัวของก๊าซ งานบ่งชี้ และกำลังบ่งชี้ เป็นเรื่องยาก Koichi Hirata[9] ได้สรุปสูตรในหาตัวแปรทุกตัวที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยใช้สมการที่ 2.32-2.37 ค่าที่ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 สรุป

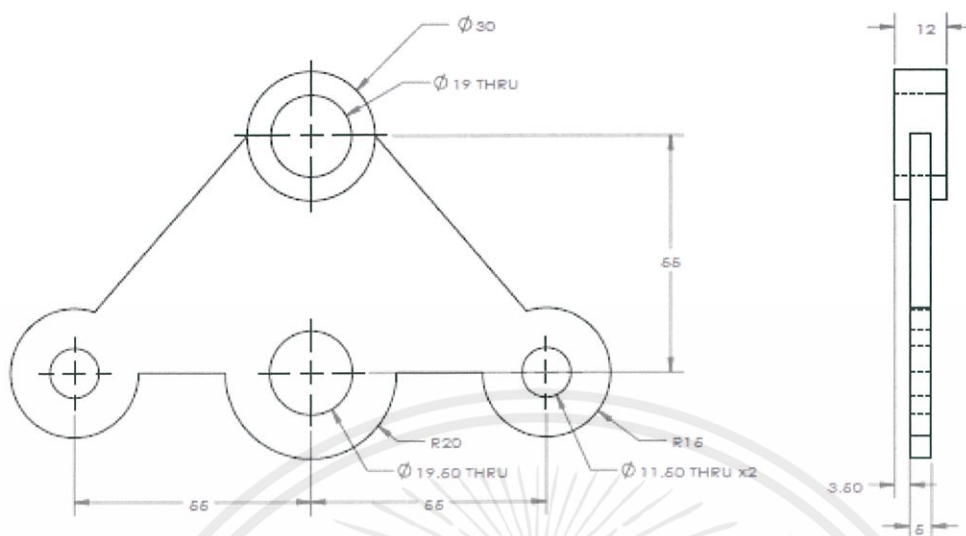
งาน กำลัง และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ที่ได้จากปีลล์และชนิดท์ เป็นการวิเคราะห์เบื้องต้นเท่านั้น เพื่อใช้ประโยชน์ในการสร้างเครื่องยนต์ ทั้งนี้ในทางปฏิบัติค่าที่ได้อาจจะไม่ตรงตามที่ได้วิเคราะห์เอาไว้

ตารางที่ 3.3 งาน กำลัง และประสิทธิภาพ ที่ได้จากปีลล์และชนิดท์

	ชนิดท์	ปีลล์
งานที่ได้จากการขยายตัวของ ก๊าซ	3.12 J	4 J
งานที่ได้จากการอัดตัวของ ก๊าซ	-1.14 J	3.6 J
งานบ่งชี้	1.98 J	0.4 J
กำลังที่ได้จากการขยายตัว ของก๊าซ	31.21 W	40 W
กำลังที่ได้จากการอัดตัวของ ก๊าซ	-11.43 W	36 W
กำลังบ่งชี้	19.78 W	4 W
ประสิทธิภาพเครื่องยนต์	0.63	0.10

## 3.2 ผลการวิเคราะห์กลไกโรสโยค

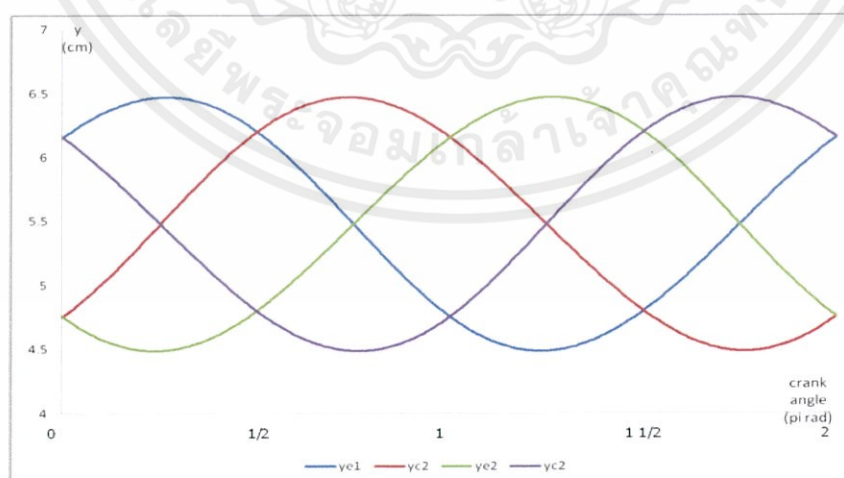
จากรูปที่ 3.5 จะเห็นว่า  $b_1$  และ  $b_2$  มีค่าเท่ากับ 55 mm ดังนั้นเมื่อรู้ค่าของ  $b_1$   $b_2$  และ  $r$  จึงสามารถวิเคราะห์ระยะชัก และปริมาตรกวาดของเครื่องยนต์ได้



รูปที่ 3.5 แสดงขนาดของ triangle yoke

### 3.2.1 วิเคราะห์ระยะชักของเครื่องยนต์

จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 นำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัดของลูกสูบทั้ง 4 และมุมข้อเหวี่ยง ณ มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตั้งแต่ 0-360 องศา ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าแต่ละลูกสูบมีความต่างเฟสกัน 90 องศา

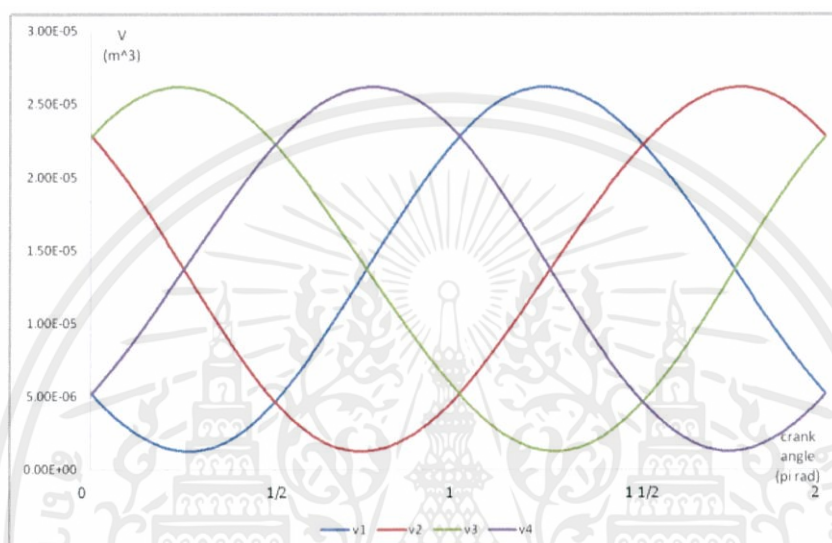


รูปที่ 3.6 กราฟแสดงตำแหน่งของโยค (yoke) ณ มุมข้อเหวี่ยงใดๆของทั้งสี่กระบอกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 วิเคราะห์ปริมาตรกวาดของเครื่องยนต์

จากสมการที่ 2.10 และ 2.11 นำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรขยายและอัดของกระบอกสูบทั้ง 4 และมุมข้อเหวี่ยง ณ มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตั้งแต่ 0-360 องศา ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.7 จะเห็นว่าแต่ละสูบมีความต่างเฟสกัน 90 องศา



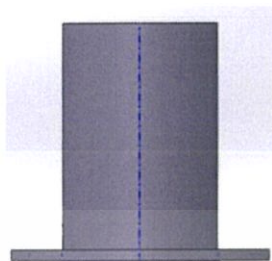
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงปริมาตร ณ มุมข้อเหวี่ยงใดๆของทั้งสี่กระบอกสูบ

### 3.2.3 สรุป

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าลูกสูบทั้ง 4 มีระยะกระจัดสูงสุด และต่ำสุดที่ 6.5 และ 4.5 cm ตามลำดับ ดังนั้นระยะชักจึงเท่ากับ 2 cm หรือ 20 mm จากรูปที่ 3.7 จะเห็นว่าลูกสูบทั้ง 4 มีปริมาตรกวาดเท่ากับ 25 cc ตรงตามที่ได้ออกแบบเครื่องยนต์ไว้

### 3.3 การออกแบบชิ้นส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน

#### 3.3.1 ส่วนรับความร้อน



รูปที่ 3.8 ส่วนรับความร้อน

#### ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของส่วนรับความร้อน

รูปแบบ	Annular plain wall
การให้ความร้อน	LPG
วัสดุ	304 stainless steel
จำนวนร่อง	1
ความกว้างร่อง	1 mm
พื้นที่หน้าตัด	1.22 cm <sup>2</sup>

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{in}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ (W)

$\dot{m}$  คือ อัตราการไหลของอากาศในร่อง Annular

$c_p$  คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ bulk mean temperature

$T_o$  คือ อุณหภูมิของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านส่วนหัวรับความร้อนก่อนเข้าสู่พื้นที่ขยายตัว

$T_i$  คือ อุณหภูมิหลังจากที่อากาศเคลื่อนที่ออกจากรีเจนเนอเรเตอร์เข้าสู่ร่อง Annular

อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ของเครื่องยนต์ จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของอากาศ ดังสมการที่ 3.3 ทำให้อุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น กำหนดให้  $T_o$  เท่ากับ 723 K หรือ 450 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลเซียส และใช้อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เครื่องยนต์เท่ากับ 40 W ทา จากการใช้เทคนิค Trial and Error ในการหาคำตอบด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ทำให้ได้ bulk mean temperature ของอากาศ เท่ากับ 658 K

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 658 K

ความหนาแน่น	0.5396 kg/m <sup>3</sup>
ค่าความหนืดพลวัต	0.0001 m <sup>2</sup> /s
Prandlt Number	0.6824
ค่าการนำความร้อน	0.0500 W/m K
ค่าความร้อนจำเพาะ	1065.20 J/kg K

อัตราการไหลเชิงปริมาตรสามารถหาได้จากสมการ 3.4

$$\dot{V} = 2V_{sw}n \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\dot{V}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m<sup>3</sup>/s)

$V_{sw}$  คือ ปริมาตรกวาด (m<sup>3</sup>)

$n$  คือ ความเร็วรอบ (Hz)

ปริมาตรกวาด และความเร็วรอบ เท่ากับ 0.000025 m<sup>3</sup> และ 10 Hz ตามลำดับ ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรจึงเท่ากับ 0.0005 m<sup>3</sup>/s อัตราการไหลเชิงมวลสามารถหาได้จากสมการ 3.5

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{\rho} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศที่ 658 K ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

จากตารางที่ 3.5 ค่าความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ  $0.5396 \text{ kg}/\text{m}^3$  ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลจึงเท่ากับ  $0.00027 \text{ kg}/\text{s}$  ความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ไหลสามารถหาได้จากสมการ 3.6

$$V_m = \frac{\dot{V}}{A_c} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $V_m$  คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ยของอากาศ (m/s)

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล ( $\text{m}^2$ )

จากตารางที่ 3.4 จะได้พื้นที่หน้าตัดการไหลเท่ากับ  $0.0001 \text{ m}^2$  ดังนั้นความเร็วการไหลเฉลี่ยของอากาศเท่ากับ  $4.10 \text{ m}/\text{s}$  พิจารณาลักษณะการไหลของอากาศจากสมการ 3.8

$$Re = \frac{V_m D_h}{\nu} \quad (3.8)$$

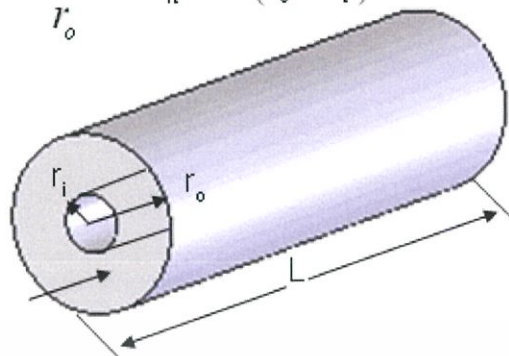
เมื่อ  $Re$  คือ *Reynold number*

$D_h$  คือ *hydraulic diameter* (m)

$\nu$  คือ ค่าความหนืดพลวัต ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

อากาศมีลักษณะการไหลในท่อ annular ดังรูปที่ 3.9 ดังนั้น hydraulic diameter สามารถหาได้จากสมการที่ 3.9

$$r^* = \frac{r_i}{r_o} \quad D_h = 2(r_o - r_i)$$



รูปที่ 3.9 แสดง hydraulic diameter ของ annular tube

$$D_h = D_o - D_i$$

(3.9)

เมื่อ  $D_o$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน ส่วนที่รับความร้อน (m)

$D_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ (m)

เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน ส่วนที่รับความร้อน และเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ เท่ากับ 0.040 และ 0.038 m ตามลำดับ ดังนั้น hydraulic diameter จึงเท่ากับ 0.002 จากความเร็วเฉลี่ยของอากาศ hydraulic diameter และค่าความหนืดพลวัต (ตารางที่ 3.5) ที่ได้หาค่าไว้ข้างต้น ทำให้ Reynold number เท่ากับ 158 ซึ่งอากาศที่มี Reynold number น้อยกว่า 2000 จึงสรุปได้ว่าอากาศมีลักษณะการไหลแบบ Laminar และเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศได้จากสมการ 3.10

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $Nu_o$  คือ Nusselt Number ของอากาศในท่อ Annular

$h_o$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศในท่อ Annular ( $W/m^2 K$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$k_a$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg K)

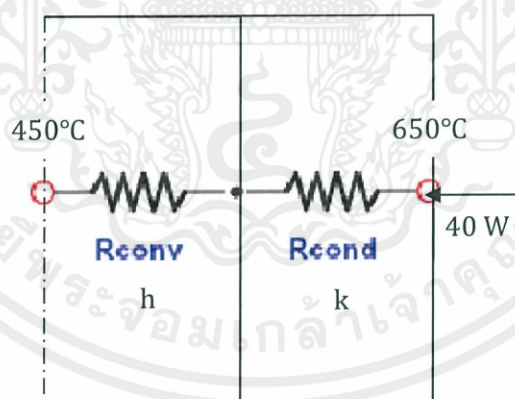
**TABLE 8-4**

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

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

รูปที่ 3.10 ตารางแสดงค่า Nusselt Number สำหรับการไหลแบบ Laminar ในท่อ Annulus

จากการ Interpolation หาค่าของ  $Nu_o$  ที่  $D_i/D_o$  เท่ากับ 0.95 จะได้ค่า  $Nu_o$  เท่ากับ 4.817 จาก *hydraulic diameter* ที่ได้ทำการหาค่าไว้ข้างต้น และค่าความร้อนจำเพาะของอากาศจากตารางที่ 3.5 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศในท่อ annular เท่ากับ  $113 \text{ W/m}^2 \text{ K}$



รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงวงจรความร้อนของส่วนหัวรับความร้อน

ความต้านทานของการนำความร้อนและพาความร้อนสามารถหาได้จากสมการ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{kA} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $R_{\text{cond}}$  คือ ความต้านทานของการนำความร้อน (K/W)

$L$  คือ ความหนาผนังส่วนหัวรับความร้อน (m)

$k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m K)

$A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน ( $\text{m}^2$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ ss 304 และค่าความหนาผนังส่วนหัวรับความร้อน เท่ากับ 22 W/m K และ 0.001 m ตามลำดับ จากนั้นแทนค่าลงในสมการที่ 3.11

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h_o A} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $R_{\text{conv}}$  คือ ความต้านทานของการพาความร้อน (K/W)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศในท่อ annular ที่ได้หาไว้ข้างต้น จากนั้นแทนค่าลงในสมการที่ 3.12

อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ส่วนหัวรับความร้อน สามารถหาได้จากสมการ 3.13

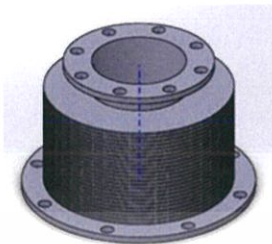
$$\dot{Q}_{\text{in}} = \frac{T_h - T_m}{R_{\text{conv}} + R_{\text{cond}}} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $T_h$  คือ อุณหภูมิผิวนอกของผนังส่วนหัวรับความร้อน (K)

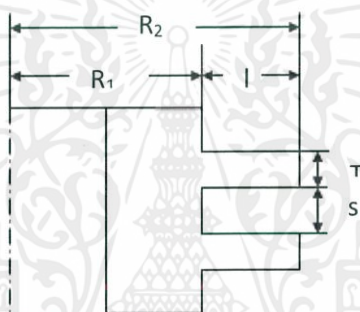
$T_m$  คือ bulk mean temperature (K)

ให้อุณหภูมิผิวนอกของผนังส่วนหัวรับความร้อนเท่ากับ 923 K และ bulk mean temperature ที่ได้ทำการหาไว้ข้างต้น โดยใช้อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เครื่องยนต์เท่ากับ 40 W ดังรูปที่ 3.11 แทนค่าลงในสมการที่ 3.13 หาพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่ต้องใช้ ซึ่งได้เท่ากับ  $0.0018 \text{ m}^2$

### 3.3.2 ครีประบายความร้อน



รูปที่ 3.12 ครีประบายความร้อน

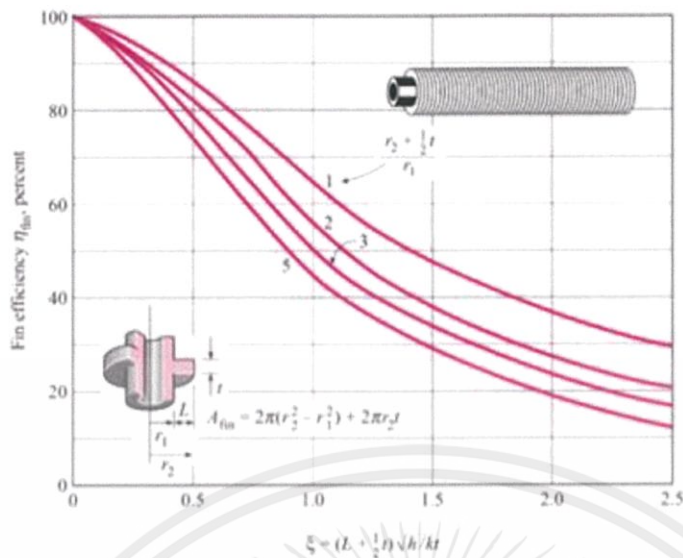


รูปที่ 3.13 ภาพตัดแสดงขนาดครีประบายความร้อน

จากรูปที่ 3.13  $R_1$   $R_2$   $l$   $T$   $S$  คือ รัศมีวงใน รัศมีวงนอก ความยาว ความหนา และความกว้าง ร่องครี ของครีประบายความร้อน ซึ่งได้แสดงค่าไว้ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ขนาดของครีประบายความร้อน

T	0.001 m
S	0.001 m
l	0.021 m
$R_1$	0.023 m
$R_2$	0.044 m



รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดงประสิทธิภาพของครีบบระบายความร้อนแบบ circular

เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทำครีบบระบายความร้อนคือ aluminium มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ  $205 \text{ W/m K}$  และกำหนดให้อากาศมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) เท่ากับ  $8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  จากรูปที่ 3.14 จะได้ประสิทธิภาพของครีบบระบายความร้อนเท่ากับ  $0.96$  พื้นที่ส่วนที่เป็นครีบ ( $A_{\text{fin}}$ ) และส่วนที่ไม่เป็นครีบ ( $A_{\text{unfin}}$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ

$$A_{\text{fin}} = 2\pi(R_2^2 - R_1^2) \quad (3.14)$$

$$A_{\text{unfin}} = 2\pi R_1 S \quad (3.15)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.14 และ 3.15 จะได้ พื้นที่ส่วนที่เป็นครีบและส่วนที่ไม่เป็นครีบ เท่ากับ  $0.009$  และ  $0.0001 \text{ m}^2$  ตามลำดับ จากนั้นหาอัตราของถ่ายความร้อนของส่วนที่เป็นครีบและไม่เป็นครีบได้จากสมการที่ 3.16 และ 3.17 ตามลำดับ

$$\dot{Q}_{\text{fin}} = \eta_{\text{fin}} h A_{\text{fin}} (T_1 - T_{\infty}) \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\dot{Q}_{fin}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากครีบบระบายความร้อน (W)

$\eta_{fin}$  คือ ประสิทธิภาพของครีบบระบายความร้อน

$h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 K$ )

$A_{fin}$  คือ พื้นที่ส่วนที่เป็นครีบบระบายความร้อน ( $m^2$ )

$T_1$  คือ อุณหภูมิผิววนอกของครีบบระบายความร้อน (K)

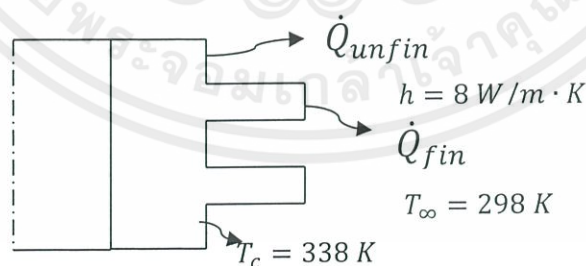
$T_\infty$  คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอก (K)

$$\dot{Q}_{unfin} = hA_{unfin}(T_1 - T_\infty) \quad (3.17)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{unfin}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากส่วนที่ไม่เป็นครีบบระบายความร้อน (W)

$A_{unfin}$  คือ พื้นที่ส่วนที่ไม่เป็นครีบบระบายความร้อน ( $m^2$ )

กำหนดให้อุณหภูมิ และ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของอากาศภายนอก เท่ากับ 298 K และ 8 W/m K ตามลำดับ สมมติให้อุณหภูมิผิววนอกของครีบบระบายความร้อนมีค่าเท่ากันทุกจุดและมีค่าเท่ากับ 338 K เมื่อแทนค่าที่หามาทั้งหมดข้างต้นลงในสมการที่ 3.16 และ 3.17 จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากส่วนที่เป็นครีบบและไม่เป็นครีบบระบายความร้อนเท่ากับ 1.40 และ 0.023 W ตามลำดับ



รูปที่ 3.15 แผนภาพแสดงการระบายความร้อนของครีบบ

อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดออกจากครีบบระบายความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 3.18

$$\dot{Q}_{out,total} = n_{fin}(\dot{Q}_{fin} + \dot{Q}_{unfin}) \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\dot{Q}_{out,total}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดออกจากครีบ (W)

$n_{fin}$  คือ จำนวนครีบ

แทนค่าลงในสมการที่ 3.18 โดยใช้อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดออกจากครีบเท่ากับ 36 W จะได้จำนวนครีบที่ต้องใช้ประมาณ 13 ครีบ

### 3.3.3 สรุป

ส่วนหัวรับความร้อนของเครื่องยนต์ถูกออกแบบไว้ให้มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ  $0.0018 \text{ m}^2$  และครีบระบายความร้อน 13 ครีบ



## บทที่ 4

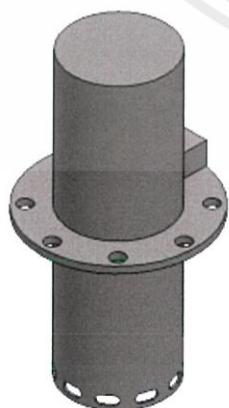
### ผลการทดลอง

#### 4.1 ชั้นส่วนของเครื่องยนต์



รูปที่ 4.1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตกำลังสองทิศทางสี่สูบด้วยกลไกตัดแปลงรอสโยค

#### 4.1.1 ระบายความร้อน

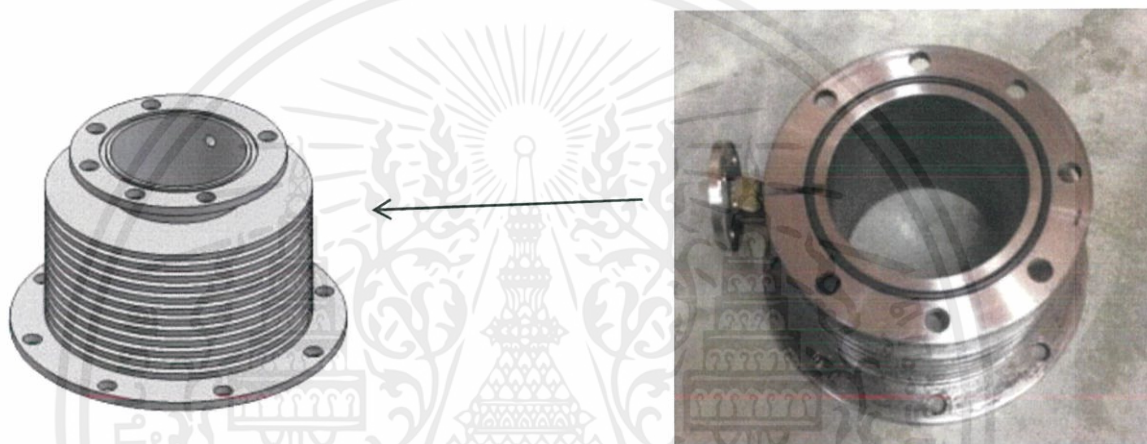


รูปที่ 4.2 ระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นชิ้นส่วนสำหรับรับพลังงานความร้อน จึงต้องมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการรับความร้อนที่อุณหภูมิสูงและความดัน อีกทั้งในการรับความร้อนนั้นโลหะจะมีการขยายตัว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเค้นสะสม(Residual Stress) ในวัสดุ จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงและทนต่อความล้าเนื่องจากการขยายตัวและหดตัวจากความร้อนได้ วัสดุที่ใช้จึงเลือก Stainless Steel และการออกแบบรูปทรงโดมเพื่อให้มีพื้นที่รับความร้อนมากกว่าพื้นที่ทรงกระบอก อีกทั้งลักษณะของโดมจะมีความแข็งแรงต่อความดันและช่วยลดความดันสูญเสียจากการไหล

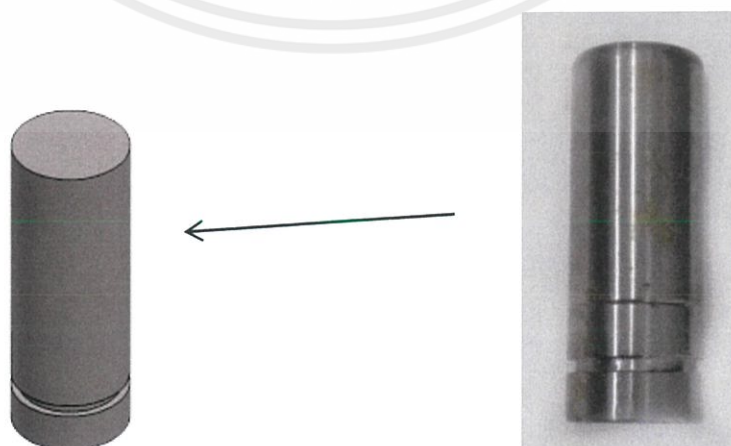
#### 4.1.2 ส่วนครีระบายความร้อน



รูปที่ 4.3 ส่วนระบายความร้อน

เป็นชิ้นส่วนที่รับความร้อนของสารทำงานและระบายออกสู่ภายนอก ซึ่งประกอบด้วยครีบเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อน โดยวัสดุที่ใช้เป็น Aluminum Alloys 7075-T6 (SN) เนื่องจากมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี

#### 4.1.3 ลูกสูบ



รูปที่ 4.4 ลูกสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกสูบด้านร้อนส่วนล่างจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับโดมรับความร้อนเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารทำงาน และลดการเกิด shuttle heat อีกทั้งยังช่วยลด dead volume ของเครื่องยนต์ ลูกสูบด้านร้อนจะกลวงข้างใน เพื่อลดน้ำหนักของลูกสูบ โดยลูกสูบด้านร้อนส่วนบนจะมีขนาดเล็กกว่าลูกสูบด้านร้อนส่วนล่างเล็กน้อย เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสี และมีช่องว่างในการเคลื่อนที่ของสารทำงานระหว่างลูกสูบด้านร้อนส่วนบนและโดมรับความร้อน โดยลูกสูบด้านร้อน จำเป็นที่ต้องใช้วัสดุที่มีความทนความร้อน เนื่องจากจะอยู่ภายในโดมรับความร้อนซึ่งรับความร้อนมาโดยตรง จึงเลือกใช้วัสดุเป็น Stainless Steel

#### 4.1.4 ชุดเพลลาและข้อต่อรวม



รูปที่ 4.5 ชุดเพลลาและข้อต่อรวม

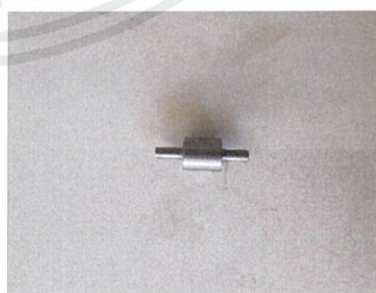
เป็นแกนส่งกำลังจากก้านสูบส่งต่อไปล้อหมุนและจากล้อหมุนส่งกำลังกลับมาที่ก้านสูบ ทำจากวัสดุ Stainless Steel

#### 4.1.5 เพลลาข้อเหวี่ยง (Crank shaft)



รูปที่ 4.6ก. เพลลาข้อเหวี่ยง

ส่วนติดกับล้อช่วยแรง



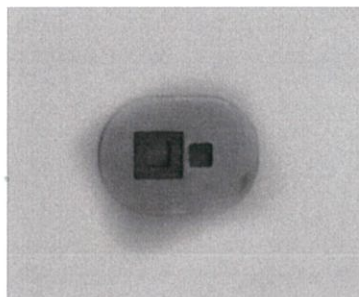
รูปที่ 4.6ข. เพลลาข้อเหวี่ยง

ส่วนติดกับข้อเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6ค. เฟลาข้อเหวี่ยง



รูปที่ 4.6ง. ข้อเหวี่ยงส่วนปลาย

มีลักษณะคล้ายกับเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายใน การหมุนของเฟลาเกิดจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบกำลังถูกส่งผ่านมายังก้านสูบและกลไกโรสส์ยอร์ดตามลำดับ วัสดุที่ใช้ควรมีคุณสมบัติทนต่อแรงกระทำขณะที่มีการเคลื่อนที่ของเฟลาข้อเหวี่ยงเป็นการเคลื่อนที่เชิงมุม

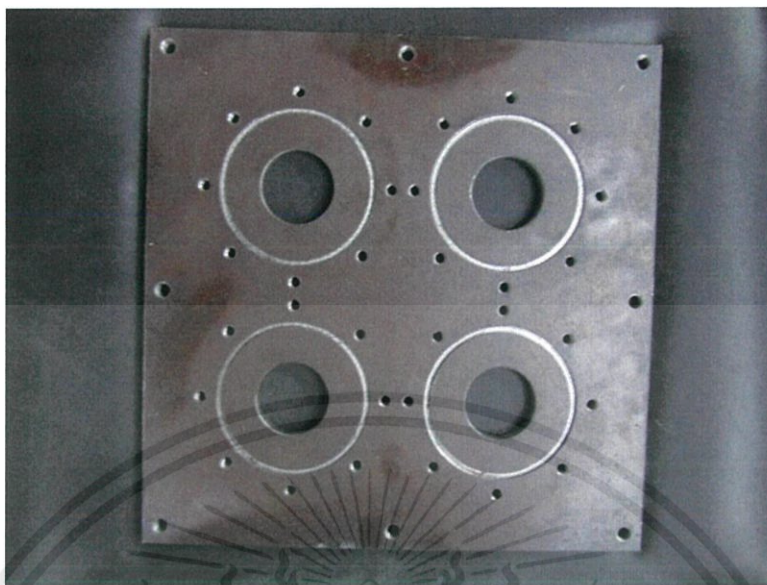
#### 4.1.6 ก้านสูบ (Connecting Rods)



รูปที่ 4.7 ก้านสูบ

ทำหน้าที่เป็นกลไกส่งกำลังจากลูกสูบ เพื่อส่งไปยังกลไกโรสส์ยอร์ด และเฟลาข้อเหวี่ยงเป็นลำดับต่อไป โดยได้ออกแบบส่วนที่ประกบกับลูกสูบให้มีลักษณะเป็นเกลียว เพื่อความง่ายต่อการประกอบ และการปรับระดับเฟสของลูกสูบทั้ง 4 ตัว

#### 4.1.7 แผ่นเพลท (Plate)



รูปที่ 4.8 แผ่นเพลท

โดยมีหน้าที่เป็นฐานรองรับของส่วนผลิตกำลัง และยึดส่วนของกลไกโรสส์ยอร์ก เข้าไว้กับตัวแผ่นเพลท

#### 4.1.8 ส่วนเสริมก้านสูบ (Rod supporters)



รูปที่ 4.9ก. ส่วนเสริมก้านสูบ

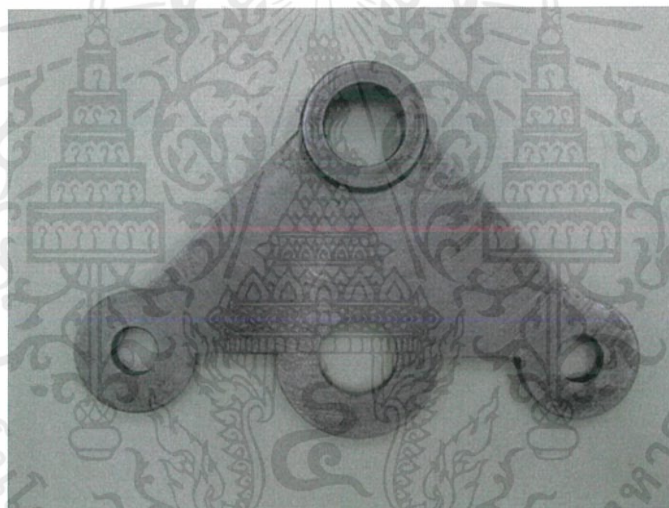
ส่วนเสริมของก้านสูบ (Rod supporter) เนื่องจากในแบบที่มีอยู่นั้น ไม่มีชิ้นส่วนใดที่ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการกันรั่วของไหลทำงานจากส่วนของกระบอกสูบไปยังส่วนล่าง จึงมีการออกแบบส่วนเสริมของก้านสูบขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

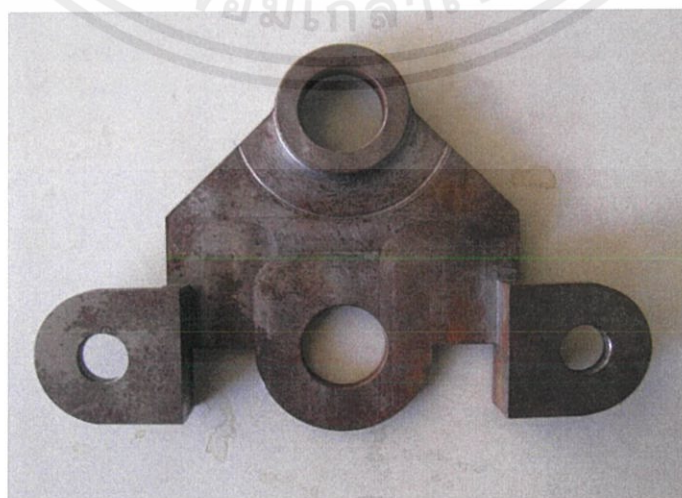


รูปที่ 4.9ข. ส่วนเสริมก้านสูบ(ขยายรูตรงกลางเพื่อใส่ยูคัพ)

#### 4.1.9 รอสโยค (Ross yoke mechanism)



รูปที่ 4.10ก. รอสโยคด้านหน้า

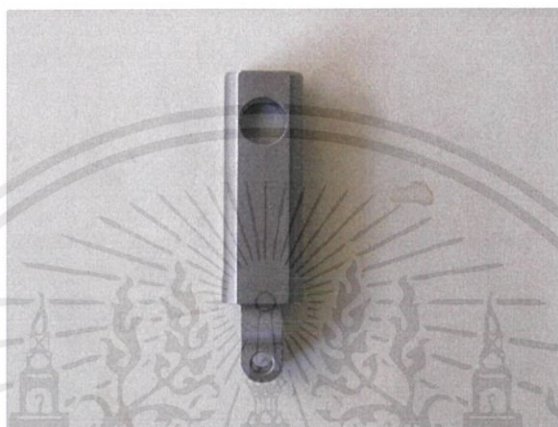


รูปที่ 4.10ข. รอสโยคด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้อ้างอิงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอสยอร์กเป็นกลไกส่งกำลัง โดยส่งกำลังจากการเคลื่อนที่แนวเส้นตรงของกระบอกสูบให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมของเพลลา มีข้อดีจากการส่งกำลังคือ ลดภาระแรงเสียดทานกระทำระหว่างผนังกระบอกสูบและลูกสูบเนื่องจากลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นลงเป็นแนวเส้นตรง กันรั้วก้านสูบ (Rod seal) ทำให้เกิดการสึกน้ยลงและลดปัญหาการรั้วของสารทำงาน ภายในกระบอกสูบ

#### 4.1.10 ลิงค์เกอร์ (Linkers)



รูปที่ 4.11 ลิงค์เกอร์

เป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างก้านสูบและรอสยอร์ก เพื่อส่งกำลังระหว่างก้านสูบและกลไกรอสยอร์ก

#### 4.1.11 ฐานเครื่อง (Frame)



รูปที่ 4.12 ฐานเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีหน้าที่รองรับโครงสร้างของเครื่องยนต์ออกแบบให้มองเห็นได้ทั้ง 4 ทิศทางเนื่องจากความง่ายต่อการประกอบ

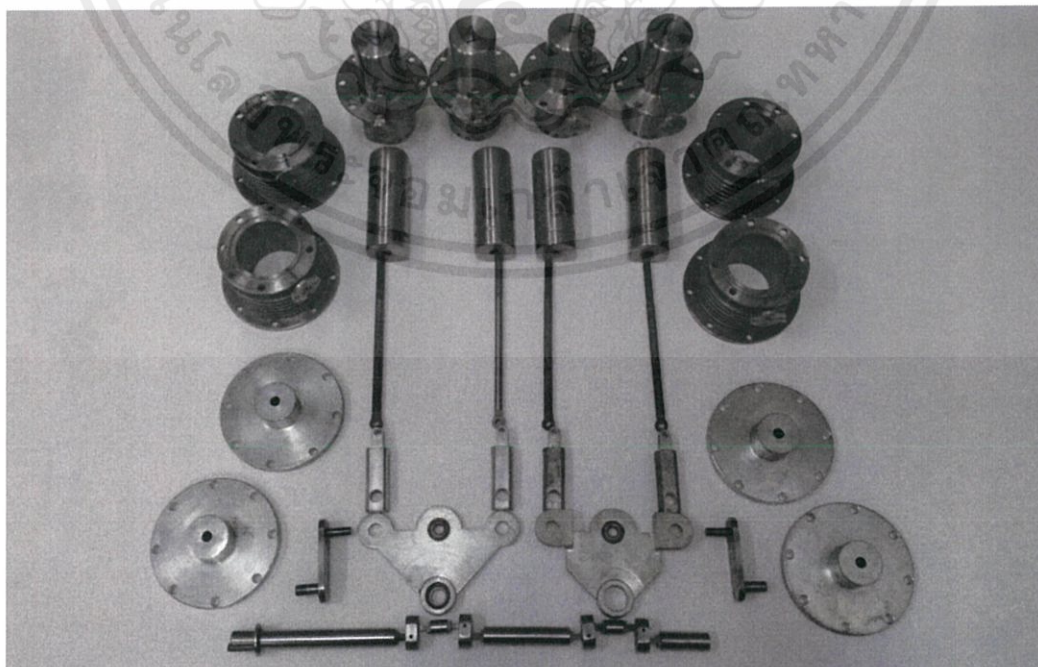
#### 4.1.12 ล้อช่วยแรง (Fly wheel)



รูปที่ 4.13 ล้อช่วยแรง

มีหน้าที่ช่วยในการรักษากำลังของเครื่องยนต์ ให้มีอัตราเร็วคงที่ เนื่องจากการตกของกำลังของเครื่องยนต์

#### 4.1.13 รวมชิ้นส่วน

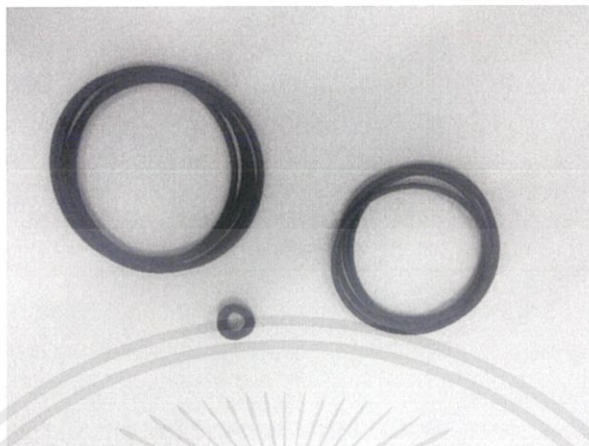


รูปที่ 4.14 รวมชิ้นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ชุดซีลกันรั่ว

### 4.2.1 ชุดโอริงซีลยางระหว่างชิ้นส่วนประกบกัน



รูปที่ 4.15 ชุดโอริงซีลระหว่างชิ้นส่วน

ทำจากวัสดุ nbr ใส่ในร่องของแต่ละหน้าแปลนที่ประกบกัน ทำหน้าที่กันอากาศไม่รั่วไหลออก เพราะอากาศในเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นระบบปิด

### 4.2.2 ชุดโอริงซีลลูกสูบ(ptfe)



รูปที่ 4.16 ชุดโอริงซีลลูกสูบ

ทำจากวัสดุ ptfе ยึดติดกับลูกสูบที่เคลื่อนที่ ทำหน้าที่ป้องกันอากาศรั่วระหว่างฝั่งร้อน-เย็นในกระบอกสูบ

### 4.2.3 ยูคัพ



รูปที่ 4.17 ยูคัพ

ทำจากวัสดุ PU ใส่ลงในช่องตรงกลางของส่วนเสริมก้านสูบ รูตรงกลางไว้ให้ก้านสูบวิ่งผ่าน ทำหน้าที่กันอากาศรั่วออกจากกระบอกสูบ

## 4.3 ชุดทดสอบเครื่องยนต์

### 4.3.1 ถังก๊าซ LPG



รูปที่ 4.18 ถังก๊าซ LPG และ วาล์วควบคุมความดันและอัตราการไหล

ใช้ควบคุมปริมาณก๊าซ LPG ที่ไหลเข้าสู่หัวเผา โดยปรับปริมาณการไหลของก๊าซจากวาล์วควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

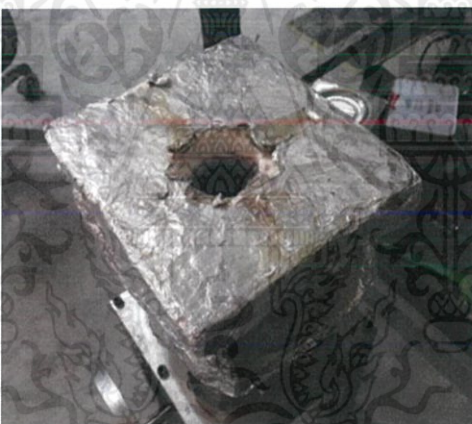
### 4.3.2 หัวเผาก๊าซ



รูปที่ 4.19 หัวเผาก๊าซ

ใช้โดยควบคุมการเปิดปิดก๊าซ LPG ที่วาล์วตรงด้ามจับ และเผาไปที่กระบอกสุบฝังรับความร้อน

### 4.3.3 ฉนวนครอบหัวเผา



รูปที่ 4.20ก. ฉนวนครอบหัวเผามุมบน



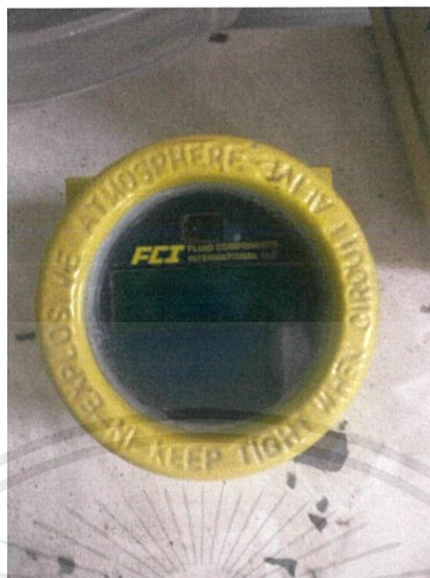
รูปที่ 4.20ข. ฉนวนครอบหัวเผามุมข้าง

ใช้ครอบที่บริเวณโคมรับความร้อนเพื่อควบคุมขอบเขตของเปลวเพลิง และหุ้มฉนวนเพื่อ

ป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 เครื่องวัดอัตราการไหล ( Flow meter )



รูปที่ 4.21 เครื่องวัดอัตราการไหล

ใช้เพื่อวัด และอ่านค่าอัตราการไหลของก๊าซ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง

#### 4.3.5 อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ ( Infrared thermometer )



รูปที่ 4.22 อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

ใช้ยิงรังสีอินฟราเรดเพื่อวัดอุณหภูมิที่พื้นผิว โดยค่าที่อ่านได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของรังสีอินฟราเรดทั้งสองจุด

#### 4.4 วิธีการทดลอง

การทดสอบครั้งที่ 1 : ทดลองหมุนล้อช่วยแรงเพื่อทดสอบกลไกเพลลา

ผลการทดสอบ : กลไกเพลลายังมีการเคลื่อนที่ที่ไม่เสถียรเท่าที่ควร และพบว่าก้านสูบยังมีตำแหน่งไม่ตั้งฉากกับเพลลา

การแก้ปัญหา : เปลี่ยนน็อตให้ตรงไซส์จาก m3 เป็น m4 และปรับจูนระยะห่างระหว่างก้านสูบกับเพลลาใหม่โดยการเลื่อนเพลลาไปทิศทางตรงข้ามกับล้อช่วยแรงเล็กน้อยจนก้านสูบ ตั้งฉากกับเพลลา

การทดสอบครั้งที่ 2 : ประกอบเครื่องยนต์และทดลองหมุนล้อช่วยแรง

ผลการทดสอบ : ไม่มีแรงผลักลับ สันนิษฐานว่าอาจเกิดมีอากาศรั่วไหลออกไป เนื่องจากใช้โอริงซีลไม่เพียงพอต่อการอุดรอยรั่ว

การแก้ปัญหา : ทากาวซีลบริเวณหน้าแปลนรอยต่อทั้งหมดเพื่อกันอากาศรั่วออกสู่ข้างนอก

การทดสอบครั้งที่ 3 : อัตราการไหลของก๊าซ LPG 0.3 kg/hr เวลาที่ให้ความร้อน 5 นาที อุณหภูมิพื้นผิว 650 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องหลังจากการแก้ปัญหาก่อนหน้า เรียบร้อยแล้ว

ผลการทดสอบ : เครื่องยนต์ไม่ทำงาน

การแก้ปัญหา : หาสาเหตุที่ทำให้เครื่องยนต์ไม่ทำงานเพื่อเขียนในข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางให้แก่ผู้ที่สนใจจะศึกษาต่อแก้ไขต่อไปในอนาคต

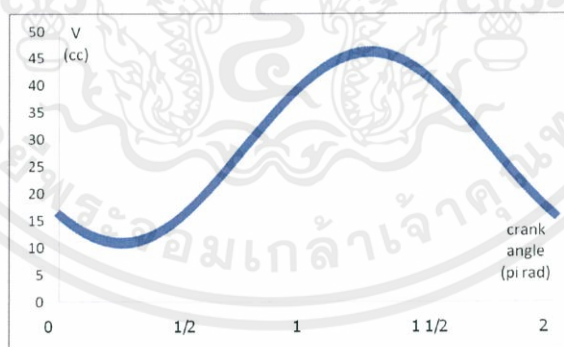
## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

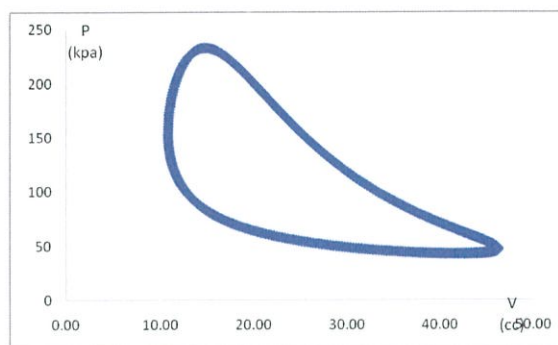
#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ความดันสูงสุด (kpa)	238
ความดันต่ำสุด (kpa)	47
ความร้อนที่ป้อนเข้า (J)	3.12
ความร้อนที่เอาออก (J)	-1.14
งานบ่งชี้ (J)	1.98
ความเร็วรอบของ เครื่องยนต์ (RPM)	600
กำลังบ่งชี้ (W)	19.78
ประสิทธิภาพของ เครื่องยนต์	0.63

ตารางที่ 5.1 ค่าที่ได้จากวัฏจักร Schmidt



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและมุมข้อเหวี่ยง



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะจากการทดลอง

5.2.1 ควรเปลี่ยนวัสดุคัพจาก PU เป็น NBR เนื่องจากมีความหนืดน้อยกว่า ทำให้สูญเสียแรงเสียดทานน้อย เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เครื่องยนต์ไม่ติดในกรณีที่ไม่ได้การอัดแรงดัน

5.2.2 ควรเปลี่ยนน็อตที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างก้านสูบกับลิงค์เกอร์เป็นแบร์ริง เพราะแบร์ริงจะสั่นทำให้การส่งผ่านแรงทำได้ดีกว่าและไม่เกิดการโยกที่จะทำให้เกิดการสูญเสียแรงโดยเปล่าประโยชน์

5.2.3 การใช้อากาศในการระบายความร้อนไม่เพียงพอต่อการทำให้เครื่องยนต์ทำงานในการทดลองจริง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยมาก อาจจะใช้ น้ำ ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน

5.2.4 ควรตั้งศูนย์ล้อช่วยแรงใหม่ เนื่องจากเป็นของที่ทำมานานแล้วและผ่านการทดลองมาหลายครั้ง ทำให้เกิดความไม่สมดุล ส่งผลให้เกิดการหมุนที่ไม่เสถียร

5.2.5 ควรทำฉนวนส่วนล่างให้บางลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวฝั่งรับความร้อน ส่งผลให้สามารถรับความร้อนได้มากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Ohio. Alpha stirling[Online]. Available from:  
<https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/engines.html> [2017, July 28]
- [2] Solar Cell Central. Alpha stirling[Online]. Available from:  
[http://solarcellcentral.com/stirling\\_page.html](http://solarcellcentral.com/stirling_page.html) [2017, July 28]
- [3] Ohio. Beta stirling[Online]. Available from:  
<https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/beta.html> [2017, July 28]
- [4] Ohio. Gamma stirling[Online]. Available from:  
<https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/gamma.html> [2017, July 28]
- [5] Research Gate. Ross yoke[Online]. Available from:  
[https://www.researchgate.net/figure/257051890\\_fig3\\_Fig-3-Geometric-derivation-of-the-Ross-Yoke-drive-equation](https://www.researchgate.net/figure/257051890_fig3_Fig-3-Geometric-derivation-of-the-Ross-Yoke-drive-equation)
- [6] Andy Ross. Making Stirling Engines. Ross Experimental. 1997.
- [7] Ohio. Volume variation – Ross Yoke – drive engine[Online]. Available from:  
[https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/yoke\\_vol.html](https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/yoke_vol.html)
- [8] Bekkoame. Alpha stirling engine[online]. Available from:  
<http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/schmidt/schmidt.htm>
- [9] Koichi Hirata. Schmidt Theory for Stirling Engines. National Maritime Research Institute
- [10] Magicalmachines. Alpha stirling cycle[online]. Available from:  
<http://magicalmachines.weebly.com/alpha-stirling-engine.html>
- [11] Physics Oregonstate. Alpha stirling cycle[online]. Available from:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[http://physics.oregonstate.edu/~hetheriw/energy/topics/doc/thermo/heat\\_eng/Stirling\\_engine/What\\_is\\_Stirling\\_or\\_The\\_Stirling\\_Cycle.htm](http://physics.oregonstate.edu/~hetheriw/energy/topics/doc/thermo/heat_eng/Stirling_engine/What_is_Stirling_or_The_Stirling_Cycle.htm)

[12] Wikipedia. Heat engine[online]. Available from:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_engine)

[13] G.Walker, "Stirling Engines", clarendon press Oxford 1980.

[14] Yunus A. Cengel, Heat Transfer : A Practical Approach, 2<sup>nd</sup> ed., Mcgraw-Hill, 2003.

[15] Fchart. Hydraulic diameter of annular[online]. Available from:

[http://fchart.com/ees/heat\\_transfer\\_library/internal\\_flow/hs1220.htm](http://fchart.com/ees/heat_transfer_library/internal_flow/hs1220.htm)

